JCEEA

Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury

Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture

Kwartalnik
tom XXXII
zeszyt 62 (nr 2/2015)
kwiecień-czerwiec

(e-ISSN 2300-8903)

Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury jest kontynuacją
Zeszytów Naukowych Politechniki Rzeszowskiej - Budownictwo i Inżynieria Środowiska.

Wydano za zgodą Rektora

R e d a k t o r n a c z e l n y
Wydawnictw Politechniki Rzeszowskiej
prof. dr hab. inż. Leonard ZIEMIAŃSKI

R a d a N a u k o w a
prof. Mohamed Eid (Francja), prof. David Valis (Czechy)
prof. Nadežda Števulová (Słowacja)
prof. Antonio João Carvalho de Albuquerque (Portugalia)
prof. Volodymyr V. Cherniuk (Ukraina)
prof. João Antonio Saraiva Pires da Fonseca (Portugalia)
prof. Dušan Katunsky (Słowacja), prof. Vincent Kvočak (Słowacja)
prof. Zinoviy Blikharskyy (Ukraina), prof. Tomasz Winnicki (Polska)
prof. Czesława Rosik-Dulewska (Polska), prof. Krzysztof Knapik (Polska)
prof. Janusz A. Tomaszek (Polska), prof. Jerzy Ziółko (Polska)
prof. Ryszard L. Kowalczyk (Polska), prof. Stanisław Kuś (Polska)

K o m i t e t R e d a k c y j n y
(afiliacja: Polska)

redaktor naczelny
dr hab. inż. Piotr KOSZELNIK, prof. PRz

redaktorzy tematyczni (*naukowi*)
prof. dr hab. inż. Aleksander KOZŁOWSKI, prof. dr hab. inż. Janusz RAK

redaktor statystyczny
dr hab. inż. Szczepan WOLIŃSKI, prof. PRz

sekretarz redakcji
dr inż. Katarzyna PIETRUCHA-URBANIK

członkowie
dr inż. Renata GRUCA-ROKOSZ, dr inż. arch. Anna SIKORA
dr inż. Zdzisław PISAREK, dr hab. inż. Lucjan ŚLĘCZKA, prof. PRz

P r z y g o t o w a n i e m a t r y c
Artur SZALACHA

p-ISSN 2300-5130
e-ISSN 2300-8903

Wersja drukowana Kwartalnika jest wersją pierwotną.

Redakcja czasopisma: Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, www.oficyna.portal.edu.pl//pl/zeszyty--naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/ (e-mail: kpiet@prz.edu.pl)

Wydawca: Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, www.oficyna.portal.prz.edu.pl (e-mail: oficyna1@prz.edu.pl)

Informacje dodatkowe i stopka – str. 619

SPIS TREŚCI

Joanna BIEDROŃSKA: Możliwości kształtowania przylegających struktur szklarniowych i ich wpływ na gospodarkę energetyczną budynku 9

Estera BOŻEK, Mariusz FILIPOWICZ: Wykorzystanie techniki śledzenia promienia do modelowania wysokotemperaturowych układów helioenergetycznych 19

Dorota A. CHWIEDUK: Wybrane przykłady zastosowania materiałów PCM w budownictwie 29

Anna DUDZIŃSKA: Skuteczność osłon przeciwsłonecznych w kształtowaniu komfortu cieplnego w pasywnym budynku użyteczności publicznej 39

Małgorzata FEDORCZAK-CISAK, Alicja KOWALSKA-KOCZWARA: Analiza możliwości zapewnienia komfortu akustycznego i wibracyjnego pomieszczeń przy użyciu materiałów energooszczędnych 49

Stanisław FIC, Przemysław BRZYSKI, Andrzej SZEWCZAK, Monika JAROSZ-HADAM: Wybrane właściwości lekkich kompozytów na bazie wypełniaczy celulozowych do zastosowania w budownictwie ekologicznym 61

Mariusz FILIPOWICZ, Mateusz SZUBEL, Krzysztof SORNEK, Estera BOŻEK, Leszek KURCZ, Arkadiusz FIGÓRSKI, Wiktor WESOŁOWSKI, Jacek RĘKA: Badania energetycznych i ekologicznych parametrów pracy domowych urządzeń grzewczych typu piecokominki 71

Tomasz GACZOŁ: Wentylacja grawitacyjna w budynkach mieszkalnych – wybrane zagadnienia 81

Halina GARBALIŃSKA, Bartłomiej MAJKOWSKI: Pomiary sorpcyjne współczynnika dyfuzji wilgoci różnego rodzaju zapraw 89

Tomasz GRUDNIEWSKI, Zofia LUBAŃSKA, Sławomir CZERNIK: Charakterystyka AFM cienkich warstw SnO_2 uzyskanych podczas sputteringu magnetronowego przy wybranych warunkach procesu 99

Andrzej GRZEBIELEC, Artur RUSOWICZ: Wykorzystanie gruntowych pomp ciepła w systemach klimatyzacji 107

Beata JAGIEŁA, Marek GOSZTYŁA: Koncepcje restauracji klasztoru OO. Bernardynów w Rzeszowie według projektów Zygmunta Hendla 117

Beata JAGIEŁA, Marek GOSZTYŁA: Projekty konserwatorskie Zygmunta Hendla w kościele OO. Bernardynów w Rzeszowie..... 127

Arkadiusz JAMROZIK, Michał PYRC, Maciej LIZIŃSKI, Krzysztof MASAPUST: Możliwości pozyskiwania paliw gazowych w procesach termicznego przetwarzania odpadów 137

Arkadiusz JAMROZIK, Michał PYRC, Marta ŚWIĄCIK, Magdalena SCHAB: Oczyszczanie i przetwarzanie gazu generatorowego ze zgazowania odpadów..... 145

Justyna KOBYLARCZYK: Model oceny jakości środowiska zamieszkania. Analiza wybranych obszarów województwa podkarpackiego..... 157

Piotr KOPEĆ: Obliczenia i dobór gruntowego wymiennika ciepła dla pompy ciepła 167

Justyna KOT: Odzysk ciepła w obiektach użyteczności publicznej – wstępna analiza ekonomiczna..... 177

Zbigniew KOWAL, Rafał PIOTROWSKI: Energoaktywne segmenty hal przekryte regularną strukturą koszową..... 189

Marcin KRÓLIKOWSKI, Justyna MAZURKIEWICZ, Anna WACHOWICZ: Pojazdy hybrydowe a systemy fotowoltaiczne – możliwości wykorzystania (projekt OZI) 197

Radosław KRZEMIŃSKI, Wojciech TERLIKOWSKI: Kaszyce drewniane – historycznym elementem rewitalizacji zabytków..... 207

Sabina KSIĄŻEK, Małgorzata KIDA, Piotr KOSZELNIK: Występowanie perfluorowanych związków organicznych w środowisku i fizykochemiczne metody usuwania ich z roztworów wodnych 221

Ewelina KUBACKA, Dariusz HEIM: Komfort termiczny w pomieszczeniu ze zdecentralizowanym, mechanicznym systemem doprowadzenia powietrza..... 239

Karolina KURTZ-ORECKA, Piotr CIERZNIEWSKI: Problematyka termomodernizacji w budynkach zabytkowych i dawnych..... 249

Radosław KURZYP: Możliwości zastosowania technologii wznoszenia budynków wielkoprzestrzennych w budownictwie jednorodzinnym w aspekcie ochrony środowiska naturalnego 259

Dominika KUŚNIERZ-KRUPA: Problematyka rewaloryzacji zabytkowych willi w miejscowościach uzdrowiskowych na przykładzie willi: Primavera, Jaworzyna oraz Wawel w Rabce Zdrój 265

Roman LICHOGRAJ, Jan Marian OLCHOWIK, Piotr LICHOGRAJ, Sławomir CZERNIK: Wpływ trawienia plazmą na wybrane parametry cienkich warstw CdTe i SnO_2 dla zastosowań fotowoltaicznych..... 275

Anna MAŁACHOWICZ: Koncepcja rewitalizacji Fary w Gubinie. Próba wykorzystania energii słonecznej w procesie adaptacji zabytkowego kościoła na centrum kultury i komunikacji..... 289

Justyna MAZURKIEWICZ , Anna WACHOWICZ-PYZIK, Marcin KRÓLIKOWSKI: Potencjalne możliwości wykorzystania czwartorzędowych wód podziemnych w instalacjach niskotemperaturowych 297

Martyna MOKRZECKA: Międzynarodowe systemy certyfikacji LEED, BREEAM i DGNB. Wstępna analiza porównawcza poparta studium przypadku 311

Witold NIEMIEC, Feliks STACHOWICZ, Tomasz TRZEPIECIŃSKI, Marcin JURGILEWICZ: Sanitacja obszarów wiejskich poprzez rolnicze wykorzystanie osadów ściekowych 323

Tadeusz NOCH: Układ kogeneracyjny przy współpracy pomp ciepła z kotłownią olejową i siecią ciepłowniczą 335

Katarzyna NOWAK – DZIESZKO, Małgorzata ROJEWSKA – WARCHAŁ, Jacek DĘBOWSKI: Wpływ docieplenia budynku wielkopłytowego na komfort cieplny lokali mieszkalnych 347

Marianna OLENETS, Jerzy Zbigniew PIOTROWSKI, Anatoliy STROY: Metoda określenia emisyjności niektórych materiałów budowlanych 357

Małgorzata PIASKOWSKA-SILARSKA: Wpływ gazu składowiskowego na środowisko i możliwości jego unieszkodliwiania 367

Iwona PIEBIAK: Wytyczne projektowe w architekturze energooszczędnej na przykładzie budynków mieszkalnych jednorodzinnych 375

Łukasz POLUS, Maciej SZUMIGAŁA: Wpływ tarcia na nośność belki aluminiowo-betonowej..... 385

Izabela SKRZYPCZAK, Lidia BUDA-OŻÓG, Marta SŁOWIK: Trwałość jako postulat rozwoju zrównoważonego 393

Izabela SKRZYPCZAK, Wanda KOKOSZKA: Zrównoważone metody oceny zgodności wytrzymałości betonu na ściskanie 403

Krzysztof SORNEK, Mariusz FILIPOWICZ, Krzysztof IZDEBSKI: Badanie wybranych parametrów pracy prototypowego systemu CHP małej skali z kotłem na biomasę 409

Katarzyna STANISZ, Stanisław GUMUŁA: Kształtowanie się współczynnika efektywności pompy ciepła przy współpracy z akumulatorami ciepła o różnej pojemności..... 419

Jadwiga STĘCHŁY: Zabytkowa stolarka drzwiowa w jarosławskich obiektach sakralnych 429

Jarosław STRZAŁKOWSKI, Halina GARBALIŃSKA: Transmitancje cieplne dwuwarstwowych ścian zewnętrznych zróżnicowanych materiałem nośnym 441

Ilona SZEFER: Ekoinstalacje – detal architektoniczno-urbanistyczny jako element systemu ekologicznego w mieście 449

Norbert SZMOLKE: Audytorskie spojrzenie na wentylację szkół 459

Norbert SZMOLKE: Diagnostyka obiektów z wykorzystaniem kamery termowizyjnej 469

Mateusz SZUBEL, Mariusz FILIPOWICZ: Analiza numeryczna pracy urządzeń grzewczych małej mocy zasilanych biomasą 477

Marek SZYMCZAK, Andrzej TOMPOROWSKI: Wysuszony osad ściekowy i biomasa jako paliwo odnawialne 487

Jarosław TATARCZAK, Karolina SIEDLISKA, Robert KOSACKI, Jan M. OLCHOWIK: Analiza wpływu zacienienia krystalicznych modułów PV na efektywność energetyczną farm słonecznych..... 495

Jarosław TATARCZAK, Marta SOKOŁOWSKA, Jan M. OLCHOWIK: Analiza napromieniowania słonecznego Polski na podstawie danych satelitarnych NASA..... 505

Wojciech TERLIKOWSKI: Rola rehabilitacji, modernizacji i adaptacji budynków zabytkowych w procesie rewitalizacji 519

Wojciech TERLIKOWSKI, Kacper WASILEWSKI: Ekspozycja zabytkowych obiektów architektury antycznej na podstawie własnych przykładów 533

Adam TROFIMOWICZ: Analiza pracy systemu podgrzewania płyty boiska sportowego z wykorzystaniem pompy ciepła w trakcie jej eksploatacji..... 545

Bernard TWARÓG, Zbigniew KĘSEK: Floodpolis – powodziowe miasto przyszłości 553

Anna WACHOWICZ-PYZIK, Justyna MAZURKIEWICZ, Marcin KRÓLIKOWSKI: Główne bariery wykorzystania energii geotermalnej w Polsce na przykładzie wybranych ciepłowni 565

Wojciech ZALEWSKI: Zastosowanie zawiesiny lodowej w klimatyzacji 577

Anna ZASTAWNA-RUMIN, Katarzyna NOWAK: Badanie przegrody zawierającej materiał fazowo zmienny poddanej zmiennym warunkom termicznym w komorze klimatycznej 587

Anna ZASTAWNA-RUMIN, Katarzyna NOWAK: Badanie przegrody zawierającej materiał fazowo zmienny w warunkach in situ..... 595

Anna ZASTAWNA-RUMIN, Katarzyna NOWAK: Pomiar właściwości cieplnych materiałów budowlanych przy zastosowaniu różnej aparatury pomiarowej – analiza wyników 603

Agata ZDYB: Wybrane możliwości zastosowania nanostruktur w inżynierii środowiska..... 611

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 9-18

Joanna BIEDROŃSKA[1]

MOŻLIWOŚCI KSZTAŁTOWANIA PRZYLEGAJĄCYCH STRUKTUR SZKLARNIOWYCH I ICH WPŁYW NA GOSPODARKĘ ENERGETYCZNĄ BUDYNKU

Sposób kształtowania struktur szklarniowych w układzie przylegającym reprezentuje koncepcję przegrody energetycznej, wdrażającej wszelkie rozwiązania innowacyjne uwzględniające pasywny system samoregulacji ciepła, ochrony przeciwsłonecznej, naturalnej wymiany powietrza w zależności od stopnia nasłonecznienia a zarazem zorientowania wobec kierunków stron świata. Warunki te determinują charakter przestrzeni szklarniowej dodanej do budynku po stronie nasłonecznionej, scharakteryzowanej, jako pasywny kolektor ciepła lub po stronie o ograniczonej insolacji, jako bufor termiczny. Dodana struktura szklarniowa poddana insolacji warunkuje zyski cieplne z promieniowania słonecznego zimą zmagazynowane w elementach konstrukcyjnych a zamknięta przestrzeń międzypowłokowa pełni rolę bufora cieplnego w tym okresie. Latem poddana jest strategii chłodzenia, polegającej na pozbyciu się nadmiaru ciepła z obiektu wskutek właściwej dystrybucji powietrza wentylowanego i ochronie przeciwsłonecznej. Wydzielona przestrzeń szklarniowa, tworząca obrzeżną strefę budynku przyczynia się do ograniczenia zapotrzebowania na energię i pełni rolę modyfikatora mikroklimatu wnętrza. Przedstawione zostały przylegające struktury szklarniowe w układzie pionowym szklenia oraz arkady słonecznej, na długości nasłonecznionej elewacji, które najpełniej dostosowane są do wykorzystania energii z promieniowania słonecznego. Przykłady zrealizowanych obiektów o określonych wyżej uformowaniach struktur szklarniowych stały się bazą analiz energetycznych w formie schematów, obrazujących zależności między strukturą budynku a gospodarowaniem energią w systemach pasywnego jej pozyskiwania. Artykuł podkreśla korzyści energetyczne płynące z zastosowania dodanych struktur przeszklonych do budynku wynikające z jego uformowania w warunkach klimatu umiarkowanego.

Słowa kluczowe: przegroda energetyczna**,** efekt szklarniowy, zysk energetyczny, przestrzeń buforowa, pasywny system

[1] Joanna Biedrońska, Politechnika Śląska, Katedra Teorii, Projektowania i Historii Architektury, ul. Akademicka 7, 44-100 Gliwice, tel.32/2371685, e-mail: joanna.biedronska@polsl.pl

1. Wstęp

Prototypem współczesnych struktur przeszklonych były ogrody zimowe XIX i XX wieku wykorzystujące efekt szklarniowy do rozważań na temat zjawisk zachodzących we wnętrzu, przy udziale słońca i wiatru, w celu zapewnienia roślinom i użytkownikom właściwego mikroklimatu. Wszelkie niedogodności natury użytkowej pojawiające się w szklarniach w wyniku przegrzania czy niedostatecznej wymiany powietrza miały podkreślić silne związki pomiędzy kształtowaniem struktur szklarniowych a komfortem użytkowania przeszklonego wnętrza. Jeszcze do niedawna szklarnie o światowej renomie i historycznym znaczeniu pochłaniały ogromne ilości paliw naturalnych w celu utrzymania odpowiednich warunków bioklimatycznych we wnętrzach w okresie np. zimy. W obecnych czasach zmuszających nas do energooszczędności, do poszanowania środowiska, konieczne stały się rozwiązania wykorzystujące energię słoneczną, jako źródło energii odnawialnej, gdy bierny sposób pozyskiwania energii ze słońca okazał się godny uwzględnienia. Współczesna wiedza na temat kształtowania architektury bioklimatycznej i – w węższym ujęciu – architektury słonecznej, opartej na gruntownej analizie relacji budynku z otoczeniem, a także zaawansowane rozwiązania w zakresie instalacji i technologii materiałowej dają większe możliwości wznoszenia struktur szklarniowych mających cechy budownictwa zrównoważonego w pełnym tego słowa znaczeniu. Wobec pogłębianej wiedzy, doświadczeń w dziedzinie techniki wytwarzania i rozwoju technologii nadającej przegrodzie szklanej specyficzne właściwości, stworzona została możliwość kontynuacji idei szklanych struktur architektonicznych XX wieku. Realizowane są śmiałe projekty, których celem jest wytyczenie nowych dróg w architekturze, autorstwa światowej sławy architektów: The Great Glasshouse w Walii projektu Normana Fostera, Glasshaus RHS Garden w Wisley projektu architekta Petera van der Toorn Vrijthoff czy też w bardziej odległym miejscu i klimacie Gardens by the Bay w Singapurze wg projektu Wilkinson Eyre Architects. Te spektakularne, wielkoskalowe obiekty architektury bioklimatycznej nazwane zostały ogrodami aktywnymi energetycznie. Sprzyja im rozgłos, nagrody, ale też dowodzą, jakim wartościom podporządkowana zostaje współczesna architektura niezależnie od skali i przeznaczenia budynków zawierających w swej strukturze czy w swym obrysie przeszklone struktury.

2. Pasywny sposób pozyskiwania energii w odniesieniu do struktur szklarniowych

Rozwój technologii oraz wieloletnie doświadczenia w zakresie budowania szklanych struktur, skłoniły architektów do bliższego przyjrzenia się, jaki wpływ posiada ukształtowanie zewnętrznej powłoki szklanej na gospodarkę energetyczną budynku. Zależność ta wpływa na wydajność energetyczną i formę, które determinują charakter architektury, świadczący o niskim zapotrzebo-

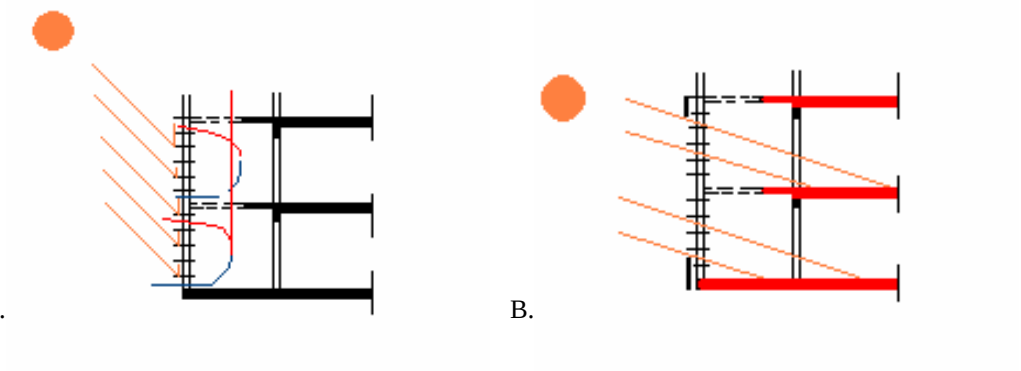
waniu na energię. Obudowa zewnętrzna budynku nie może opierać się tylko na walorach estetycznych jej uformowania, ale przede wszystkim musi odpowiadać parametrom przestrzenno – technicznym zapewniającym zastosowanie zasad racjonalnej gospodarki energetycznej. Powinna być przegrodą reagującą na zmienne warunki otoczenia, w kontrolowany sposób wykorzystująca jego energię, pozwalającą na tworzenie kompleksowych systemów regulacji mikroklimatu wewnątrz budynku. W najprostszy sposób należy wykorzystać zjawiska fizyczne towarzyszące biernemu sposobowi pozyskiwania energii ze słońca i wiatru bez uciekania się do konieczności używania urządzeń zasilanych energią zewnętrzną. Strategie pasywne bazują na rozwiązaniach zmniejszających zapotrzebowanie budynku na energię grzewczą wykorzystując do tego celu słońce w porze zimowej oraz do chłodzenia budynku w porze letniej, gdy wykorzystywany jest ruch powietrza w sposób niewymuszony mechanicznie a odpowiednią ochronę przed przegrzewaniem stanowią regulowane osłony przeciwsłoneczne np. systemy żaluzjowe. W przypadku stosowania rozwiązań pasywnych szczególnie istotny jest dobór odpowiednich materiałów i rozwiązań architektoniczno-budowlanych pozwalających wykorzystać strukturę budynku do pochłaniania, magazynowania oraz rozprowadzania pozyskanej energii promieniowania słonecznego [2]. Przykładem są ściany i stropy, stanowiące konstrukcję budynku, które mogą pełnić funkcję magazynu ciepła a w konfiguracji ze szklaną strukturą tworzą rodzaj pasywnego kolektora ciepła. Aby uzyskać jak największe zyski energetyczne zimą konieczne staje się ukierunkowanie struktur przeszklonych na południe [1].

3. Struktury szklarniowe w układzie przylegającym

Rolę kolektora ciepła najlepiej spełniają szklarnie, które pozostają w konfiguracji przylegającej do budynku, a więc tworzą jego strefę obrzeżną, występując w postaci ogrodów zimowych, przeszklonych pasaży, arkad zewnętrznych, itp. Taka relacja przestrzenna względem budynku sprzyja wyeksponowaniu szklarni na oddziaływanie promieni słonecznych, a zatem wzrasta możliwość wykorzystania energii słonecznej w jej przestrzeni [5]. Najefektywniejszemu wykorzystaniu energii słonecznej i światła dziennego służy wydłużenie bryły budynku na osi wschód-zachód i uzyskanie w ten sposób linearnej elewacji południowej. Ten rodzaj kształtowania struktury budynku reprezentuje przeszklona fasada dwupowłokowa o szerokiej przestrzeni pasmowej.

3.1. Struktura szklarniowa w układzie pionowym szklenia - poddana insolacji

W układzie pionowym szklenia dodana struktura stanowi typowy, szeroko już dzisiaj stosowany w wysokich budynkach biurowych, przykład podwójnej fasady, wentylowanej pomiędzy dwiema warstwami obudowy na całej wysokości budynku.



Rys. 1. Schematy: A - wentylacji naturalnej i ochrony przeciwsłonecznej latem, B -wykorzystania energii promieniowania słonecznego do akumulacji ciepła w elementach konstrukcyjnych zimą

Fig. 1. Charts: A - natural ventilation and sun protection in summer; B - the utilization of sun radiation for accumulation of energy in building construction elements during winter



Rys. 2. Budynek o układzie dostawionej, pionowej strukturze szklanej: A - system żaluzji umieszczony na zewnątrz przeszklonej struktury, Freiburg; B - system żaluzji w przestrzeni międzypowłokowej, Wiedeń. Fot.: J. Biedrońska

Fig. 2. Building with adjacent, vertical glass structure: A – system of blindes placed outside of the glass structure, Freiburg; B - system of blinds placed within the glass structure, Vienna. Photo: J. Biedrońska

W przegrodach spełniających wymogi energetyczne musi następować infiltracja zapewniająca optymalną wymianę powietrza we wnętrzach w sposób pozwalający na ograniczenie strat ciepła i utrzymanie należytych parametrów mikroklimatu w pomieszczeniach. Dodana struktura szklarniowa poddana insolacji warunkuje zyski cieplne z promieniowania słonecznego zimą zmagazynowane w elementach konstrukcyjnych a zamknięta przestrzeń międzypowłokowa pełni rolę bufora cieplnego w tym okresie. Systemy kształtowania przestrzeni międzypowłokowej, ich położenie, wielkość i rodzaj otworów dostosowanych do przepływu powietrza mają różny wymiar w specyfikacji budynków o podwójnej fasadzie. Ich koncepcje polegają na zastosowaniu dwóch zewnętrznych szklanych powłok odsuniętych od siebie w odległości od 25cm do 90cm i większej mogących stanowić przestrzeń użytkową, np drogę ewakuacyjną czy strefę rekreacyjną.

3.2. Struktura szklarniowa w formie arkady słonecznej

Szczególnym przypadkiem rozwiązania przestrzeni dwupowłokowej jest arkada słoneczna, której fasada pochylona jest pod kątem. Uważa się, że inspiracją do zaprojektowania arkady stała się dziewiętnastowieczna architektura ogrodowa. Zastosowana zasada ukształtowania południowej elewacji w formie słonecznej arkady w budynkach administracyjnych Fabryki Ogniw Słonecznych w Gelsenkirchen oraz podobna w swych założeniach projektowych Solar Fabrik we Freiburgu była przytaczaną często literaturowo realizacją w latach 90-tych XX wieku. Szklany system osłonowy nachylony pod kątem 73 stopni dostosowany jest do kierunku padania promieni słonecznych zimą. W okresie tym arkada pełni rolę bufora termicznego stanowiąc skuteczną ochronę przed przemarzaniem w okresie grzewczym i jednocześnie rolę kolektora ciepła, gdy efekt szklarniowy umożliwia pasywne zyski ciepła magazynowane w żelbetowych elementach konstrukcyjnych. W lecie zaś w systemie pasywnym istotną rolę odgrywa ochrona przeciwsłoneczna wykorzystująca elementy skutecznie chroniące przed przegrzaniem oraz przewietrzanie termicznie oddzielonej od budynku przestrzeni przeszklonej. Naturalna wentylacja odbywa się na zasadzie konwekcji uzyskanego z nasłonecznienia ciepła a następnie za pośrednictwem otworów i kanałów cyrkulacyjnych przekazana do wnętrza i wyprowadzona na zewnątrz. Zasysane przez dolne otwory chłodne powietrze dostaje się do środka a następnie ogrzane przez słońce powietrze unosi się do góry i wyprowadzone zostaje na zewnątrz górnymi otworami. Następuje wymiana powietrza oraz naturalny ruch jego mas ku górze bez zewnętrznych urządzeń wymuszających. Dodatkowo innowacyjność obu koncepcji polega na zintegrowaniu pasywnych sposobów wykorzystania energii słonecznej z wprowadzeniem aktywnych systemów w tym wypadku elementów fotowoltaicznych wykorzystujących słońce do produkcji energii elektrycznej na potrzeby obiektu [4].

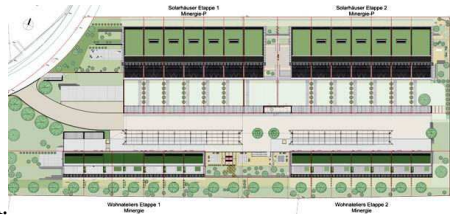
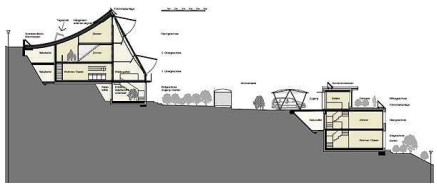


A. B.

Rys. 3. Schematy: A- wentylacji naturalnej i ochrony przeciwsłonecznej latem, B -wykorzystania energii promieniowania słonecznego do akumulacji ciepła w elementach konstrukcyjnych zimą.

Fig. 3. Charts: A - natural ventilation and sun protection in summer; B - the utilization of sun radiation for accumulation of energy in construction elements during winter

Przykładem strategii pasywnego wykorzystania energii w budownictwie jednorodzinnym przy wykorzystaniu pochyłej struktury szklanej jest osiedle szeregowej zabudowy w Riedholz w Szwajcarii (2011) projektu Aarplan Architekten AG (Rys. 4, 5).

A.  B. 

Rys. 4. Osiedle słoneczne Riedholz, Szwajcaria, Aarplan Architekten AG, A - Rzut zabudowy szeregowej; B - Przekrój Osiedla słonecznego źródło: http://www.aarplan.ch/gebaut/siedlungsbau/solarsiedlung-riedholz/ dostęp 26.03.2014

Fig. 4.The Sunny Estate Riedholz, Switzerland, Aarplan Architekten AG, A - plan of buildings; B –Section of Sunny Estate buildings. Source: http://www.aarplan.ch/gebaut/siedlungsbau/solarsiedlung-riedholz/ dostęp 26.03.2014



Rys.5. Widok budynków Osiedla Słonecznego Riedholz

Fig.5. View of Sunny Estate buildings Riedholz. Source: http://www.aarplan.ch/gebaut/siedlungsbau/solarsiedlung-riedholz/ dostęp 26.03.2014



Rys. 6. Widok budynków Osiedla Słonecznego Niederscherli

Fig. 6. View of Sunny Estate buildings Niederscherli. Source: http://www.aarplan.ch/gebaut/siedlungsbau/ dostęp 26.03.2014,

Powstałe „słoneczne osiedla" w Zallikofen (1995), Niederscherli (2004), Innerberg (2006) przedstawiają tę samą zasadę kształtowania przeszklonej arkady, co we Freiburgu i Gelsenkirchen, reprezentują mniejszą skalę i są kontynuacją architektonicznej myśli gospodarowania energią odnawialną w budynku. System ogrzewania wykorzystuje bierny sposób pozyskiwania energii cieplnej ze słońca. Nachylona pod kątem 60 stopni przeszklona fasada ogrodu zimowego skierowana jest na południe. Betonowe ściany i stropy stanowiące strukturę budynku pełnią rolę magazynów ciepła zakumulowanego w ciągu zimowego dnia. W gorącej porze roku do chłodzenia budynku wykorzystane jest zimne nocne powietrze zasysane w północnej części budynku i kanałem przesłane do ogrodu zimowego. W ciągu dnia przy silnym natężeniu promieniowania słonecznego, aby uniknąć przegrzania, szyby są osłaniane tekstylnymi roletami a otwory dolne i górne są otwarte by umożliwić naturalną wentylację. Nazwa Słoneczne Osiedle („Solarsiedlung") wywodzi się z maksymalnego wykorzystania energii słońca zarówno w pasywnym jak i aktywnym systemie. Oprócz południowego ukształtowania strefy przeszklonej arkady pełniącej rolę kolektora ciepła, zastosowano elementy fotowoltaiczne, wykorzystujące energię słońca do produkcji prądu pokrywające zapotrzebowanie w 30% i kolektory słoneczne do ogrzewania wody [3].

3.3. Struktura szklarniowa w układzie pionowym, przylegającym - o nikłym stopniu insolacji

Przylegająca struktura szklarniowa znajdująca się po zacienionej stronie budynku, do której nie dochodzi bezpośrednio promieniowanie słoneczne, stanowi bufor termiczny pomiędzy środowiskiem zewnętrznym a mikroklimatem wnętrza, powodując np. ograniczenie strat nagromadzonego ciepła w okresie zimy.

A.  B. 

Rys. 7. Struktura szklarniowa pełniąca rolę termobuforową: A - ściana północna budynku, Berlin; B - wertykalna obudowa klatki schodowej, Drezno. Fot.: J. Biedrońska

Fig. 7. Greenhouse structure accomplishing the role of thermal buffer zone: A - the northern wall of the building, Berlin; B - the vertical casing of the staircase, Dresden. Photo: J. Biedrońska

W wyniku lokalizacji szklarni na obrzeżu budynku niezależnie od stron świata powstają przestrzenie termobuforowe, kurtyny cieplne, zmniejszające wymagania izolacyjne wewnętrznych fasad. W warunkach klimatu umiarkowanego zamknięcie przeszklonym buforem powoduje wzrost temperatury o min. 5°C.

4. Podsumowanie

W warunkach klimatycznych Polski powinno się uwzględniać i promować projektowanie budynków pozyskujących ciepło słoneczne w pasywnym sposobie pozyskiwania energii. Istnieje silny związek między kształtowaniem przestrzennym budynku a sposobem pasywnego ogrzewania i chłodzenia. W każdym przypadku należałoby przeanalizować koncepcję dodania struktury szklarniowej, ukierunkowanej na słońce, bowiem jej kształt, wielkość, układ przestrzenny mają korzystny wpływ na bilans cieplny budynku, jego racjonalną gospodarkę energetyczną oraz mikroklimat wnętrza. Struktura szklarniowa

w układzie przylegającym, stanowiąca całościową przegrodę, wydaje się być najefektywniejsza poprzez wykorzystanie zjawisk fizycznych przypisanych do pasywnego systemu pozyskiwania energii.

Literatura

[1] Biedrońska J.: Oszklona przestrzeń buforowa w systemie zysków pośrednich, Kierunki rozwoju budownictwa energooszczędnego i wykorzystania odnawialnych źródeł energii na terenie Dolnego Śląska, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013

[2] Chwieduk D.: Energetyka słoneczna budynku, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 2011.

[3] Hugli A.: Solarsiedlung Riedholz- Maximaler Komfort be minimalem Energieverbrauch, Sonne, 2011, s. 6-7.

[4] Marchwiński J., Zielonko-Jung K.: Współczesna architektura proekologiczna, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2012.

[5] Marchwiński J. Aspekt użytkowy przestrzeni szklarniowych w budynkach biurowych i przemysłowych Część 2**,** Świat szkła 3/2005

[6] Zielonko-Jung K., Marchwiński J.: Łączenie zaawansowanych i tradycyjnych technologii w architekturze proekologicznej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2012

AN OPPORTUNITY FOR SHAPING OF THE ADJACENT GREENHOUSE STRUCTURES AND THEIR INFLUENCE ON ENERGY MANAGMENT OF A BUILDING

S u m m a r y

The proposed method of designing and shaping of the greenhouse structures adjacent to a building represents a concept of energy barrier taking advantage of every innovative approach including the passive system of self-regulation of heat, sun protection, and natural air exchange dependent on sun exposure as well as matching the current Earth position. The discussed conditions determined the character of greenhouse space added to the buildings on the sunny side characterized as a passive collector of heat or on the other side with limited insolation as energy barrier. The added greenhouse structure exposed to insolation yields heat gains from sun radiation during the winter and stores the energy in the construction elements while the sealed glazed structures act as thermal barrier. During summer the entire concept is reversed and the heat excess is removed from the building by combination of proper ventilation and sun protection techniques resulting in lowering building temperature. The greenhouse structure, which surrounds a building lowers the demand for energy and acts as modifier of the interior microclimate. The presented adjacent greenhouse structures were introduced with a perpendicular glass arrangement together with the sunny arcade along the space of the sunny elevation, which is the best way for sun radiation energy utilization. The examples of the buildings modified accordingly to the above-presented scenario became the basis for the heat balance analysis in the form of charts showing the relationship between the greenhouse structures and the passive energy systems. The presented paper stresses energy benefits from the use of the added glass glazed structures under the condition of the moderate climate.

Keywords: energy barrier, greenhouse effect, energy benefit, buffer space, passive system

Przesłano do redakcji: 01.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.31

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 19-28

Estera BOŻEK[1]
Mariusz FILIPOWICZ[2]

WYKORZYSTANIE TECHNIKI ŚLEDZENIA PROMIENIA DO MODELOWANIA WYSOKOTEMPERATUROWYCH UKŁADÓW HELIOENERGETYCZNYCH

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki symulacji komputerowych przeprowadzonych w Katedrze Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego na Wydziale Energetyki i Paliw AGH w Krakowie. Wykonane prace dotyczą układu helioenergetycznego koncentrującego promieniowanie słoneczne i składającego się z dwóch elementów skupiających oraz elementu będącego odbiornikiem ciepła wysokotemperaturowego. Ze względu na fakt, iż w układzie powstają dwa różne ogniska skupionych promieni, głównym celem badań było określenie najlepszego umiejscowienia absorbera. Przy wyborze odpowiedniego usytuowania kierowano się ilością absorbowanej przez odbiornik energii świetlnej oraz ograniczoną wytrzymałością materiałową odbiornika - rozkładem natężenia promieniowania na jego powierzchni. Do przeprowadzenia opisanych symulacji wykorzystano zmodyfikowaną metodę śledzenia promieni, która zazwyczaj wykorzystywana jest do tworzenia realistycznych obrazów w grafice komputerowej. W badaniach oparto się na zmodyfikowanej o algorytm Monte Carlo metodzie, gdzie śledzone są wszystkie promienie wychodzące od źródła światła i znajdujące się na scenie optycznej, a nie tylko te, które trafiają do obserwatora jak to ma miejsce w przypadku klasycznego śledzenia promieni. W wyniku przeprowadzonych symulacji wygenerowano mapy i wykresy rozkładu natężenia promieniowania absorbowanego przez powierzchnię odbiornika ciepła. Wykonane analizy pozwoliły wywnioskować, że w przypadku opisanej w artykule instalacji helioenergetycznej najlepszym rozwiązaniem jest umiejscowienie odbiornika ciepła o średnicy 18 cm w odległości 77 cm od powierzchni lustra skupiającego. Otrzymane dane mają posłużyć w kolejnych badaniach jako warunki brzegowe drugiego rzędu w symulacjach komputerowych opartych na technice numerycznej mechaniki płynów CFD.

Słowa kluczowe: śledzenie promieni, koncentrator promieniowania słonecznego, Światło skupione, TracePro, symulacje komputerowe

[1] Autor do korespondencji: Estera Bożek, AGH w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. 0126173428, ebozek@agh.edu.pl
[2] Mariusz Filipowicz, AGH w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

1. Wstęp

Obecnie w Europie i na Świecie prowadzone są działania zmierzające do coraz większego wykorzystania odnawialnych źródeł energii. Jest to spowodowane m.in. Dyrektywami jakie nakłada na kraje członkowskie Unia Europejska, gdzie nakazuje się zmniejszanie zużycia energii, ochronę środowiska, redukcję emisji gazów cieplarnianych a także promowanie i zwiększanie udziału OZE w sektorze energetycznym. Jednakże nie tylko Dyrektywy i inne przepisy prawne przyczyniają się do rozwoju technologii opartych na odnawialnych źródłach, jest to spowodowane również indywidualnym dążeniem użytkowników energii do niezależności energetycznej, zmniejszania rachunków czy też utożsamiania się z ideą zrównoważonego rozwoju energetycznego. Dla małych i średnich obiektów (domy jedno- i wielorodzinne, szkoły, budynki użyteczności publicznej, itp.) energetyka słoneczna jest jedną z najwygodniejszych, najtańszych i najbezpieczniejszych form produkcji ciepła i prądu.

W Katedrze Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego na AGH w Krakowie prowadzone są badania nad możliwościami wykorzystania mikro instalacji opartej na skoncentrowanym promieniowaniu słonecznym. Sprawdzono, że badany typ instalacji może służyć do:

generacji energii mechanicznej poprzez wykorzystanie silnika Stirlinga,
energii elektrycznej przy zastosowaniu ogniw fotowoltaicznych (wyższe wydajności),
transportu wzmocnionego światła w światłowodach.

Planowane są również prace mające na celu wykorzystanie skupionego światła słonecznego do produkcji chłodu, a także przeprowadzenia procesu zgazowania biomasy [1]. Podstawowym problemem w tego typu instalacjach jest jednak odpowiednie zaprojektowanie geometrii układu koncentrującego oraz odbiorników wysokotemperaturowego ciepła, które muszą charakteryzować się wysoką sprawnością. Odpowiednim sposobem na projektowanie i testowanie instalacji w sposób stosunkowo tani i efektywny jest przeprowadzenie symulacji komputerowych. Na Świecie wykorzystuje się różne techniki symulacyjne w celu przeanalizowania propagacji światła w układach optycznych. Na przykład w pracy zaprezentowanej w [2] prowadzone są działania mające na celu zwiększanie efektywności rurowych kolektorów słonecznych. Natomiast w artykule [3] autor analizuje symulację układu świetlno-optycznego gdzie do oceny dokładności stosowanej metody wykorzystuje odbłyśnik. Również w Polsce prowadzone są podobne badania, np. takie jak przeprowadzone na Politechnice Warszawskiej opisane w [4] symulacje figury jasnych punktów, wykorzystywanej głównie do projektowania reflektorów.

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki symulacji układu koncentrującego promieniowanie słoneczne, których głównym celem było wyznaczenie miejsca, w którym powinien znajdować się odbiornik wysokotemperaturowego ciepła o określonych wymiarach, tak aby absorbował on jak największą

ilość promieniowania i jednocześnie aby rozkład natężenia światła był w miarę równomierny.

2. Stanowisko badawcze i metodyka

2.1. Opis rzeczywistego układu koncentrującego

Modelowana instalacja helioenergetyczna znajduje się na dachu budynku Katedry Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego na AGH w Krakowie rys.1. Szkice techniczne opisywanego urządzenia zaprezentowano na rysunku 2.

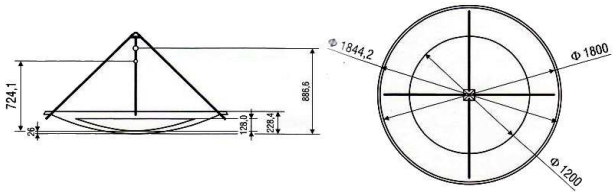


Rys. 1. Koncentrator promieniowania słonecznego na dachu Katedry ZRE na AGH w Krakowie. Widoczne są dwa elementy skupiające światło – lustro i talerz wyklejony folią refleksyjną [1]

Fig. 1. Solar radiation concentrator placed on the roof of Sustainable Energy Department building, AGH in Krakow. Two elements focusing lights are visible – mirror and bowl lined with reflective foil [1]

Instalacja skupiająca światło zbudowana jest z talerza paraboloidalnego o średnicy 1800 mm wyklejonego refleksyjną folią oraz osadzonego na nim lustra o nieco innej geometrii (średnica 1200 mm). Lustro odsunięte jest od czaszy koncentratora o odległość 26 mm co w połączeniu z niewielką różnicą w geometrii obu elementów koncentrujących powoduje powstawanie dwóch ognisk skupionych promieni.

Urządzenie śledzi położenie słońca za pomocą algorytmu astronomicznego, dzięki czemu promienie słoneczne padają na koncentrator pod kątem prostym. Elementami wykonawczymi całej instalacji są dwa siłowniki liniowe obracające czaszą w dwóch płaszczyznach – azymutu i elewacji [1].



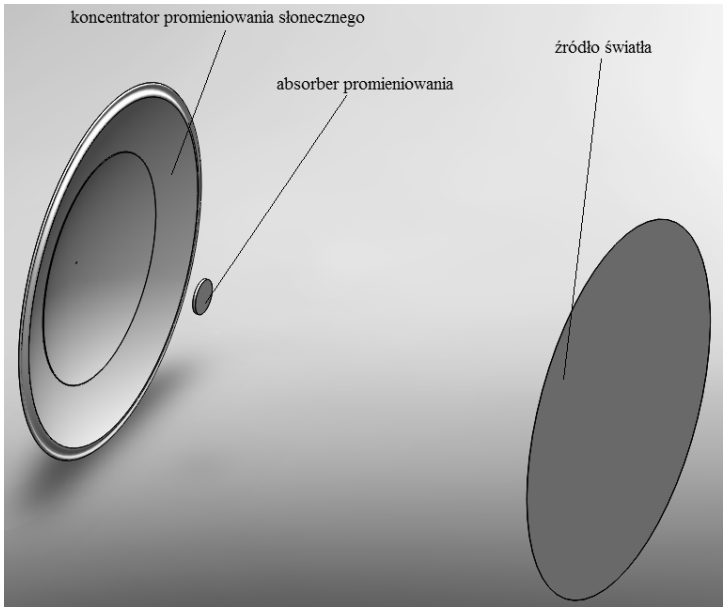
Rys. 2. Rysunki techniczne koncentratora [1]

Fig. 2. Technical drawing of solar concentrator [1]

2.2. Metodyka symulacji komputerowych

Promieniowanie słoneczne jest niewidzialne, co sprawia, że projektowanie układów helioenergetycznych jest dość trudne. Symulacje komputerowe pozwalają przewidzieć drogę promieni. Jeszcze zanim nastąpi rzeczywista realizacja układu możliwe jest wskazanie miejsc gdzie następuje np. niechciane odbicie czy też wyznaczyć intensywność promieniowania w dowolnym miejscu układu, co czasem w trakcie badań rzeczywistego stanowiska badawczego jest niemożliwe.

W celu zbadania opisanego układu optycznego koncentrującego promieniowanie słoneczne wykorzystano oprogramowanie firmy Lambda Research o nazwie TracePro. Jest to narzędzie umożliwiające symulowanie propagacji światła i uwzględnia podstawowe zjawiska optyki takie jak absorpcja, odbicie, załamanie, dyfrakcja, rozpraszanie. Program wykorzystuje zmodyfikowaną technologię Ray Tracing opartą na metodzie Monte Carlo. Śledzenie odbywa się nieco inaczej niż w przypadku standardowego zastosowania metodyki w grafice komputerowej gdzie istotne są jedynie te promienie, które trafiają do oka obserwatora. W TracePro rozpatrywana jest droga wszystkich promieni wyemitowanych przez źródło światła. Zastosowana w algorytmie metoda Monte Carlo powoduje, że promienie emitowane są w sposób losowy z różnych punktów źródła światła.



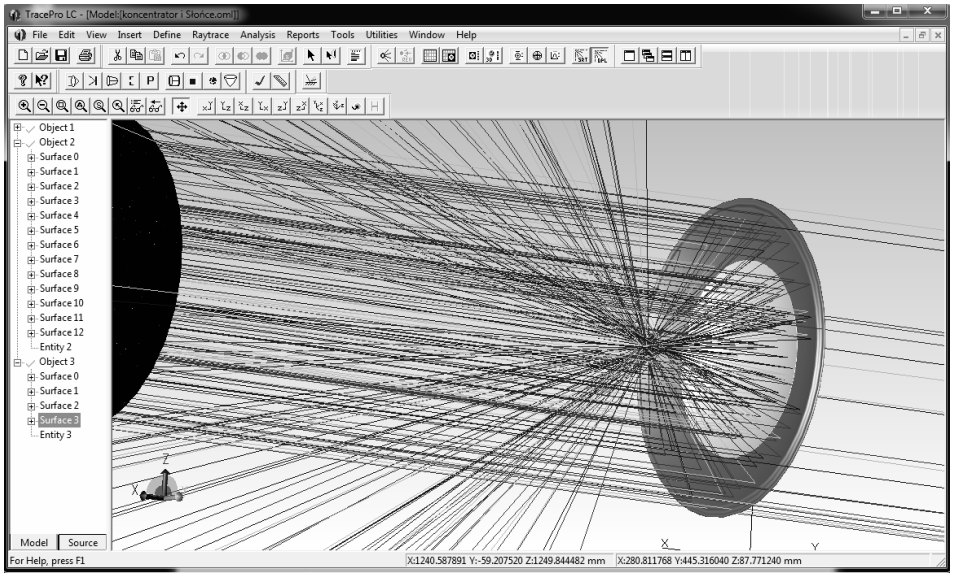
Rys. 3. Widok modelu bryłowego symulowanego układu wykonany w programie SolidWorks

Fig. 3. Solid model of the simulated system made in SolidWorks software

Pierwszym krokiem w pracy z opisanym oprogramowaniem jest zaimportowanie wcześniej przygotowanego modelu bryłowego. Możliwe jest również wykonanie prostych brył bezpośrednio w TracePro. W pracach zaprezentowanych w niniejszym artykule do wykonania projektu posłużono się programem SolidWorks, gdzie wykonane zostały bryły: koncentratora (dwa elementy skupiające), odbiornika ciepła wysokotemperaturowego o średnicy 180 mm (absorber promieniowania) oraz źródła światła – model przedstawiono na rysunku 3.

Zaimportowanym bryłom nadano odpowiednie właściwości materiałowe i powierzchniowe. Jako materiał na czaszę koncentratora oraz odbiornik ciepła wybrano aluminium, natomiast dla lustra wybrany został jeden z rodzajów szkła wykorzystywany w optyce helioenergetycznej. Powierzchnia całego koncentratora określona została jako standardowe lustro o refleksyjności 90%. Element absorbujący scharakteryzowano jako powierzchnię pomalowaną czarną farbą. Dla powierzchni symulującej źródło światła słonecznego wpisano zakres spektralny promieniowania od 0 nm do 1400 nm. W badaniach układu zmieniano położenie odbiornika ciepła i generowano mapy rozkładu natężenia promieniowania na jego powierzchni.

Na rysunku 4 przedstawione jest okno programu TracePro z prześledzoną już drogą promieni. Dla takiego widoku, aby nie zaciemniać całego obrazu wygenerowano zaledwie 300 promieni. Natomiast w przypadku tworzenia map natężenia światła generowanych było 50 000 promieni świetlnych.

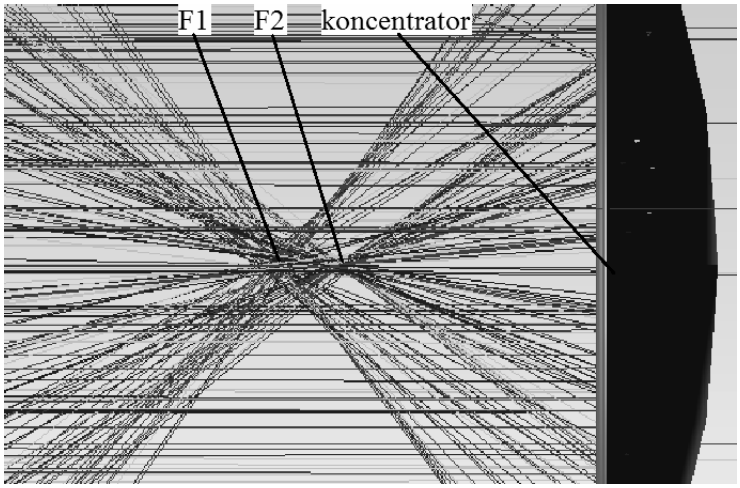


Rys. 4. Wynik symulacji układu koncentrującego – wygenerowane 300 promieni

Fig. 4. Simulation result of the focusing system – generated 300 rays

3. Wyniki symulacji

Pierwszą symulację przeprowadzono bez odbiornika ciepła – na scenie optycznej znajdował się jedynie koncentrator promieniowania słonecznego i źródło światła. W wyniku wykonanych symulacji widać, że pojawiają się dwa ogniska skupienia promieni, jedno od talerza - F1 oraz drugie od lustra - F2 rys.5. Ponadto zauważyć można, że ogniska te są nieco rozmyte co jest spowodowane zjawiskiem aberracji chromatycznej. Zanim promienie zostaną odbite od refleksyjnego srebra w lustrze przechodzą przez warstwę szkła co powoduje pewne przesunięcie wychodzących promieni o różnych długościach fal (różne współczynniki załamania światła dla różnych długości fal z widma promieniowania słonecznego).



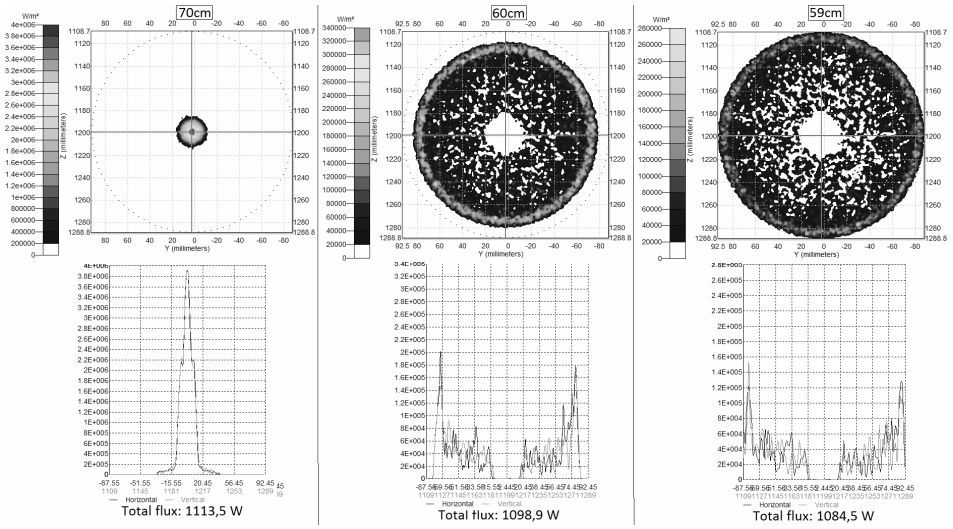
Rys. 5. Wynik symulacji z widocznymi dwoma ogniskami skupienia promieni F1 i F2

Fig. 5. Simulation results – two focal points are visible (F1, F2)

W kolejnym kroku do modelu wprowadzono odbiornik ciepła. Absorber ustawiany był w kilku wybranych miejscach w pobliżu ognisk:

- w ognisku F1 znajdującym się w odległości 70 cm od powierzchni lustra,
- w odległości 60 cm od powierzchni lustra (przed ogniskiem F1),
- w odległości 59 cm od powierzchni lustra (przed ogniskiem F1),
- w odległości 75 cm od powierzchni lustra (między ogniskami),
- w odległości 76 cm od powierzchni lustra (między ogniskami),
- w odległości 77 cm od powierzchni lustra (między ogniskami).

W wyniku symulacji wygenerowano mapy natężenia promieniowania na absorberze oraz wykresy rozkładu tego natężenia w dwóch osiach na powierzchni absorbera (pionowej i poziomej) - rys. 6 i rys. 7.

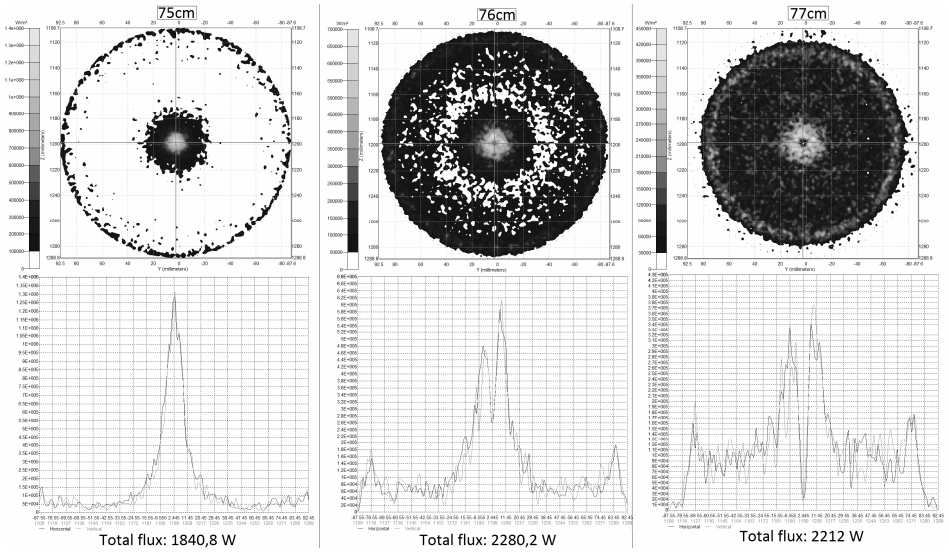


Rys. 6. Mapy i wykresy rozkładu natężenia promieniowania zaabsorbowanego przez odbiornik umieszczony w odległości: 70 cm, 60 cm i 59 cm od powierzchni lustra

Fig. 6. Irradiance maps and graphs of flux absorbed by heat exchanger placed in 70 cm, 60 cm, 59 cm from mirror surface

Maksymalną całkowitą absorpcję natężenia światła w przykładach przedstawionych na rysunku 6 otrzymano w przypadku odbiornika umieszczonego w odległości 70 cm od powierzchni lustra. Jednak ułożenie to nie jest korzystne ze względu na rozkład natężenia – wszystkie promienie skupione są na bardzo małej powierzchni, co ze względu na wytrzymałość materiałową i wymianę ciepła z czynnikiem roboczym stanowiłoby poważny problem. Sprawdzono, że w odległości ok. 59 cm absorber pochłania całe promieniowanie z ogniska F2, przy czym rozkład natężenia w tym przypadku jest znacznie korzystniejszy. Należy mieć jednak na uwadze fakt, że koncentrator nie śledzi położenia słońca w sposób ciągły a w pewnych zadanych odstępach czasowych. Aktualnie, kąty elewacji i azymutu w badanej instalacji mogą być korygowane nie częściej niż co minutę. Dlatego wykonano również symulację układu dla absorbera umiejscowionego w odległości 60 cm od powierzchni lustra. W tym przypadku podobnie jak dla 59 cm natężenie światła jest wysokie, ale powierzchnia absorbera nie jest całkowicie zapełniona – pozostaje pierścień o szerokości ok. 1 cm. Jest to obszar, który może zostać wykorzystany w przypadku, gdy ognisko będzie „uciekało" na skutek chwilowego braku śledzenia położenia Słońca. Jednak w każdym z powyższych przypadków nie wychwycono całkowitego promieniowania odbijanego od powierzchni koncentratora, a jedynie część skupiającą się w ognisku F2. Ponadto, dla odbiornika odsuniętego od koncentratora o 59 cm i 60 cm, widoczne jest, że promieniowanie nie pada na jego środek - powierzchnia ok. 12 cm^2 jest niewykorzystana. Jest to spowodowane cieniem rzucanym przez sam odbiornik ciepła.

Na rysunku 7 zaprezentowano z kolei mapy i rozkład natężenia promieniowania dla absorbera umieszczonego pomiędzy dwoma ogniskami tj. w odległościach 75, 76 i 77 cm od powierzchni lustra.



Rys. 7. Mapy i wykresy rozkładu natężenia promieniowania zaabsorbowanego przez odbiornik umieszczony w odległości: 75 cm, 76 cm i 77 cm od powierzchni lustra

Fig. 7. Irradiance maps and graphs of flux absorbed by heat exchanger placed in 75 cm, 76 cm, 77 cm from mirror surface

W przypadku absorbera odsuniętego od powierzchni lustra o odległość 75 cm pada na niego promieniowanie z ogniska F2 oraz część promieniowania odbitego od czaszy koncentratora. W tym przykładzie zaabsorbowane zostało ok. 40% promieniowania więcej niż w przypadku absorberów umiejscowionych w odległościach 59, 60 i 70 cm od powierzchni lustra. Jednak rozkład natężenia promieni jest podobny jak w przypadku odbiornika odsuniętego na odległość 70 cm tj. prawie całe promieniowanie skupione na powierzchni ok. 12 cm^2. Najlepszy pod kątem zaabsorbowanej ilości promieniowania wynik otrzymano dla absorbera umieszczonego w odległości 76 cm od powierzchni lustra. W takim przypadku do powierzchni odbiornika dociera prawie całe promieniowanie odbite od koncentratora. Aby pojawiło się dodatkowe miejsce dla ogniska, które będzie się nieco przemieszczało na wskutek skokowego trybu śledzenia położenia Słońca, wykonano symulację w której absorber odsunięty jest o 77 cm od powierzchni lustra. W mapie rozkładu natężenia zaabsorbowanego promieniowania widać, że na zewnętrznej części absorbera pozostaje wolny pierścień o szerokości ok. 1cm. Ponadto, miejsce to okazało się być lepszym nie tylko ze względu na pozostawione wolne pole, ale również ze względu na roz-

kład natężenia promieniowania na powierzchni absorbera. W przypadku odbiornika umiejscowionego bliżej talerza tj. w odległości 76 cm występuje bardzo duży pik na środkowej części absorbera o wielkość ok. 778 kW/m^2. Natomiast w przypadku odbiornika odsuniętego od lustra o dodatkowy centymetr (77 cm od powierzchni koncentratora) wielkość ta wynosi 429 kW/m^2, a rozkład natężenia promieniowania na powierzchni odbiornika jest bardziej równomierny. Na podstawie przeprowadzonych symulacji można więc wnioskować, że najkorzystniejszym rozwiązaniem jest umieszczenie odbiornika ciepła wysokotemperaturowego w odległości 77 cm od powierzchni lustra.

4. Wnioski

Ze względów finansowych symulacje komputerowe mają coraz większe znaczenie. Dzięki ich wykorzystaniu możliwe jest nie tylko odpowiednie zaprojektowanie instalacji, ale także znalezienie błędów konstrukcyjnych i zaproponowanie odpowiednich ulepszeń już istniejących układów. Ponadto wykorzystanie techniki śledzenia promieni pozwala na wyznaczenie wielkości, które w rzeczywistym układzie są czasem niemożliwe do zmierzenia.

Przeprowadzone symulacje komputerowe miały na celu przede wszystkim wyznaczenie miejsca, w którym powinien zostać umiejscowiony absorber promieniowania w rzeczywistej instalacji helioenergetycznej. Przy wyborze odpowiedniego usytuowania kierowano się ilością absorbowanego promieniowania oraz rozkładem natężenia światła na powierzchni absorbera, aby był on jak najbardziej równomierny ze względu na wytrzymałość materiału oraz efektywność wymiany ciepła z czynnikiem roboczym.

Otrzymane wyniki posłużą do dalszej pracy w projektowaniu instalacji wykorzystującej skoncentrowane promieniowanie słoneczne. Planowane jest zwłaszcza wykorzystanie tych danych do przeprowadzenia komputerowych symulacji przepływu czynnika wewnątrz odbiornika ciepła. Przedstawione w niniejszym artykule za pomocą wykresów dane posłużą jako warunki brzegowe drugiego rodzaju tj. Neumana, gdzie konieczne jest wprowadzenie rozkładu gęstości strumienia na powierzchni, a temperatura ścianki nie jest znana. Modelowanie to będzie przeprowadzane w oparciu o numeryczną mechanikę płynów tj. CFD (Computational Fluid Dynamics) w programie Ansys. Dopiero wtedy okaże się, który rozkład padającego promieniowania będzie najkorzystniejszy z punktu widzenia przekazu ciepła do medium roboczego.

Praca wykonana w ramach działalności statutowej WEiP, AGH
„Badania uwarunkowań zrównoważonego rozwoju energetycznego”

Literatura

[1] Filipowicz M., Wajss P., Tomski M., Szubel M., Sornek K, Gastoł M., Bożek E.: Wykorzystanie skoncentrowanego promieniowania słonecznego w warunkach polskich, Rynek Instalacyjny 12/2012, s.30-32.

[2] Gerardo Diaz, , Numerical simulations of evacuated – tube solar collectors, Solar Energy: Today and Tomorrow, School of Engineering, University of California, Merced, 2008.

[3] Zajkowski M., Metoda Monte Carlo w obliczeniach odbłyśników obrotowo symetrycznych o odbiciu równomiernie rozproszonym, Przegląd Elektrotechniczny, nr 4, 2003, s. 285-286

[4] Sawicki D., Wybrane problemy symulacji figury jasnych punktów z wykorzystaniem metody śledzenia promieni, Prace naukowe Politechniki Warszawskiej, Elektryka, 2007, s.4-10.

RAY TRACING METHOD IN MODELING HIGH-TEMPERATURE HELIOS ENERGY SYSTEMS

S u m m a r y

This article presents the results of computer simulations performed on the Department of Sustainable Energy in the Faculty of Energy and Fuels in The University of Science and Technology in Krakow. Results concern the Helios energy system that concentrates solar radiation. The installation consist of two focusing elements and the high temperature heat exchanger. Due to the fact that system generates two different focal points, the main purpose of the study was to determine the best location of the absorber. The amount of light energy absorbed by heat exchanger and intensity distribution of radiation on its surface (material strength) was taken into account. Ray tracing method which is usually used to create realistic images in computer graphics was used to simulate the system. The research are based on a modified by Monte Carlo algorithm method. It consists in the fact that all rays coming from the light source and located on the optical scene are traced and not only those that go to the observer (as it is in classical ray tracing). As a result of performed simulation maps and charts of intensity distribution of radiation absorbed by the surface of the heat exchanger were generated. The analyzes allowed to conclude that the best solution for described installation is to place the heat exchanger at a distance of 77cm from mirror surface. Received data will be used in future studies as Neumann boundary conditions in the computer simulations based on the technique of computational fluid dynamics.

Keywords: ray tracing, solar radiation concentrator, concentrated light, TracePro, computer simulations

Przesłano do redakcji: 19.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.32

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 29-38

Dorota A. CHWIEDUK[1]

WYBRANE PRZYKŁADY ZASTOSOWANIA MATERIAŁÓW PCM W BUDOWNICTWIE

Istnieją różne możliwości ograniczenia wpływu oddziaływania środowiska na wnętrze budynku, a w konsekwencji na ograniczenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania lub chłodzenia. Jedną z innowacyjnych metod jest zastosowanie materiałów zmienno-fazowych tzw. PCM (*Phase Change Materials*), zintegrowanych ze strukturą budynku. W referacie zawarto wybrane informacje dotyczące stosowania materiałów zmiennofazowych PCM w budownictwie, a także przedstawiono wyniki własnych analiz. Efektywne zwiększenie pojemności cieplnej budynku, bez zwiększania jego masy, a wręcz zmniejszając ją, można osiągnąć poprzez zastosowanie rozważanych materiałów zmiennofazowych. Materiały PCM stosowane w budownictwie ulegają przemianie fazowej (topnienie-zestalanie) o bardzo dużej entalpii przemiany, zachodzącej w zakresie zmian temperatury w pomieszczeniu. Materiały te są w stanie przejąć duży strumień ciepła nieznacznie tylko zmieniając swoja temperaturę. W referacie przedstawiono podstawowe technologie integracji materiałów zmiennofazowych z materiałami budowlanymi. Na podstawie opracowanego modelu matematycznego procesów cieplnych zachodzących w zewnętrznych przegrodach budowlanych zawierających materiał PCM przeprowadzono obliczenia symulacyjne dynamiki procesów cieplnych zachodzących w takich przegrodach w zmiennych warunkach otoczenia zewnętrznego z uwzględnieniem oddziaływania promieniowania słonecznego. W referacie przedstawiono interpretację graficzną wybranych wyników analiz symulacyjnych zachowania się przykładowej przegrody nieprzezroczystej i przezroczystej obudowy budynku. Na podstawie wyników tej analizy sformułowano wnioski co do celowości stosowania pewnych rozwiązań strukturalno – materiałowych obudowy budynku zawierających materiały PCM w naszych warunkach klimatycznych.

Słowa kluczowe: PCM, przegrody przezroczyste, symulacja komputerowa

1. Wprowadzenie

Wpływ czynników środowiska zewnętrznego, takich jak temperatura powietrza, opady, wiatr, wilgotność i promieniowanie słoneczne na bilans energetyczny budynku zależy od tego gdzie jest on zlokalizowany, jak został zaprojek-

[1] Dorota A. Chwieduk, dr hab. inż., prof. PW; Politechnika Warszawska, MEiL, Instytut Techniki Cieplnej, ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa; dchwied@itc.pw.edu.pl

towany i wykonany. Oddziaływanie środowiska zewnętrznego dotyczy całej obudowy. Zależy od konstrukcji, struktury i materiałów, z których przegroda jest wykonana. Istotne jest także umieszczenie poszczególnych elementów obudowy względem siebie. Przegroda może być pełna o jednej powierzchni zewnętrznej, lub też może składać się z kilku różnych elementów o zróżnicowanych powierzchniach, np. ściana zewnętrzna z oknem, drzwiami, balkonem itp. W konsekwencji przepływ ciepła przez całą przegrodę, jak i jej poszczególne elementy jest zróżnicowany. Znaczenie ma też rodzaj powierzchni zewnętrznej przegrody w odniesieniu do jej parametrów optycznych i cieplnych. Przegroda lub jej powierzchnia może być przezroczysta i charakteryzować się jej właściwą transmisyjnością, absorpcyjnością i refleksyjnością dla promieniowania słonecznego, lub nieprzezroczysta i wtedy jej własności opisuje jedynie absorpcyjność i refleksyjność dla promieniowania słonecznego. Dowolna powierzchnia wykazuje także określone cieplne własności radiacyjne wyrażone jej absorpcyjnością i emisyjnością cieplną. Wskutek oddziaływania środowiska zewnętrznego na budynek może wystąpić mniej lub bardziej znaczące zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania lub na chłód.

Istnieją różne możliwości ograniczenia wpływu oddziaływania środowiska na wnętrze budynku, a w konsekwencji na ograniczenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania lub chłodzenia. Jedną z innowacyjnych metod jest zastosowanie materiałów zmienno-fazowych tzw. PCM (*Phase Change Materials*), zintegrowanych ze strukturą budynku. Zainteresowanie tą nową technologią energetyczno – budowlaną jest ostatnio bardzo duże, i to zarówno od strony prowadzonych prac naukowo- badawczych, jak i gotowych produktów dostępnych na rynku [1], [2], [3].

2. Rola materiałów zmiennofazowych wbudowanych w strukturę budynku

Materiały zmiennofazowe PCM są wykorzystywane do zwiększenia pojemności cieplnej materiałów budowlanych. Ograniczenie przepływu ciepła przez przegrody zewnętrzne jest osiągane zarówno dzięki stosowaniu materiałów o dużej oporności cieplnej, tj. o wysokiej izolacyjności cieplnej, jak i materiałów o dużej pojemności cieplnej. Te drugie powinny być wykorzystywane nie tylko na przegrody zewnętrzne, w szczególności na ich wewnętrzną warstwę, ale także na wewnętrzne. Rolę materiałów magazynujących mogą pełnić materiały PCM, z reguły są to kompozyty materiałów budowlanych, które w swoim składzie zawierają materiały zmiennofazowe. Do rozpowszechnienia stosowanie materiałów PCM w budownictwie przyczyniły się problemy z efektywnym wykorzystaniem energii promieniowania słonecznego. Podstawowym problemem związanym z wykorzystaniem tej energii jest bowiem jej okresowość oraz niekoherentność pomiędzy czasem i wielkością promieniowania słonecznego, a czasem i wielkością obciążeń grzewczych. Dlatego też tak istotne

przy wykorzystaniu energii promieniowania słonecznego jest magazynowanie pozyskanego ciepła zarówno w skali krótko, jak i długoterminowej. Ciepło powstające w wyniku konwersji fototermicznej zachodzącej w elementach obudowy budynku jest w nich magazynowane przez różny okres czasu w zależności od ich pojemności cieplnej. Wykorzystywana jest w tym przypadku zdolność danego materiału do magazynowania ciepła wyznaczona przez jego ciepło właściwe. Ciepło właściwe jest wyrażane w kJ/(kgK) i opisuje ciepło możliwe do zmagazynowania przez 1 kg danego materiału przy różnicy temperatury 1 K. Pojemność cieplną opisuje poza ciepłem właściwym danego ośrodka także gęstość i objętość danego materiału. W krajach wyższych szerokości geograficznych stosuje się masywne przegrody zewnętrzne i często wewnętrzne, dużych rozmiarów i o dużym ciężarze (duża gęstość), w celu zapewnienia dużej pojemności cieplnej.

Efektywne zwiększenie pojemności cieplnej budynku, bez zwiększania jego masy, a wręcz zmniejszając ją, można osiągnąć poprzez zastosowanie rozważanych materiałów zmiennofazowych. Duża pojemność cieplna tych materiałów jest wynikiem ich zdolności do akumulowania dużej ilości ciepła przy względnie stałej temperaturze, przy której pozostają w stanie ciekłym. W skutek przemiany fazowej zestalania do otoczenia oddawane jest ciepło utajone. Materiały PCM stosowane w budownictwie charakteryzują się zdolnością do pochłaniania ciepła, będąc w stanie ciekłym w temperaturze pokojowej. Gdy temperatura w pomieszczeniu spada, np. nocą, zachodzi wspomniana przemiana fazowa zestalania i ciepło jest oddawane do otoczenia, czyli występuje funkcja ogrzewania pomieszczenia. Natomiast w ciągu dnia, gdy temperatura wzrasta na skutek oddziaływania promieniowania słonecznego, zachodzi przemiana topnienia. W czasie przemiany z fazy stałej do ciekłej, fazy topnienia, ciepło jest pobierane z otoczenia, czyli występuje chłodzenie pomieszczenia. Metoda stosowania materiałów PCM do ogrzewania i chłodzenia pomieszczeń została zaproponowana już w latach 70-tych ubiegłego wieku, jednak wyraźny postęp w jej wdrażaniu obserwuje się dopiero w ostatnich latach. Bowiem dopiero niedawno opracowano technologie wytwarzania trwałych elementów budowlanych z materiałami PCM.

Materiały zmiennofazowe są wykorzystywane do pełnienia aktywnych funkcji energetycznych. Powinny one bowiem podlegać cyklicznej przemianie fazowej, pochłaniając ciepło, gdy jest jego nadmiar w pomieszczeniu, i uwalniając ciepło, gdy jest na nie zapotrzebowanie. Przemiany pochłaniania i uwalniania ciepła powinny być wymuszane przez czynniki naturalne. Czynnikami takimi w ciągu dnia jest wspomniane oddziaływanie promieniowania słonecznego i wysoka temperatura, która jest konsekwencją oddziaływania promieniowania słonecznego, ale może także wynikać z dużej mocy wewnętrznych źródeł ciepła, urządzeń elektrycznych, w szczególności komputerów. Wysoka temperatura powoduje topnienie materiału. Z kolei nocą niska temperatura co powoduje zestalenie materiału.

W przypadku materiałów PCM wbudowanych w strukturę budynku, materiały takie mogą być częścią tradycyjnych materiałów budowlanych: betonowych, gipsowych, pustaków, lub tworzyć swoiste zasobniki ciepła w wolnych przestrzeniach struktury budynku. Stosowanie materiałów PCM poprawia bilans cieplny budynku w cyklu całorocznym, dzięki umożliwieniu w ciągu dnia magazynowania energii słonecznej w elementach budynku, takich jak ściany, posadzki i stropy, lub innych specjalnie zaprojektowanych zasobnikach, i oddawaniu zmagazynowanego ciepła do pomieszczeń z przesunięciem fazowym, nocą. Zjawiska te mogą służyć zarówno do ogrzewania, jak i chłodzenia budynków.

3. Analiza przepływu ciepła przez przegrody zewnętrzne z materiałem PCM na podstawie symulacji komputerowej zachodzących zjawisk

Badania dotyczące stosowania materiałów PCM zintegrowanych z obudową budynku prowadzone są od wielu lat w różnych ośrodkach badawczych. W ramach prac prowadzonych przez autorkę badano procesy zachodzące w nieprzezroczystej przegrodzie zewnętrznej z wkomponowanym materiałem PCM [4]. W tym opracowaniu przeprowadzono rozważania dotyczące przegród przezroczystych, co jest rzadko przedmiotem publikowanych prac badawczych.

Rozważane są przegrody przezroczyste zintegrowane z lekkim panelem pojemnościowym z PCM. Obliczenia symulacyjne przeprowadzono dla przegród o różnej strukturze zawierającej materiał zmiennofazowy. Rozważane panele z PCM są dostępne na rynku w postaci płyt o nazwie *Energain* (firmy *Dupont),* który zawiera 60% wosku parafiny. Jego podstawowe parametry termofizyczne przedstawiają się następująco:

- temperatura topnienia 21,7 ^{0}C,
- ciepło przemiany fazowej 70 kJ/kg,
- ciepło właściwe fazy stałej 2,2 kJ/(kgK),
- gęstość 856 kg/m^3,
- przewodność cieplna fazy stałej 0,18 W/(m K),
- przewodność cieplna fazy ciekłej 0,14 W/(m K).

Przeprowadzono obliczenia symulacyjne przepływu ciepła przez przezroczyste elementy obudowy budynku z potencjalnym zastosowaniem elewacyjnych elementów z PCM. Rozważane przezroczyste elewacyjne elementy obudowy stanowią przegrody słoneczne pasywne. Przegrody pasywne będące przedmiotem rozważań są przegrodami tzw. zysków bezpośrednich, czyli promieniowanie słoneczne dociera do wnętrza budynku bezpośrednio jako fala elektromagnetyczna w stopniu zależnym od transmisyjności tej przegrody. Rozważane przegrody są wielowarstwowe. Składają się z przeszkleń i warstw z materiałem PCM, w różnych ich konfiguracjach. Rozważane przegrody jako

pasywne przegrody słoneczne nie mogą zawierać izolacji cieplnej. Powinny być zwrócone w kierunku południowym, ze względu na największe napromieniowywanie słoneczne w skali roku.

Przeprowadzono szereg obliczeń symulacyjnych dla różnych struktur przeszklonej elewacji. Na rysunkach 1-4 zamieszczono wyniki tylko dla wybranych rozwiązań struktur przeszklonej elewacji są to:

1. Przegroda elewacyjna A: szkło zwykłe - 0,006 m; PCM - 0,01 m; szkło zwykłe 0,006 m, łączna grubość =0,022 m;
2. Przegroda elewacyjna B: szkło zwykłe - 0,006 m; powietrze - 0,014 m, szkło niskoemisyjne (powłoka od wewnątrz) 0,006 m; PCM - 0,01 m, łączna grubość =0,036 m.

Wybrane przegrody, ich struktura są czysto hipotetyczne. Przedmiotem analizy jest określenie zasadności stosowania materiałów PCM w przegrodach przezroczystych i podanie ewentualnych wskazań, co do konfiguracji poszczególnych warstw względem siebie. Przegroda A ma trzy warstwy, dwie szklane a w środku PCM (warstwa 2). Druga przegroda B jest grubsza ma łączną grubość 0,036 m i cztery warstwy. Jedną z nich jest warstwa powietrzna (warstwa 2), dwie warstwy szklane mają powłoki niskoemisyjne, a warstwa PCM jest od wewnątrz (warstwa 4). Przegroda ma kontakt z otoczeniem zewnętrznym i wewnętrznym. Przyjęto, że materiał zmienno-fazowy może stanowić dowolną warstwę przegrody, przy czym każda warstwa (przegrody) jest jednorodna i izotropowa. Parametry warstwy z PCM, tj. przewodność cieplna i ciepło właściwe, są zmienne w czasie. Pozostałe warstwy mają parametry termofizyczne stałe w czasie.

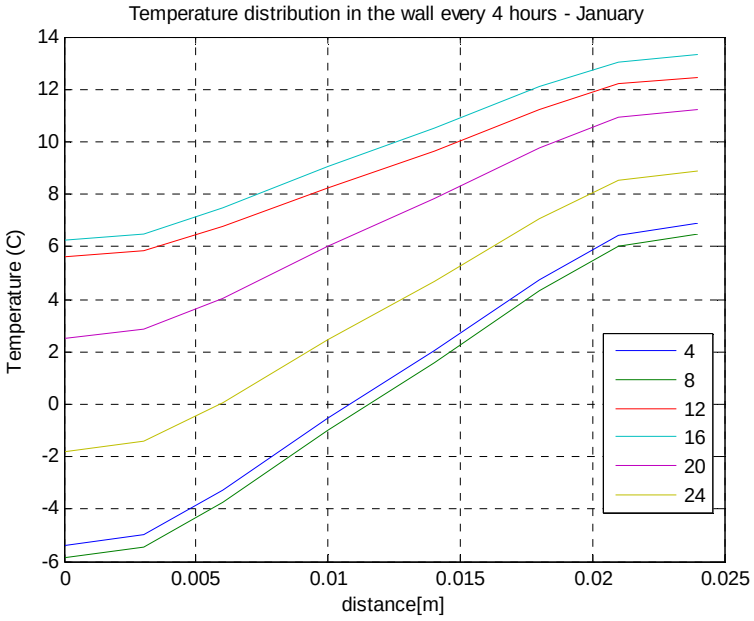
Temperatura przemiany fazowej rozważanego materiału zmiennofazowego *Energain* odpowiada $21{,}7^0$C. Co oznacza, że proces przemiany fazowej może odbywać się w zakresie bliskim tej temperaturze. Przyjęto, że wymagana wewnątrz budynku temperatura powietrza wynosi 22^0C (w celu stworzenia warunków cieplnych – temperaturowych, bliskich temperaturze przemiany fazowej).

Analizy symulacyjne zostały przeprowadzone dla całego uśrednionego roku reprezentowanego przez uśrednione dane godzinowe parametrów otoczenia zewnętrznego (temperaturę powietrza, temperaturę nieboskłonu, promieniowanie słoneczne bezpośrednie i dyfuzyjne) w uśrednionym każdym miesiącu rozpatrywanego roku. W referacie przedstawiono wyniki dla miesiąca stycznia i lipca. Miesiące te reprezentują bowiem dwie skrajne pory roku, zimę i lato, którym odpowiadają odpowiednio zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania i na chłód. Na rysunkach 1 i 2 dla dwóch konfiguracji warstw przegrody przezroczystej o strukturze A, B, dla miesiąca stycznia I i lipca VII przedstawiono wykresy rozkładu temperatury we wnętrzu przegrody i na jej powierzchniach, co 4 godziny począwszy od 4 rano do 24 godziny w nocy.

Część przegrody zewnętrznej zawierająca PCM, lub cała przegroda, jeśli cała zawiera PCM, powinny stanowić swoisty zasobnik ciepła funkcjonujący w zmiennych w czasie warunkach cieplnych. Praca zasobnika zwykle odbywa

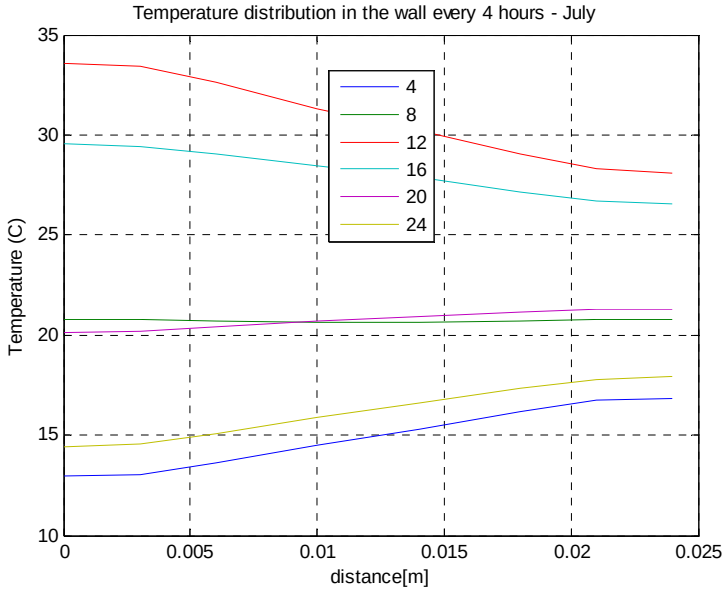
się w dwóch podstawowych cyklach, cyklu ładowania, kiedy w odpowiednich warunkach następuje pobieranie dostępnego ciepła, zgodnie z wielkością pojemności cieplnej materiału (faza ciekła) i cyklu rozładowania, kiedy następuje oddanie wcześniej pozyskanego ciepła (przejście fazy ciekłej do stałej – zestalenie materiału). Niestety w rozpatrywanych przypadkach trudno jest zauważyć takie funkcjonowanie materiału PCM zwłaszcza w warunkach zimowych naszego klimatu.

Model matematyczny zjawisk zachodzących podczas przepływu ciepła przez obudowę budynku został przedstawiony w literaturze[4], [5]. Wymiana ciepła odbywa się pomiędzy otoczeniem wewnętrznym – pomieszczeniem budynku, a środowiskiem zewnętrznym – otoczeniem zewnętrznym budynku. Otoczenie zewnętrzne jest reprezentowane przez obiekty bliskim sąsiedztwie, i w dalszym, tj. pozornym nieboskłonem. Rozważania przepływu ciepła przez przegrodę z materiałem PCM przeprowadza się w odniesieniu do efektywnego ciepła właściwego przemiany fazowej. Na podstawie opracowanego modelu matematycznego sformułowano program numeryczny w środowisku MATLAB symulujący zjawiska zachodzące w różnych przegrodach obudowy budynku z materiałem PCM.



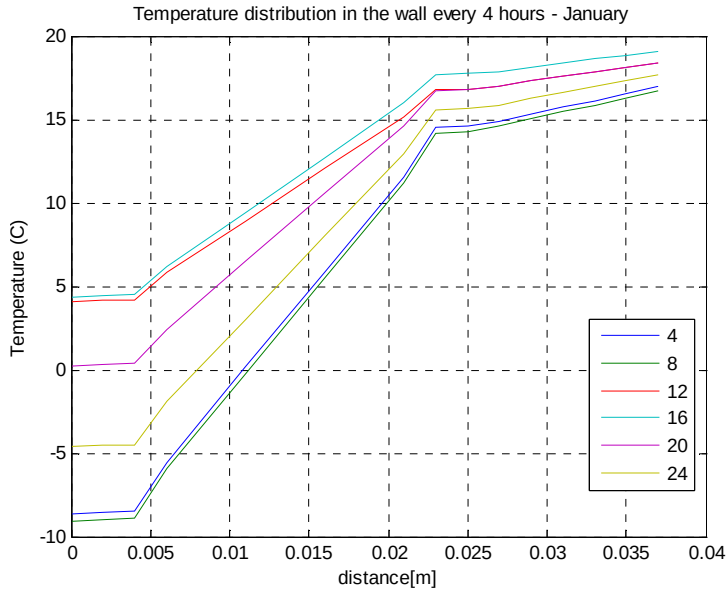
Rys. 1. Rozkład temperatury w przegrodzie A w uśrednionym dniu stycznia co 4 godziny

Fig. 1.Temperature distribution in partition A in average day of January, calculated every 4 hours



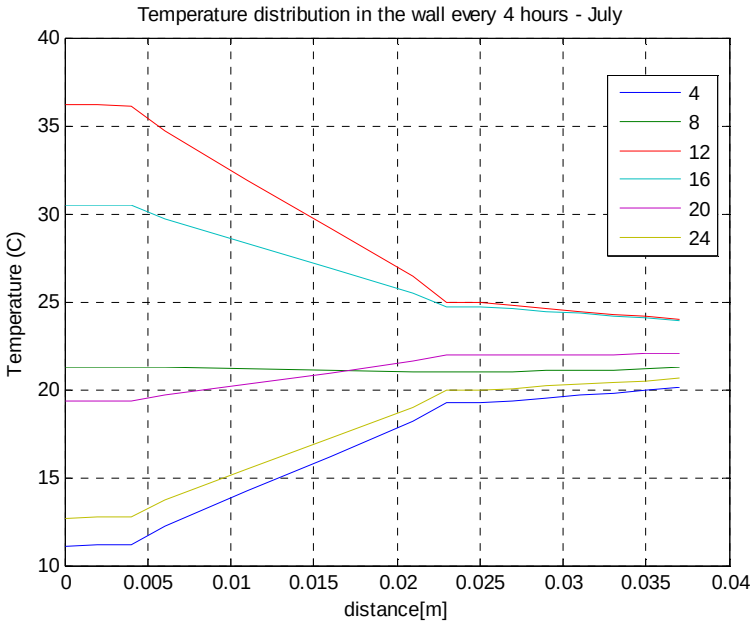
Rys. 2. Rozkład temperatury w przegrodzie A w uśrednionym dniu lipca co 4 godziny

Fig. 2. Temperature distribution in partition A in average day of July, calculated every 4 hours



Rys. 3. Rozkład temperatury w przegrodzie B w uśrednionym dniu stycznia co 4 godziny

Fig. 3. Temperature distribution in partition B in average day of January, calculated every 4 hours



Rys. 4. Rozkład temperatury w przegrodzie B w uśrednionym dniu lipca co 4 godziny

Fig. 4. Temperature distribution in partition B in average day of July, calculated every 4 hours

W przypadku przegrody A zimą nie występują warunki do zaistnienia przemiany fazowej. Temperatury w przezroczystej przegrodzie są znacznie poniżej temperatury przemiany fazowej. Z kolei latem jedynie koło godziny 8 rano istnieją warunki, aby taka przemiana mogła zajść. Jednakże od tego czasu rozpoczyna się intensywne oddziaływanie promieniowania słonecznego, materiał PCM nie jest w stanie złagodzić – ograniczyć przepływ ciepła do wnętrza. Materiał PCM w przegrodzie A ani zimą, ani latem nie spełnia swojej funkcji.

W przypadku przegrody B podobnie jak poprzednio zimą nie występują warunki do zaistnienia przemiany fazowej. Temperatury w przezroczystej przegrodzie są poniżej temperatury przemiany fazowej. Z kolei latem sytuacja jest zdecydowanie lepsza niż w przypadku poprzednim. Można zauważyć, że materiał PCM funkcjonuje zapewniając nocą i rano temperaturę bliską wymaganej. Jednakże w ciągu dnia, gdy rozpoczyna się intensywne oddziaływanie promieniowania słonecznego, materiał PCM ogranicza wzrost temperatury, czyli przepływ ciepła do wnętrza jest zmniejszony. Materiał PCM w przegrodzie B zimą nie spełnia swojej funkcji, ale latem jego oddziaływanie jest już widoczne i wpływa on na poprawę warunków komfortu temperaturowego w budynku i jego poszczególnych pomieszczeniach.

4. Podsumowanie

Analiza wyników symulacji numerycznej dynamiki rozważanych przegród przezroczystych pozwala na wysnucie pewnych wniosków ilościowych i jakościowych. Można wskazać na pewne preferencje, co do struktury przezroczystych przegród zewnętrznych. Należy zaznaczyć, że przeprowadzone rozważania, nie mają charakteru jednoznacznych wytycznych, co do stosowania odpowiednich warstw materiałów zmiennofazowych, nie są też obliczeniami optymalizacyjnymi. Wyniki obliczeń pozwalają sformułować wnioski, co do zalecanych rozwiązań przegród przezroczystych z PCM. Otóż można stwierdzić, że w warunkach krajowych zimą przegrody przezroczyste z materiałem PCM nie spełniają swoich funkcji. Efekt pojemnościowy związany z zaistnieniem przemiany fazowej i wykorzystania ciepła przemiany fazowej nie ma warunków do zaistnienia. Temperatury przegrody są poniżej temperatury przemiany fazowej. Wynika to z braku warstwy izolacyjnej przegrody, Celowe byłoby więc zastosowanie warstwy przezroczystej dla promieniowania słonecznego pełniącej jednocześnie funkcje izolacji cieplnej. Taką warstwę może stanowić izolacja transparentna.

Latem warunki wykorzystania ciepła przemiany fazowej w celu odbioru ciepła z pomieszczenia (zmniejszenia temperatury) mają większe szanse wystąpienia. Co prawda wskazane byłoby stosowanie większej grubości warstwy PCM w celu spełnienia wymaganej funkcji magazynowania ciepła i wpływu na komfort cieplny pomieszczeń budynku. Stosowanie izolacji transparentnej przyczyniłoby się także do intensyfikacji procesów powodujących zaistnienie warunków przemiany fazowej w przegrodzie transparentnej. Można więc stwierdzić, że przegroda przezroczysta w warunkach naszego klimatu powinna też spełniać warunki odpowiedniej izolacyjności cieplnej, co może być osiągnięte dzięki zastosowaniu wspomnianej izolacji transparentnej.

Prace wykonywane były w ramach realizacji projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”; POIG.01.01.02-10-106/09-03.

Literatura

[1] Pérez-Lombard L., Ortiz J., Pout Ch.: A review on buildings energy consumption information, Energy and Buildings. vol. 40, 2008, pp. 394–398.

[2] Zhang Y., Zhou G., Lin K., Zhang Q., Di H.: Application of latent heat thermal energy storage in buildings: State-of-the-art and outlook, Building and Environment. vol. 42, 2007, pp. 2197–2209.

[3] Zalba B., Martyn J.M., Cabeza L.F., Mehling H.: Review on thermal energy storage with phase change: materials, heat transfer analysis and applications, Applied Thermal Engineering: vol. 23, No 25, 2003, pp. 251–283, Applied Thermal Engineering: vol. 23, No 25, 2003, pp. 251–283.

[4] Chwieduk D. Dynamics of external wall structures with a PCM (phase change materials) in high latitude countries. Energy 59 (2013) pp. 301-313.
[5] Chwieduk D. (2011) Energetyka Słoneczna Budynku. Arkady, Warszawa.

SOME EXAMPLES OF UTILISATIONS OF PCM IN BULDING STRUCTURES

S u m m a r y

There are various opportunities to reduce impact of the environment on the interior of the building and consequently, to reduce the demand for energy for heating or cooling. Effective increase of the heat capacity of the building, without increasing its weight or even reducing it, can be achieved through the use of phase change materials. The paper presents the basic technology of phase change material integration with building envelope. Some selected problems of utilization of PCM - Phase Change Materials in transparent elements of building structures are described. Calculations of building dynamics has been performed and heat transfer through transparent partitions has been determined for different structures of these partitions. The paper presents a graphical interpretation of selected results of simulation studies, the behavior of the sample transparent and non-transparent partitions building envelope is shown. Results indicate that because of hard winter conditions transparent walls need thermal insulation. To assure this and keep transparent features of the transparent partitions the transparent insulation can be applied combined with PCM incorporated into glazing.

Keywords: PCM, transparent partitions, simulation studies

Przesłano do redakcji: 12.06.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.33

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 39-48

Anna DUDZIŃSKA[1]

SKUTECZNOŚĆ OSŁON PRZECIWSŁONECZNYCH W KSZTAŁTOWANIU KOMFORTU CIEPLNEGO W PASYWNYM BUDYNKU UŻYTECZNOŚCI PUBLICZNEJ

W artykule przeanalizowano wpływ osłon przeciwsłonecznych na komfort cieplny w pasywnym budynku użyteczności publicznej. Dokonano porównania warunków środowiska wewnętrznego w badanym obiekcie bez zastosowania odpowiednich ochron oraz z uwzględnieniem rolet zacieniających oraz żaluzji wielkogabarytowych. Okres letni oraz jest niezwykle trudny do utrzymania komfortu termicznego w obiektach pasywnych. Wyeksponowanie budynków o dużej powierzchni przeszkleń na działanie promieni słonecznych może mieć bardzo negatywne skutki dla człowieka. Zyski od znajdujących się w budynku źródeł ciepła, w połączeniu z wysoką temperaturą zewnętrzną mogą łatwo doprowadzić do przegrzania i zachwiania równowagi cieplnej organizmu. Zaburzenia procesów termoregulacji, objawiające się między innymi wzrostem temperatury skóry, przyspieszeniem oddechu, rozszerzeniem naczyń krwionośnych, zwiększeniem częstości skurczów serca czy zachwianiem gospodarki wodnej i elektrolitycznej organizmu mogą doprowadzić do osłabienia, nudności i zawrotów głowy. Celem przeprowadzonym analiz jest wskazanie racjonalnego zastosowania osłon w celu zapewnienia korzystnego mikroklimatu wewnątrz. Narzędziem do przeprowadzenia analizy termicznej jest program Design Builder, stanowiący interface do programu symulacyjnego budynków Energy Plus, utworzonego na zlecenie rządu USA. Z przeprowadzonych analiz wynika, iż z uwagi na warunki środowiskowe we wnętrzu hali najkorzystniejsze będzie zastosowanie zarówno zewnętrznych łamaczy światła jak i wewnętrznych rolet. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że osłony po stronie wewnętrznej powinny być opuszczane tylko w momencie dużego nasłonecznienia, przy wysokich temperaturach powietrza zewnętrznego.

Słowa kluczowe: łamacze światła, rolety wewnętrzne, wskaźnik PMV, zyski słoneczne

1 Mgr inż. Anna Dudzińska, Zakład Budownictwa i Fizyki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, Kraków, tel. 12 628-23-84, email: anna.dudzinska27@gmail.com

1. Wstęp

Znacząca potrzeba ograniczenia zysków słonecznych w okresach wysokich temperatur zewnętrznych dla budynków pasywnych skłania do stosowania w nich różnych rozwiązań konstrukcyjnych. Wymagania techniczno-użytkowe dotyczące przegród przeszklonych zostały określone w rozporządzeniu ministra infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [3]. Przegrzewające się latem pomieszczenia stwarzają spore problemy ekonomiczne i eksploatacyjne. Osłony pełnią kluczową funkcję w kształtowaniu korzystnych warunków środowiska wewnętrznego oraz wpływają na energooszczędność budynku.

Systemy osłon przeciwsłonecznych, jako nieodzowny element powierzchni przeszklonych, mają za zadanie kontrolować ilość promieni słonecznych docierających do wnętrza budynku. Regulację ilości światła oraz dostarczanej enregii zapewniają między innymi żaluzje, rolety i łamacze światła, znajdujące sie po wewnętrznej lub zewnętrznej stronie. Miejsce ich montażu, wielkość oraz nachylenie wpływają na skuteczność ochrony przed promieniowaniem [4].

W poddanej analizie hali sportowej na elewacji południowej zastosowano, zamontowane w pozycji poziomej, nieruchome żaluzje wielkogabarytowe, czyli tzw. łamacze światła (rysunek 1).

Aluminiowe przesłony uniemożliwiają przenikanie bezpośredniego promieniowania słonecznego do wnętrza budynku przy wysokim położeniu słońca. Stałe łamacze światła nie dają jednak możliwości dostosowywania warunków oświetlenia do aktualnych potrzeb dlatego zastosowano dodatkowo rolety wewnętrzne. Ten popularny system zabezpieczeń niestety ogranicza dostępność światła naturalnego oraz uniemożliwia kontakt wizualny ze środowiskiem zewnętrznym.



Rys. 1. Łamacze światła na elewacji południowej (archiwum autorki)

Fig. 1. Overhang on south elevation

2. Komfort cieplny

Komfort cieplny jest ważnym elementem pozytywnego odbioru warunków środowiska w danym pomieszczeniu. Definiowany jest on jako stan równowagi pomiędzy ilością ciepła, powstającego w organizmie w czasie przemian metabolicznych, a stratami ciepła oddawanego do środowiska między innymi na drodze promieniowania, konwekcji i przewodzenia [1].

Jednym z podstawowych wskaźników do oceny komfortu termicznego jest PMV (Predictive Mean Vote). Określa on przewidywaną ocenę średnią zgodnie z siedmiostopniową psychofizyczną skalą wrażeń cieplnych Fangera [1].

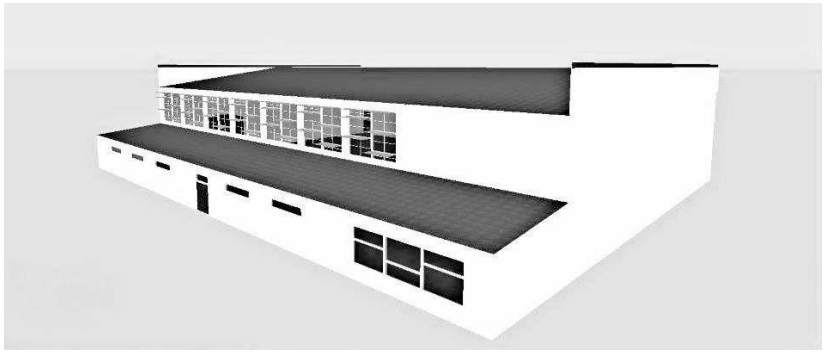
Tabela 1. Siedmiostopniowa skala oceny środowiska umiarkowanego, na podstawie [1]
Table 1. Scale of the medium environment, based on [1]

+3 gorąco		-1 dość chłodno
+2 ciepło	0 obojętnie	-2 chłodno
+1 dość ciepło		-3 zimno

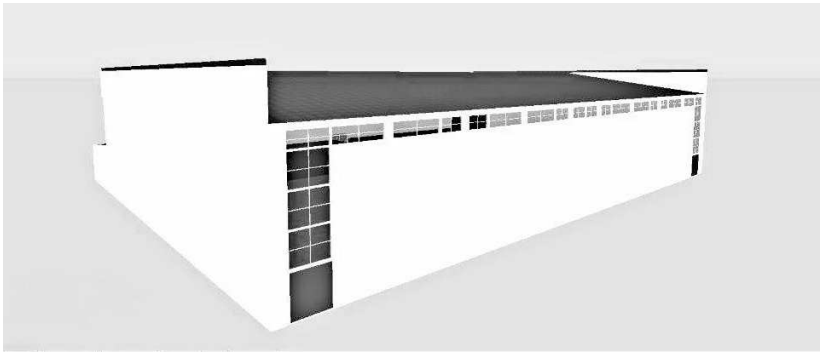
W normie PN-EN ISO 7730:2006 [2] przyjęte są trzy klasy komfortu cieplnego, w zależności od założonego poziomu wymagań. Analizowana hala jest obiektem o wymaganiach średnich, dla których zaleca się, aby wartość PMV znajdowała się w przedziale od –0,5 do +0,5.

3. Założenia przyjęte do modelowania w programie Design Builder

Analizę termiczną przeprowadzono przy pomocy programu Design Builder. Dane geometryczne rozpatrywanego budynku hali starano się dokładnie odwzorować w kwestii kształtu, wymiarów obiektu oraz rozmieszczenia otworów. Model hali w programie Design Builder przedstawiają rysunki 2 i 3.



Rys. 2. Elewacja południowa hali
Fig. 2. South elevation of the sports hall building

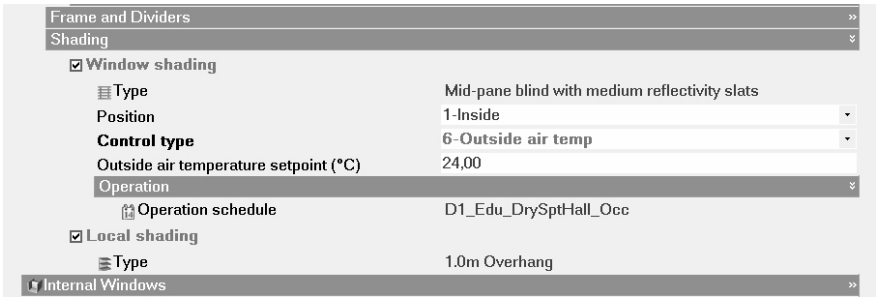


Rys. 3. Elewacja północna hali

Fig. 3. North elevation of the sports hall building

Opracowany model hali umożliwił odwzorowanie zjawisk cieplnych zachodzących w budynku rzeczywistym. W programie uwzględniono charakterystyki przeźroczystych i nieprzeźroczystych przegród budowlanych, infiltrację powietrza zewnętrznego, zyski od wewnętrznych źródeł ciepła oraz instalacje.

Zgodnie z projektem, założono łamacze światła o wysięgu jednego metra. Przyjęto, że rolety wewnętrzne opuszczane są po osiągnięciu temperatury powietrza zewnętrznego równej 24°C.



Rys. 4. Założenia przyjęte w modelowaniu dotyczące rolet wewnętrznych

Fig. 4. Foundations received in modelling

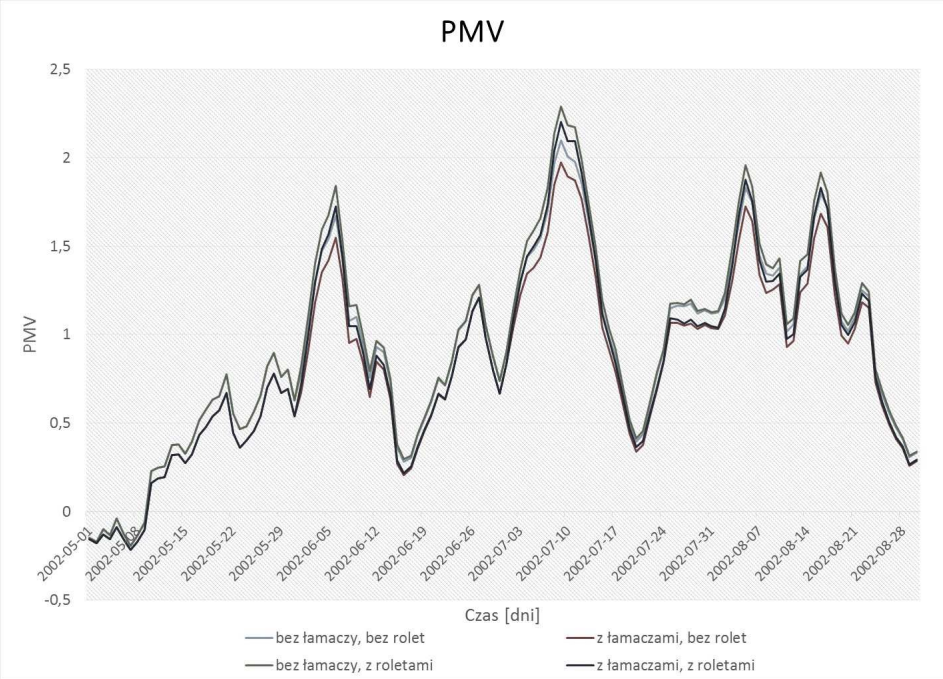
Symulacje przeprowadzono dla okresu od 1 maja do 30 sierpnia, ze względu na występowanie wówczas najwyższych temperatur zewnętrznych. Modyfikacjom poddano elewacje południową i wykonano cztery symulacje dla następujących wersji:

- podstawowa – bez zastosowania łamaczy światła oraz rolet zacieniających,
- z zastosowaniem łamaczy światła, bez rolet zacieniających,
- bez łamaczy światła, z roletami zacieniajacymi,
- z łamaczami swiatła i roletami zacianiającymi.

4. Analiza uzyskanych obliczeń symulacyjnych

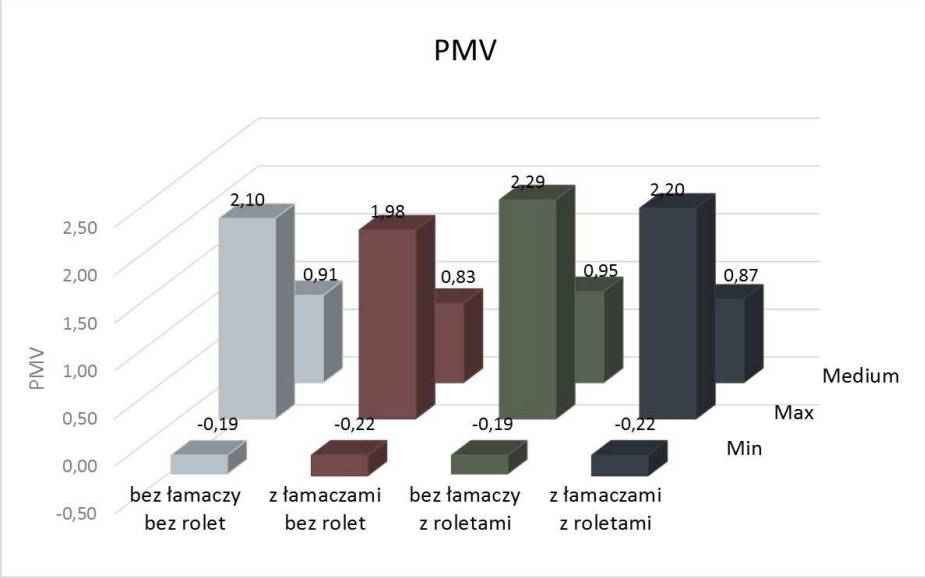
Przeprowadzone badania pozwalają sformułować wnioski, dotyczące skuteczności zastosowanych rozwiązań chroniących budynek przed przegrzewaniem oraz ich wpływu na komfort cieplny w pasywnej hali podczas okresu wysokich temperatur zewnętrznych.

Rozkład wskaźnika PMV dla czteromiesięcznej analizy symulacyjnej przedstawiono na rys. 5, a obliczone wartości wskaźników przewidywanej oceny średniej podano na rys. 6. Biorąc pod uwagę wartość średnią wskaźnika PMV najbardziej korzystne jest zastosowanie łamaczy światła, ale bez rolet wewnętrznych. Wskaźnik przewidywanej oceny średniej wynosi w tym wypadku 0,83 i jest najbliższy przedziałowi komfortu podanemu przez Fangera [1].



Rys. 5. Rozkład wskaźnika PMV dla analizowanych opcji zabezpieczeń przeciwłonecznych

Fig. 5. PMV coefficient for four simulation cases



Rys. 6. Minimalne, maksymalne i średnie wartości wskaźnika PMV dla całego okresu analizy

Fig. 6. Min, max and medium values PMV coefficient for four simulation cases

Najmniej korzystny układ osłon dotyczy sytuacji, w której zastosowano tylko rolety wewnętrzne, bez zewnętrznych łamaczy światła. Średnia wartość wskaźnika PMV wynosi wówczas 0,95, a maksimum wynosi 2,29. Tylko w wariancie drugim, kiedy korzysta się tylko z zewnętrznych osłon, maksymalna wartość PMV nie przekracza wartości progowej wynoszącej 2,0. Nie można mówić wówczas o komforcie cieplnym, a jedynie o obciążeniu termicznym dającym się tolerować lub nie i należałoby sprawdzić wskaźnik WBGT dla tych przypadków.

Tabela 2. Wartości temperatur wewnętrznych dla całego okresu analizy

Table 2. Air temperature values for the whole pariod of the analysis

[°C]	**Bez łamaczy, bez rolet**	**Z łamaczami, bez rolet**	**Bez łamaczy, z roletami**	**Z łamaczami, z roletami**
Min	15,09	15,07	15,09	15,07
Max	26,20	25,68	27,28	26,87
Medium	20,44	20,07	20,64	20,29

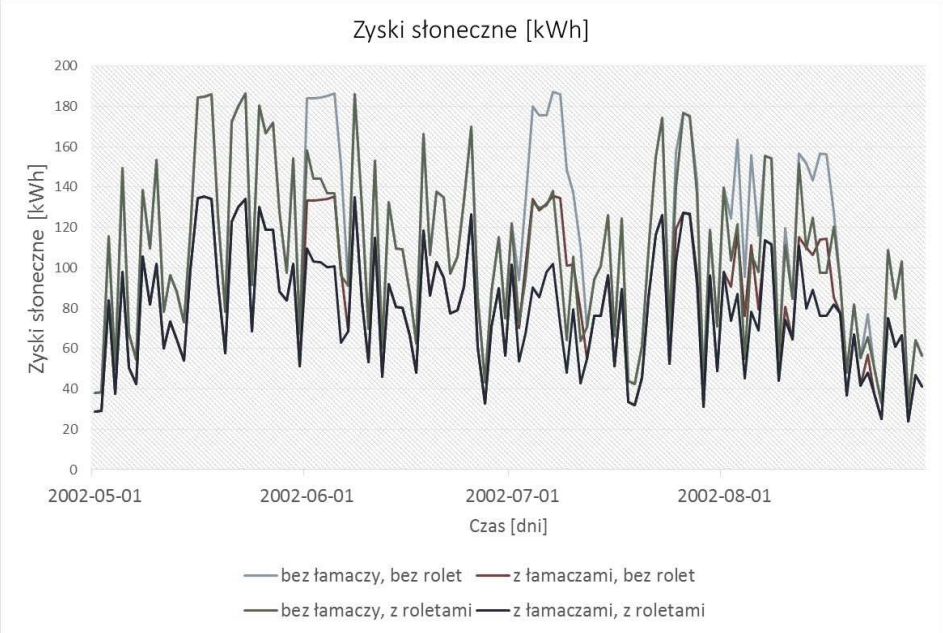
Temperatura powietrza w hali osiąga wartość największą w przypadku zastosowania jedynie osłon wewnętrznych i wynosi 27,28°C. Średnie temperatury również w tym przypadku są najwyższe. Najniższa średnia wartość temperatury wewnątrz wynosi 20,07°C i występuje w momencie kiedy zainstalowane są tylko łamacze światła.

Tabela 3. Wartości wilgotności wewnątrz hali dla całego okresu analizy

Table 3. Humidity values for the whole pariod of the analysis

[%]	Bez łamaczy, bez rolet	Z łamaczami, bez rolet	Bez łamaczy, z roletami	Z łamaczami, z roletami
Min	36,27	37,56	35,43	36,57
Max	78,85	80,26	78,76	80,23
Medium	56,99	58,27	56,33	57,52

Wilgotność we wnętrzu hali kształtuje się w całym okresie średnio na poziomie 57%. Najwyższe jej wartości dochodzą do 80,26% dla przypadku kiedy zastosowano łamacze światła na zewnątrz, bez rolet wewnętrznych.



Rys. 7. Zyski słoneczne dla okresu analizy.

Fig. 7. Solar gains through external windows.

Tabela 4. Średnie zyski energetyczne od promieniowania słonecznego i oświetlenia wewnętrznego

Table 4. Medium solar gains through external windows and general lighting profits for four simulation cases

[kWh]	**Bez łamaczy, bez rolet**	**Z łamaczami, bez rolet**	**Bez łamaczy, z roletami**	**Z łamaczami, z roletami**
Zyski od promieniowania	117,73	108,23	108,23	79,25
Zyski od oświetlenia	31,32	32,28	50,69	52,60
Zyski łącznie	149,04	140,51	158,93	131,86

Budynek, który nie posiada żadnych zabezpieczeń przeciwsłonecznych generuje zyski energetyczne średnio na poziomie 117,73 kWh dziennie w ciągu czteromiesięcznego cyklu badawczego. Najmniejsze wartości niepożądanej w lecie energii słonecznej pozyskiwane są w przypadku zastosowania w obiekcie łamaczy światła oraz rolet wewnętrznych i wynoszą średnio 79,25 kWh.

Biorąc pod uwagę zyski energetyczne związane z potrzebą oświetlenia hali, najwięcej energii, 52,60 kWh, potrzeba w przypadku zastosowania zarówno rolet wewnętrznych jak i łamaczy na zewnątrz.

Rozpatrując łączne zapotrzebowanie od promieniowania i oświetlenia najmniej energii zużywa się w momencie zastosowania łamaczy światła i rolet wewnętrznych. Suma energii wynosi w tym wypadku 131,86 kWh.

5. Wnioski

Okres wysokich temperatur zewnętrznych oraz silnego nasłonecznienia jest niezwykle trudny do utrzymania komfortu cieplnego w obiektach pasywnych. Wyeksponowanie budynków o dużej powierzchni przeszkleń na działanie promieni słonecznych może skutkować przegrzewaniem. Istotne jest zatem racjonalne zastosowanie osłon w celu zapewnienia korzystnego mikroklimatu wewnątrz.

Z przeprowadzonych analiz wynika, iż z uwagi na warunki środowiskowe we wnętrzu hali najkorzystniejsze będzie zastosowanie zewnętrznych łamaczy światła, ale bez wewnętrznych rolet. Średnia wartość wskaźnika PMV dla takiego przypadku jest najniższa i wynosi 0,83. Oznacza to, że warunki klimatyczne są najbliższe komfortowi cieplnemu. Ponadto maksymalna wartość wskaźnika przewidywanej oceny średniej równa się 1,98 i nie przekracza granicznej dla strefy komfortu wartości wynoszącej +/- 2,0. Dla pozostałych trzech wariantów symulacji wartości PMV przekraczały wspomniany próg, poza którym należy stosować metodę oceny obciążenia cieplnego. Służy ona do ustalenia obciążenia termicznego jako dającego się zaakceptować lub tolerować.

Również wartości temperatur wewnątrz budynku są dla drugiego wariantu analizy najniższe, a maksymalna ich wartość wynosi 25,68°C.

Wilgotność we wnętrzu hali wynosi średnio 57%, a jej różnice dla poszczególnych wariantów są niewielkie. Przy założeniu wentylacji mechanicznej, charakterystycznej dla obiektów pasywnych, wartość ta jest satysfakcjonująca dla użytkownika obiektu.

Biorąc pod uwagę nadmierne zyski od promieniowania słonecznego najbardziej skuteczną metodą w ich ograniczeniu jest stosowanie łącznie rolet i łamaczy światła w okresach największego nasłonecznienia. Zyski słoneczne są w takim przypadku o około 30% mniejsze w stosunku do przegród przeszklonych bez zabezpieczeń słonecznych i wynoszą 79,25 kWh dziennie. Należy zwrócić jednak uwagę na to, że więcej energii potrzeba wówczas na oświetlenie hali co wiąże się również z generowaniem dodatkowych zysków cieplnych we wnętrzu. Łączne zapotrzebowanie na energię jest jednak i tak najmniejsze i wynosi w tym wypadku 131,86 kWh, a maksymalna temperatura równa się 26,87°C.

Z punktu widzenia ekonomicznego, rolety wewnętrzne zwiększają o około 70% zapotrzebowanie na oświetlenie, jednak całkowite zyski słoneczne są najniższe gdy łączy sie je z łamaczami. Patrząc pod kątem komfortu termicznego, rolety wewnętrzne nie są pożądane. Dlatego zaleca się ich stosowanie, ale z odpowiednią kontrolą manualną, wyłącznie w okresach największego nasłonecznienia.

Literatura

[1] Fanger P.O., Komfort cieplny, Arkady, Warszawa, 1974.

[2] PN-EN ISO 7730:2006, Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczania wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego.

[3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.

[4] Tymkiewicz J., Systemy osłon przeciwsłonecznych - wady i zalety różnych rozwiązań, Czasopismo Techniczne 2-A/2/2011, Politechnika Krakowska.

THE EFFECTIVENESS OF SUN PROTECTIONS IN THE FORMATION IN THE PASSIVE BUILDING USEFULNES PUBLIC

S u m m a r y

The influence of sun protections was analysed in the article on the thermal comfort in the passive building of public usefulness. The comparisons of the conditions of the internal environment were executed in the studied object without the use of suitable protections and with the regard of roller blinds shading and overhangs. The summer period and he is unusually difficult to maintenance of the thermal comfort in passive objects. Exhibiting buildings about the

large glasses surface on the working of sunny rays can have very negative results for the man. Profits from the being in the building sources of warmth, they can easily bring to overheating and shaking the thermal equilibrium of the organism in the connection with the high external temperature. The indication of the rational use of protections is the aim conducted analyses in the aim of the assurance of the profitable microclimate inside. The programme is the tool to the execution of the thermal analysis the Design Builder, making up interface to the simulating programme of buildings Energy Plus. He results from conducted analyses, that from the attention on environmental conditions in the use the most profitable will be to the interior of the hall both the external breakers of the light how and internal roller blinds. You should however pay the attention to this that byc left only in the moment of the large insolation, near the high temperatures of the external air should protections after the internal side.

Keywords: overhangs, blinds, PMV, solar gains

Przesłano do redakcji: 25.11.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.34

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 49-60

Małgorzata FEDORCZAK-CISAK[1]
Alicja KOWALSKA-KOCZWARA[2]

ANALIZA MOŻLIWOŚCI ZAPEWNIENIA KOMFORTU AKUSTYCZNEGO I WIBRACYJNEGO POMIESZCZEŃ PRZY UŻYCIU MATERIAŁÓW ENERGOOSZCZĘDNYCH

Komfort użytkowania pomieszczeń coraz częściej jest przedmiotem badań naukowych na całym niemalże świecie, a firmy produkujące materiały izolacyjne prześcigają się w ofercie materiałów mających zapewnić komfort w naszych domach. Dzieje się tak ponieważ wzrastają możliwości techniczne stosowania nowych technologii w materiałach budowlanych, ale wzrasta również świadomość samych użytkowników obiektów budowlanych. W niniejszym artykule podjęto próbę analizy możliwości zapewnienia dwóch rodzajów komfortu użytkowania pomieszczeń: komfortu akustycznego i wibracyjnego. Parametry komfortu akustycznego i wibracyjnego pomieszczeń łączy fizyka tych zjawisk, a w kontekście budownictwa wspólnym mianownikiem są przegrody poziome (stropy). Rozpatrywaną w artykule analizę możliwości zapewnienia komfortu akustycznego i wibracyjnego oparto o występujące na rynku polskim produkty izolacyjne. Dokonano przeglądu materiałów izolacyjnych pod kątem możliwości ich wykorzystania do celu zapewnienia komfortu akustycznego i wibracyjnego w pomieszczeniach użytkowych. Podjęto również próbę doboru optymalnego materiału izolacyjnego, który spełniałby obydwa rozważane aspekty komfortu użytkowania pomieszczeń. Temat ten stanowi część większej analizy jakiej podjęły się autorki, mianowicie możliwości zapewnienia komfortu użytkowania pomieszczeń jako całości z uwzględnieniem również komfortu cieplnego, wizualnego czy jakości powietrza wewnętrznego. Część z tych aspektów komfortu użytkowania pomieszczeń uregulowana jest prawnie w Dyrektywach Unijnych, w krajowych aktach prawnych bądź też w normatywach międzynarodowych lub krajowych. W niniejszym artykule zestawiono również główne akty prawne zawierające wymagania w odniesieniu do konieczności zapewnienia komfortu akustycznego i wibracyjnego pomieszczeń.

Słowa kluczowe: materiały izolacyjne, wibroizolacje, drgania, budynki niskoenergetyczne

[1] Autor do korespondencji: Małgorzata Fedorczak-Cisak, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. 696 04 60 50, e-mail: mporanna@wp.pl
[2] Alicja Kowalska-Koczwara, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 25, 31-155 Kraków, tel. (012) 628-21-21, e-mail: alicja.kowalska.koczwara@gmail.com

1. Wymagania akustyczne i wibracyjne w pomieszczeniach użytkowych

Pierwsze zalecenia dotyczące zapewnienia komfortu akustycznego i wibracyjnego można znaleźć w [1]. Dyrektywa [1] stawia 6 podstawowych wymagań w stosunku do właściwości użytkowych budynków. Dotyczą one:

- nośności i stateczności,
- bezpieczeństwa pożarowego,
- higieny zdrowia i środowiska,
- bezpieczeństwa użytkowania, ochrony przed hałasem,
- oszczędności energii i izolacyjności termicznej.

Za dyrektywą [1], ustawa [2] wprowadza zestaw wymagań użytkowych, jakim powinny odpowiadać budynki – w tym ochronę przed hałasem, uzupełniając wymagania akustyczne w zakresie ochrony przed drganiami odbieranymi w sposób bierny przez człowieka znajdującego się w budynku; ochrona przed hałasem mieści się także w zakresie obowiązku ochrony interesów osób trzecich w procesie projektowania, wykonywania i eksploatacji obiektu budowlanego.

Z kolei w [3] zagadnieniu ochrony przed hałasem i drganiami poświęcony jest dział IX, w którym określono zakres i sposób ochrony budynku i jego otoczenia, ze wskazaniem na wymagania akustyczne ujęte w normach technicznych. Istotę wymagań w ochronie przeciwdźwiękowej i przeciwdrganiowej bardzo dobrze oddaje § 325 (zamieszczony jako pierwszy w dziale IX), który brzmi: „Budynek i urządzenia z nim związane powinny być zaprojektowane i wykonane w taki sposób, aby poziom hałasu, na który będą narażeni użytkownicy lub ludzie znajdujący się w ich sąsiedztwie, nie przekraczał poziomu stanowiącego zagrożenie dla ich zdrowia, a także umożliwiał im pracę, odpoczynek i sen w zadowalających warunkach". Sformułowanie to jest bardzo bliskie definicji wymagania podstawowego nr 5 „Ochrona przed hałasem" wg [4]. Aby nadać techniczny sens temu wymaganiu w Rozporządzeniu [3] wyszczególniono szereg zagadnień, które muszą być uwzględnione przy projektowaniu budynku:

- odpowiednia ze względów akustycznych lokalizacja budynków mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej: zalecenie sytuowania w miejscach najmniej narażonych na występowanie hałasów i drgań,
- zmniejszenie zagrożenia budynku hałasem i drganiami – przez zachowanie odległości między źródłami hałasów i drgań a budynkami z pomieszczeniami wymagającymi ochrony przed zewnętrznym hałasem i drganiami, a także stosowanie odpowiednich zabezpieczeń wibroakustycznych w postaci odpowiedniego ukształtowania budynku, stosowania elementów amortyzujących drgania oraz osłaniających i ekranujących przed hałasem, a także racjonalnego rozmieszczenia pomieszczeń w budynku, przy czy stopień ochrony powinien odpowiadać Polskim Normom, określającym dopuszczalne poziomy ha-

łasu w pomieszczeniach oraz określającym zasady oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach,
- odpowiednie właściwości akustyczne przegród wewnętrznych i zewnętrznych w budynku,
- jakość akustyczna stosowanych w budynku urządzeń stanowiących techniczne wyposażenie budynku,
- zabezpieczenia przeciwdźwiękowe i przeciwdrganiowe w instalacjach – ograniczające powstawanie hałasów i drgań oraz rozprzestrzeniania się ich w budynku i przenikania do otoczenia budynku.

Załącznik do rozporządzenia [3] „Wykaz Norm Polskich przywołanych w rozporządzeniu" podaje następujące normy odnoszące się do Działu IX „Ochrona przed hałasem i drganiami":
- PN-87/B-02151.02, „Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach", określa dopuszczalne poziomy hałasu przenikającego do pomieszczeń podlegających ochronie akustycznej,
- PN-B-02151-3:1999, „Izolacyjność akustyczna przegród w budynkach i izolacyjność akustyczna elementów budowlanych. Wymagania", określa minimalne właściwości akustyczne przegród wewnętrznych i zewnętrznych w budynku,
- PN-88/B-02171, „Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach", określa dopuszczalne poziomy drgań przenoszonych na konstrukcję budynku i odbieranych w sposób bierny przez człowieka przebywającego w budynku,
- PN-85/B-02170, „Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłoże na budynki" podaje metody oceny wpływu drgań na budynki wprowadzając metodykę szczegółowej oceny oraz oceny przybliżonej według skal SWD, którym podlegają budynki zwarte do 5 kondygnacji o konstrukcji murowej.

Zestaw zagadnień wymienionych w Rozporządzeniu [3], które powinny być uwzględnione przez projektanta budynku stanowi listę problemów dotyczących ochrony przeciwdźwiękowej i przeciwdrganiowej budynku wraz z ogólnym wskazaniem sposobów ich rozwiązania. Zgodnie z tym zestawieniem powinien być analizowany projekt każdego budynku i oceniane skutki akustyczne przyjętych rozwiązań.

2. Wymagania izolacyjności akustycznej przegród wewnętrznych w budynkach

Wymagania dla budynków w zakresie izolacyjności akustycznej przegród wewnętrznych podane są w normie [5]. Odniesione są one do izolacyjności akustycznej przy uwzględnieniu wszystkich dodatkowych, pośrednich dróg transmisji dźwięku między pomieszczeniami. Wytyczne, o których mowa poniżej są zgodne także z normami [6] i [7].

Izolacyjność akustyczna od dźwięków powietrznych (stosowana przy ocenie izolacyjności akustycznej ścian wewnętrznych i stropów oraz drzwi wejścio-

wych do mieszkań) określana jest za pomocą tzw. wskaźnika oceny przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej R'_{A1}[dB] lub R'_{A2}[dB] . Określenie „przybliżona" wskazuje, że odnosi się ona do właściwości akustycznych przegrody po jej zamontowaniu w budynku. Izolacyjność akustyczna przegród wewnętrznych w budynku nie jest równoznaczna z izolacyjnością akustyczną danego rozwiązania materiałowo-konstrukcyjnego przegrody określoną w warunkach laboratoryjnych. Izolacyjność akustyczna przegrody budowlanej jako wyrobu jest zawsze mniejsza od izolacyjności akustycznej, jaką osiągnie ta przegroda po jej zamontowaniu w budynku. Jest to wynikiem nie tylko jakości wykonawstwa, ale także skutkiem rozprzestrzeniania się dźwięku drogami materiałowymi po konstrukcji budynku, a w szczególności przegrodami bocznymi w stosunku do rozpatrywanej przegrody.

Wskaźnik oceny przybliżonej wyrażony jest głównie w postaci wskaźnika R'_{A1}, który uwzględnia w zasadach oceny widmo hałasu bytowego występującego w budynkach mieszkalnych. W przypadkach szczególnych występowania w pomieszczeniu hałasu niskoczęstotliwościowego stosuje się wskaźnik $R'_{A2.}$[dB]. Obie wielkości R'_{A1} i R'_{A2} są wyznaczane na podstawie charakterystyki R' w funkcji częstotliwości oraz poniższymi wzorami:

$$R'_{A1} = R'w + C \tag{1}$$

gdzie: R'w - ważony wskaźnik przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej [dB],
C- widmowy wskaźnik adaptacyjny dostosowany do płaskiego widma w funkcji częstotliwości charakteryzującego hałas bytowy w budynkach mieszkalnych [dB].

$$R'_{A2} = R'w + C_{tr} \tag{2}$$

gdzie R'w - ważony wskaźnik przybliżonej izolacyjności akustycznej właściwej [dB],
C_{tr} – widmowy wskaźnik adaptacyjny dostosowany do hałasu niskoczęstotliwościowego [dB], np. dyskoteki.

Wskazówki, który wskaźnik R'_{A2} czy R'_{A1} stosować w konkretnej sytuacji wynikającej z zakresu obowiązywania widmowych wskaźników adaptacyjnych C_{tr} i C zestawiono w tablicy 1.

Izolacyjność akustyczna od dźwięków uderzeniowych (stosowana przy ocenie stropów międzykondygnacyjnych przy uwzględnieniu wszystkich kierunków przenoszenia dźwięków w budynku) wyrażana jest za pomocą ważonego wskaźnika przybliżonego znormalizowanego poziomu uderzeniowego L'n,w.

Tablica 1. Wskazówki do stosowania wskaźników R'_{A2} i R'_{A1} przy przyjmowaniu wymagań izolacyjności akustycznej przegród zewnętrznych, na podstawie [6]

Table 1. Guidelines for the use of indicators R'_{A2} and R'_{A1}in the adoption requirements of sound insulation of external walls, based on [6]

Wskaźnik	Rodzaj źródła hałasu zewnętrznego
C [dB]	Komunikacja drogowa w mieście
	Komunikacja lotnicza – przeloty samolotów w dużej odległości od lotniska
	Komunikacja kolejowa – przejazd pociągów z prędkością mniejszą niż 80 km/h
C_{tr} [dB]	Komunikacja drogowa na utostradach i drogach szybkiego ruchu
	Komunikacja lotnicza – przeloty samolotów w małej odległości od lotniska
	Komunikacja kolejowa – przejazd pociągów z prędkością większą niż 80 km/h

Aby przy projektowaniu budynku prawidłowo przyjąć wymaganą izolacyjność akustyczną przegród zewnętrznych powinny być uprzednio określone warunki akustyczne w miejscu lokalizacji budynku. Należy przy tym uwzględnić samoekranowanie poszczególnych elewacji przez bryłę budynku w wyniku czego mogą zaistnieć przypadki, że będą zróżnicowane wymagania akustyczne przegród zewnętrznych przy poszczególnych elewacjach budynku.

W niniejszym artykule podjęto próbę znalezienia części wspólnej komfortu akustycznego i wibracyjnego dlatego też rozważania dotyczące akustyki pomieszczeń odnoszą się wyłącznie do przegród poziomych (stropów). Pełna ocena akustyczna powinna oczywiście też uwzględniać emisję hałasu poprzez przegrody pionowe.

Wymagane wartości wskaźników izolacyjności akustycznej przegród wewnętrznych w budynkach zestawiono w tablicy 2.

Wartości w tabeli podane w zakresach „od do” dotyczą możliwości wystąpienia różnych poziomów hałasu w pomieszczeniu nadawczym w zależności od jego przeznaczenia.

Tablica 2. Wymagane wartości wskaźników izolacyjności akustycznej przegród wewnętrznych w wybranych budynkach mieszkalnych, na podstawie [5]

Table 2. Required values of sound insulation of internal partitions in chosen buildings, based on [5]

Lp.	Przeznaczenie budynku	Rodzaj przegrody wewnętrznej	Wymagania w dB	
			min. R'_{A1} lub R'_{A2}	max. L'n,w
1	Budynki mieszkalne wielorodzinne	Ściana międzymieszkaniowa	50	
2		Strop międzymieszkaniowy	51	58
3		Ściana między mieszkaniem a pomieszczeniem technicznym	55-57	-
4		Strop między mieszkaniem a pomieszczeniem technicznym	55-57	48-58
5		Ściany działowe w obrębie mieszkania	30-35	-
6		Drzwi wejściowe do mieszkań	25	-
7	Budynki jednorodzinne w zabudowie szeregowej	Ściany między budynkami	52-55	-
8		Strop – przenoszenie dźwięków uderzeniowych do obcego budynku	-	53
9	Budynki jednorodzinne wolnostojące	Strop między pomieszczeniami mieszkalnymi	45	63
10		Ściany bez drzwi między pokojami	30	-
11		Ściany między pokojami a pomieszczeniami sanitarnymi	35	-

3. Wymagania dotyczące komfortu wibracyjnego w budynkach

Podstawowym poziomem odniesienia w ocenie wpływu drgań na ludzi jest tzw. próg odczuwalności drgań. Wyniki badań w tym zakresie przyjęto za podstawę sformułowania kryteriów oceny wpływu drgań na ludzi. Jeśli drgania w miejscu ich odbioru przez człowieka są scharakteryzowane wartościami poniżej odpowiadających progowi odczuwalności drgań, to można je uznać za nieodczuwalne przez człowieka.

W badaniach testowych i weryfikujących uzyskuje się również informacje o parametrach charakteryzujących drgania, które jeszcze zapewniają ludziom warunki odpowiedniego komfortu wibracyjnego. Drgania o parametrach większych od opisanych wyżej uznaje się za naruszające warunki niezbędnego komfortu do wykonywania przez człowieka zadań określonych przeznaczeniem pomieszczenia (np. biurowe, mieszkalne, szpitalne itp.).

Na tej podstawie można stwierdzić, że obecnie stosowane są trzy metody i odpowiadające im kryteria oceny, w których stosuje się następujące parametry:

a) wartość przyspieszenia (prędkości) drgań skorygowana w całym paśmie częstotliwości,
b) widmo (strukturę częstotliwościową) wartości skutecznej (RMS) przyspieszenia (prędkości) drgań w pasmach 1/3 oktawowych,
c) dawkę wibracji.

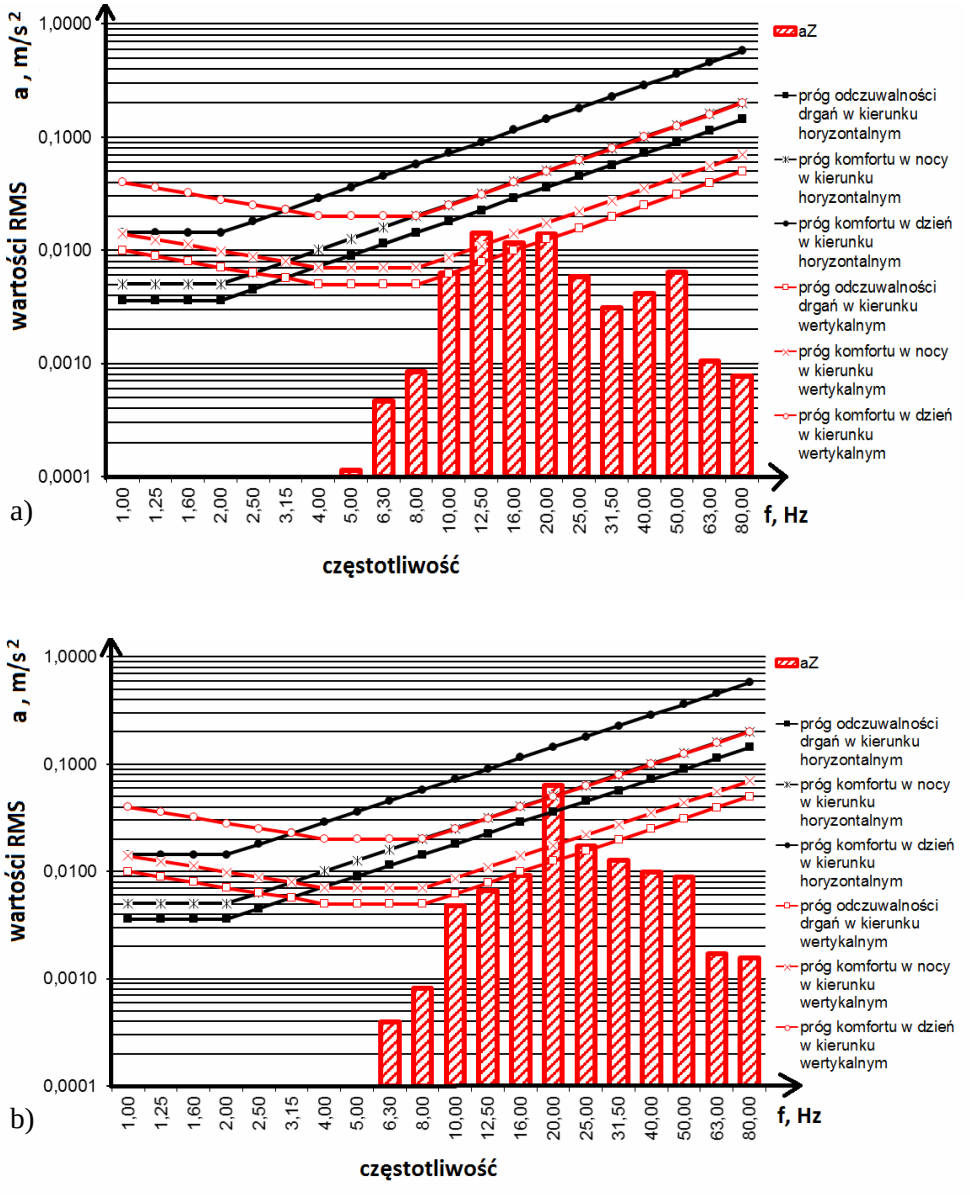
Najczęściej wykorzystywana jest metoda RMS – widmo wartości skutecznej w pasmach 1/3 oktawowych (por. [8]). Dzięki tej metodzie uzyskuje się informacje nie tylko o ewentualnym naruszeniu komfortu wibracyjnego, ale także o paśmie częstotliwości, w którym to naruszenie nastąpiło. W ocenie wpływu drgań na ludzi stosuje się zgodnie z normą [8] dwa poziomy odniesienia: próg odczuwalności drgań oraz próg komfortu drgań. Wartości mieszczące się poniżej progu odczuwalności drgań uznaje się za nieodczuwalne przez człowieka. Drgania mieszczące się pomiędzy progiem odczuwalności drgań a progiem komfortu uznaje się za drgania, które mogą być odczuwalne przez człowieka, przez co mogą u części osób powodować dyskomfort. Natomiast drgania sklasyfikowane powyżej poziomu komfortu drgań uznaje się za drgania, które mogą uniemożliwiać wykonywanie przez człowieka zadań określonych przeznaczeniem pomieszczenia i tego poziomu nie należy przekraczać. Metoda RMS ma jedną wadę, tylko w sposób pośredni uwzględnia czas trwania drgań a właściwie ich krotność. Charakter drgań, pora dnia, w której drgania występują czy przeznaczenie pomieszczenia ujęte są we współczynniku „n". Współczynnik ten przemnożony przez rzędne linii wyznaczającej próg odczuwalności drgań wyznacza położenie progu komfortu wibracyjnego.

Nie tylko jednak czynniki opisane współczynnikiem „n" mogą wpływać na odbiór drgań przez ludzi. Można zauważyć podczas pomiarów in-situ, że także konstrukcja stropu podobnie jak to jest w akustyce może wpływać na tę odczuwalność. W przypadku stropów drewnianych bowiem próg odczuwalności drgań (czy nawet próg komfortu) jest częściej przekraczany niż w przypadku stropów o konstrukcji żelbetowej (por.rys.1).

Zestawione na rys. 1 wykresy RMS zostały sporządzone w oparciu o dane pomiarowe uzyskane na jednym budynku na dwóch różnych rodzajach stropów: a) żelbetowym i b) drewnianym. Dla stropu żelbetowego nastąpiło co prawda przekroczenie komfortu, ale tylko w porze nocnej (linia 1,4 az), podczas gdy dla stropu drewnianego wystąpiło przekroczenie warunków komfortu także w porze dziennej (linia 4 az).

Kryteria oceny wpływu drgań na ludzi, jeśli w ocenie stosowana jest dawka wibracji (normy [9, 10, 11]) są zbliżone co do sposobu ujęcia problemu do wskaźników izolacyjności akustycznej. W ocenie przy pomocy dawki wibracji podobnie jak przy ocenie izolacyjności akustycznej mamy do czynienia z wartościami, których nie powinno się przekraczać. Dawka wibracji wyrażana w $m/s^{1,75}$ uwzględnia wpływ czasu trwania drgań (tzw. czas ekspozycji na drga-

nia) co również jest podobne do ujęcia wpływu hałasu. W tablicy 3 (za [11]) zestawiono te właśnie wartości stanowiące kryterium oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach, przebywających w pomieszczeniach mieszkalnych.



Rys. 1. Analiza RMS dla stropu: a) żelbetowego, b) drewnianego

Fig. 1. RMS analysis for floor made of: a) reinforced concrete, b) wood

Tablica 3. Kryteria oceny wpływu drgań na ludzi w zależności od wartości VDV, za [11]
Table 3. Evaluation criteria of the vibration influence on people depending on the VDV value, by [11]

Przeznaczenie budynku	Małe prawdopodobieństwo skarg VDV [m/s1,75]	Skargi możliwe VDV [m/s1,75]	Skargi prawdopodobne VDV [m/s1,75]
Budynki mieszkalne - dzień	0,2 – 0,4	0,4-0,8	0,8-1,6
Budynki mieszkalne - noc	0,13	0,26	0,51

W normie [10] wprowadzono również trzy poziomy rozgraniczające, które oznaczono: A_u – próg odczuwalności, A_r– średnie warunki komfortu oraz A_o – górna granica zapewnienia niezbędnego komfortu wibracyjnego.

4. Dobór materiału izolacyjnego mogącego spełniać warunki komfortu akustycznego i wibracyjnego

Komforty akustyczny i wibracyjny są pożądane zarówno w pomieszczeniach mieszkalnych, w których jego użytkownicy chcą odpocząć jak i w miejscu pracy. Osoby narażone na ciągłe oddziaływanie zarówno hałasu jak i drgań (te czynniki często się ze sobą łączą np. ruch uliczny) wystawiają się na ryzyko poważnych schorzeń. To mogą być schorzenia słuchu, ale także układu ruchu czy równowagi. Oprócz aspektów fizycznych problem długiej ekspozycji na odziaływanie hałasu czy drgań może prowadzić do licznych zaburzeń psychicznych od lekkich typu przemęczenie poprzez zaburzenia koncentracji do ciężkich stanów lękowych [13]. W miejscu pracy takie oddziaływania skutkują obniżeniem wydajności pracowników. Dlatego przy niemożności usunięcia źródła hałasu czy drgań konieczne jest zastosowanie odpowiednio dobranej izolacji akustycznej i/lub wibroizolacji. Ponieważ jak pisano wyżej te niekorzystne zjawiska często występują razem można pokusić się o dobór izolacji, która spełniałaby warunki zarówno komfortu akustycznego jak i wibracyjnego. I tu pojawia się problem, firmy produkujące materiały izolacyjne oddzielają akustykę od drgań i powodują co najmniej dwa typy rozwiązań dla każdego z tych zjawisk po jednym (np.[12]). Przykład materiałów izolacyjnych do stosowania w przegrodach poziomych (stropach) podano na rys. 2.

Z zestawienia pokazanego na rys. 2 widać, że producenci materiałów izolacyjnych ograniczają komfort wibracyjny tylko do obiektów przemysłowych i pojazdów mechanicznych zaniedbując obiekty mieszkalne. W związku z powyższym autorki niniejszej pracy podjęły trud znalezienia materiału, który przy swoich właściwościach akustycznych będzie także spełniał warunki komfortu wibracyjnego. Podjęty temat będzie zawierał analizę występujących na rynku produktów, analizę numeryczną oraz badania in-situ przeprowadzone na obiekcie w skali naturalnej. Wyniki prac zarówno symulacji jak i prac doświadczalnych zostaną zaprezentowane w kolejnych publikacjach.

		IZOLATORY DŹWIĘKU						ABSORBERY DŹWIĘKU						WIBRO-IZO-LACJE	SYSTEM	
SEKTOR	ZASTOSOWANIE	K-FLEX K-FONIK ST GK	K-FLEX K-FONIK GK -GV*	K-FLEX K-FONIK PB	K-FLEX ST**	K-FLEX ECO/GV*	K-FLEX K-FONIK ST PB	K-FLEX K-FONIK 120	K-FLEX K-FONIK 240	K-FLEX K-FONIK B	K-FLEX K-FONIK P	K-FLEX K-FONIK PU	K-FLEX K-FONIK FIBER P	K-FLEX K-FONIK GK - GV*	K-FLEX K-FONIK ST GK 072 - S	K-FLEX INDUSTRIAL
BUDYNKI	Ściany szkieletowe, ściany działowe, podłogi i sufity, instalacje sanitarne i odwodnienia, dylatacje	•	•	•	•		•	•		•	•	•	•		•	
HVAC	Kanały wentylacyjne, wentylatory i sprężarki, skrzynki rozprężne, obudowy akustyczne	•	•					•		•	•	•		•		
PRZEMYSŁ, ROPA I GAZ	Rury, armatura i urządzenia przemysłowe, pompy		•						•					•		•
O.E.M.	Osłony maszyn, silników i sprężarek oraz sprzęt AGD, pompy ciepła, obudowy i ekrany akustyczne	•	•	•				•	•	•	•	•	•	•		
POCIĄGI I STOCZNIE	Korpusy, ramy, ściany działowe instalacje techniczne, komory maszyn i urządzeń elektrycznych		•			•							•	•		
POJAZDY	Komory silników, ściany, podłogi i ramy, kabiny kierowców i operatorów, instalacje wentylacyjne i klimatyzacyjne, dylatacje	•	•										•	•		

* K-FLEX K-FONIK GV specjalna wiskoelastyczna masa posiadające certyfikaty dopuszczające do stosowania w kolejnictwie i budowie statków.
** K-FLEX ST doskonałe uzupełnienie izolacji dźwiękowej K-FONIK GK. Doskonały izolator cieplny.

Rys. 2. Możliwości zastosowania materiałów firmy K-flex, za [12]

Fig. 2. Possibilities of application materials K-flex, by [12]

5. Wnioski i kierunki prac

Projektowanie budynków energooszczędnych czy niemal zero energetycznych, jest dla projektantów wyzwaniem nie tylko pod kątem zapewnienia odpowiedniej ochrony cieplnej, ale również komfortu użytkowania obiektów na wysokim poziomie. Oprócz niskiego zużycia energii, budynki energooszczędne muszą być również przyjazne dla użytkowników. Na odczucia komfortu wpływają odczucia użytkowników związane między innymi z odbieraniem dźwięków oraz odczuwalnością drgań. Są to ważne aspekty wpływające także na zdrowie człowieka. Wybór materiałów konstrukcyjno-budowlanych na etapie projektowania budynku może zminimalizować wszelkie zagrożenia związane z przekroczeniem komfortu użytkowania budynku. Autorki zasygnalizowały potrzebę wprowadzenia przez producentów materiałów budowalnych na rynek, produktów spełniających wymagania komfortu równolegle w różnych aspektach, np. zapewniających ochronę izolacyjności akustycznej, cieplnej oraz tłumiącej drgania zewnętrzne. Nieodzownym elementem „dobrych praktyk" projektowania budynków energooszczędnych jest zwiększenie świadomości projektantów przy wyborze odpowiednich materiałów. W kolejnych pracach zasygnalizowanego w artykule tematu, Autorki zamierzają przeprowadzić szereg doświadczeń mających na celu stworzenie bazy materiałów budowlanych

„przyjaznych" człowiekowi pod względem zapewnienia wieloaspektowego komfortu użytkowania budynku. Prace badawcze będą wykonywane w ramach Małopolskiego Centrum Budownictwa Energooszczędnego, które jest nowo powstałą jednostką Politechniki Krakowskiej i stanowi platformę współpracy naukowców i przedstawicieli gospodarki. Wyniki prac będą upowszechniane i będą stanowiły zbiór informacji na temat parametrów materiałów budowlanych zapewniających warunki komfortu w budynkach energooszczędnych.

Literatura

[1] Dyrektywa UE nr 89/106/EEC w sprawie zbliżenia przepisów prawnych i administracyjnych państw członkowskich dotyczących wyrobów budowlanych.

[2] Dz.U. 1994 Nr 89 poz. 414 Ustawa z dnia 7 lipca 1994. Prawo Budowlane.

[3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12.04.2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.

[4] Dyrektywa 9/1006 EEC.

[5] PN-B-02151-3:1999 Akustyka budowlana– Ochrona przed hałasem z budynkach – Izolacyjność akustyczna przegród w budynkach oraz izolacyjność akustyczna elementów budowlanych - Wymagania.

[6] PN-EN ISO 717-1:1999 Akustyka – Ocena izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Izolacyjność od dźwięków powietrznych.

[7] PN-EN ISO 717-2:1999 Akustyka – Ocena izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych – Izolacyjność od dźwięków uderzeniowych.

[8] PN-B-02170, 1988, Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach, norma polska

[9] BS 6472-1:2008, Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings, Part 1: Vibration sources other than blasting, 2008, British Standard.

[10] DIN 4150-2, Structural vibration, Part 2: Human exposure vibration in buildings, 1999, German Standard.

[11] ISO 10137 Bases for design of structures – Serviceability of buildings and walkways against vibration, 2007, International Organization for Standardization.

[12] http://www.kflex.com/index.php?lang=en. [dostęp: 31.05.2014].

[13] Uhryński A.: Badania wpływu drgań ogólnych niskiej częstotliwości na wybrane parametry funkcjonalne organizmu człowieka. Rozpraw doktorska, Kraków 2010.

ANALYSIS OF POSSIBILITY TO PROVIDE ACOUSTIC AND VIBRATIONAL ROOMS COMFORT USING ENERGY SAVING MATERIALS

S u m m a r y

Rooms comfort is increasingly the subject of research on almost entire scientific world, and companies producing insulation materials compete in the offer of materials that may provide

comfort in our homes. This happens because technical possibilities of the use of new technologies in materials construction are increasing, but also increases awareness of building users. This article attempts to analyze the ability to provide two types of rooms comfort: acoustic and vibrational comfort. The parameters of acoustic and vibrational comfort of rooms combined the physics of this phenomena and in the context of building a common denominator are horizontal partitions (floors). The considered, in the article, analysis of possibilities to provide acoustic and vibrational comfort is based on present on the Polish market insulation products. A review of insulation materials in terms of their possible use to ensure acoustic and vibrational comfort in the utility rooms is being made. Attempt of the selection of the optimal insulation material which fulfills both consider aspects of the comfort rooms was also made. This subject is a part of a larger analysis which authors took into consideration, namely the ability to provide rooms comfort as a whole, and also taking into account the thermal, visual comfort or indoor air quality. Some of this aspects of the rooms comfort are regulated by law for EU Directives, in national legislation or international and national standards. This article summarizes the main regulations containing requirements for the need to ensure sound and vibrational rooms comfort.

Keywords: insulation materials, vibrational insulation, acoustic comfort, low energy buildings

Przesłano do redakcji: 14.11.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.35

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 61-70

Stanisław FIC[1]
Przemysław BRZYSKI[2]
Andrzej SZEWCZAK[3]
Monika JAROSZ-HADAM[4]

WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI LEKKICH KOMPOZYTÓW NA BAZIE WYPEŁNIACZY CELULOZOWYCH DO ZASTOSOWANIA W BUDOWNICTWIE EKOLOGICZNYM

Dynamiczny rozwój współczesnej technologii materiałowej w budownictwie energooszczędnym oparty jest na poszukiwaniu rozwiązań ekologicznych pozwalających na ograniczenie kosztów produkcji i wbudowania na miejscu budowy, a w konsekwencji na wykonywaniu obiektów przyjaznych dla środowiska. Istotne znaczenie, oprócz kosztów, ma tutaj także dostępność, łatwość zastosowania, skuteczność oraz opcjonalne dalsze kierunki rozwoju danego rozwiązania. Dzięki temu coraz szersze zastosowanie znajdują materiały pochodzenia naturalnego oraz materiały będące odpadami procesów przemysłowych lub recyklingu. W przypadku budownictwa energooszczędnego jednym z kryteriów poddanych badaniom jest możliwość uzyskania materiałów budowlanych o niskim współczynniku przewodzenia ciepła charakteryzujące się jednocześnie odpowiednią wytrzymałością. Poniższe opracowanie opisuje doświadczalną próbę wykonania kompozytu na bazie wapna, cementu portlandzkiego, pucolan, kruszywa lekkiego, słomy i włókna lnianego i łodygi konopnej. W pierwszej części przedstawione zostały receptury wykorzystane do wykonania próbnych zarobów spoiw. Na podstawie uzyskanych wyników badań średniej wytrzymałości spoiw na ściskanie określono przydatność poszczególnych spoiw do wykonania kompozytu. W drugiej części przedstawiono efekt wykorzystania spoiwa o najlepszych parametrach wytrzymałościowych do wykonania dwóch kompozytów w oparciu o dodatek kruszywa lekkiego oraz lnu (pociętej słomy i włókna) i konopi (pocięty rdzeń). Porównano także otrzymane wyniki właściwości mechanicznych (spoiw i kompozytów) oraz cieplnych – współczynnik przewodzenia ciepła uzyskanych kompozytów W opra-

[1] Autor do korespondencji: Stanisław Fic, Politechnika Lubelska, 20-618 Lublin, telefon: 81 5384443, e-mail: s.fic@pollub.pl
[2] Przemysław Brzyski, Politechnika Lubelska, 20-618 Lublin, telefon: 81 5384448, e-mail: p.brzyski@pollub.pl
[3] Andrzej Szewczak, Politechnika Lubelska, 20-618 Lublin, telefon: 81 5384762, e-mail: a.szewczak@pollub.pl
[4] Monika Jarosz-Hadam, Państwowa Szkoła Wyższa im. Jana Pawła II, 21-500 Biała Podlaska, e-mail: m.jarosz-hadam@dydaktyka.pswbp.pl

cowaniu zawarto także wnioski z badań oraz określono możliwe dalsze kierunki rozwoju zaproponowanych rozwiązań w oparciu o nowe doświadczenia.

Słowa kluczowe: len, konopia, wapno, materiały budowlane, spoiwo

1. Wstęp

Ekologiczne materiały budowlane są coraz powszechniej stosowane w budownictwie energooszczędnym. Zaostrzające się regulacje prawne w celu ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz wykorzystania innowacyjnych rozwiązań w zakresie inżynierii materiałowej są skuteczną metodą na poszukiwanie naturalnych materiałów, których wykorzystanie w budownictwie wiązało by się z licznymi korzyściami. Istotnym aspektem jest stosowanie materiałów wykonanych ze składników naturalnych, których wpływ na środowisko byłby korzystny i zgodny z ogólnie przyjętym (w wielu dziedzinach techniki) trendem minimalizacji szkodliwości technologii wytwarzania i wbudowywania tego rodzaju materiałów. Dobrym przykładem są bloczki ze słomy na spoiwie glinianym – materiały, które stosowane były powszechnie w odległych czasach a dziś powraca ich przydatność w budownictwie. Co prawda istnieje szereg materiałów budowlanych, których wykorzystanie byłoby prostsze, ale niekorzystne z punktu widzenia konieczności zachowania zasady zrównoważonego rozwoju.

Alternatywą dla słomy i gliny może być włókno oraz słoma lniana a także konopna oraz wapno i składniki pucolanowe. Uprawa lnu w Polsce w ostatnich latach zmniejsza się ze względu na wzrost popularności tkanin syntetycznych w przemyśle odzieżowym. Przeprowadzone zostały badania nad właściwościami włókien lnianych wykorzystanych w kompozytach [2] oraz kompozytów na bazie spienionej zaprawy z udziałem słomy i włókien lnianych do zastosowań w budownictwie [4,5]. Nowe zastosowanie mogłoby przywrócić atrakcyjność upraw lnu tym bardziej, że wykorzystane mogą być, poza włóknami, również części zdrewniałe – paździerze. Konopie wykorzystywane są do produkcji materiałów budowlanych np. we Francji i Wielkiej Brytanii jako wypełnienie konstrukcji szkieletowych lub jako izolację termiczną dachu. W wyżej wymienionych krajach oraz w Słowacji były już przeprowadzane badania nad możliwością zastosowania konopi w budownictwie [1,3,6]. Zaletą konopi jest ich duża zdolność do pochłaniania CO2 z atmosfery w czasie uprawy. Jako spoiwo pożądany jest naturalny materiał, którym może być wapno w połączeniu z odpowiednimi dodatkami wpływającymi na poprawę właściwości wytrzymałościowych kompozytu. Rozwój technologii produkcji materiałów ekologicznych będzie bowiem obejmował coraz większy zakres zarówno badań ich właściwości jak i wykorzystania w praktyce (w budynkach).

Celem artykułu jest przedstawienie wybranych właściwości kompozytów wykonanych z wymienionych wyżej materiałów do zastosowania jako materiał ścienny w budownictwie, spełniający funkcję konstrukcyjno-izolacyjną jednocześnie.

2. Zakres badań i materiały użyte do badań

Zakres badań składał się badań wstępnych, których celem było opracowanie receptury spoiwa użytego w kompozycie oraz dalszych badań dotyczących porównania podstawowych właściwości mechanicznych (wytrzymałość na ściskanie), fizycznych (gęstość objętościowa, szczelność, porowatość, nasiąkliwość) oraz cieplnych (współczynnik przewodności cieplnej) dwóch kompozytów na bazie spoiwa, które uzyskało najwyższą wytrzymałość na ściskanie.

Podstawowym składnikiem spoiwa jest wapno hydratyzowane z dodatkiem cementu portlandzki CEM II/A-V, w którym część klinkieru zastąpiona jest odpadem przemysłowym – popiołem lotnym, a ten z kolei wykazując właściwości pucolanowe reaguje z wodorotlenkiem wapnia. Jako dodatek wykorzystano reaktywną pucolanę – metakaolinit (S2, S3) oraz pył krzemionkowy (S4). Receptura S1 nie zawiera dodatków pucolanowych. Została wykonana w celach porównawczych. Użyte w badaniach pucolany posiadają dużą powierzchnię właściwą, jej cząstki występują w formie amorficznej, co wiąże się z wysoką reaktywnością z wodorotlenkiem wapnia. Tabela 1 przedstawia wagowe proporcje składników w mieszankach.

Tabela 1. Receptury badanych spoiw

Table 1. Formulations of binders tested

Składniki	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**
	udział składników wagowo			
Wapno hydratyzowane	W	W	W	W
Cement CEM II 42,5	C=50% *W	C=50%*W	C=45%*W	C=45%*W
Mikrokrzemionka	-	-	-	10*(C+W)
Metakaolinit	-	5%*(C+W)	10%*(C+W)	-
Woda	70%*(C+W)	70*(C+W)	70*(C+W)	70*(C+W)

Zbadano wytrzymałość na ściskanie na próbkach 4x4x16 cm. Ze względu na powolny przebieg reakcji pucolanowej, w czasie 28 dni, próbki przebadano również po 90 dniach (tabela 2).

Tabela 2. Średnia wytrzymałość na ściskanie badanych spoiw

Table 2. The average compressive strength of binders tested

F_c [MPa]	**S1**	**S2**	**S3**	**S4**
Po 28 dniach	2,84	5,88	7,84	5,44
Po 90 dniach	3,60	6,82	8,73	6,95

Na podstawie wyników wytrzymałościowych stwierdzić można, że dodatek pucolany w znaczny sposób wpływa na wzrost wytrzymałości. Dodatek 5% metakaolinitu w mieszance S2 spowodował dwukrotny wzrost wytrzymałości na ściskanie w stosunku do wyników uzyskanych na próbkach wykonanych wg receptury porównawczej S1. Natomiast zamiana części cementu metakaolinitem w recepturze S3 spowodowała wzrost wytrzymałości o ok. 5 MPa w porównaniu z S1 i ok. 2 MPa w porównaniu z S2. Dodatek pyłu krzemionkowego okazał się mniej efektywny w porównaniu z dodatkiem metakolinitu, jednak jego obecność również wyraźnie wpłynęła na wzrost wytrzymałości na ściskanie o ok. 3 MPa względem S1.

Z racji uzyskania najlepszych właściwości wytrzymałościowych próbek z metakaolinitem, do dalszych badań przyjęto spoiwo S3 wg tabeli 1.

Dodatek metakaolinitu wpłynął znacząco na wytrzymałość w ciągu 28 dni. Po upływie 90 dni wytrzymałość wzrosła o 16% dla spoiwa S2 i 11% dla spoiw S3. Dodatek mikrokrzemionki ma większy wpływ na późniejszy wzrost wytrzymałości, która po 90 dniach wzrosła o około 28% w stosunki do wytrzymałości 28 dniowej.

Potwierdzeniem szybciej postępujących reakcji pucolany z $Ca(OH)_2$ jest również test fenoloftaleinowy. Próbka S3 polana fenoloftaleiną wykazała najjaśniejszy kolor, świadczący o zanikaniu wolnego wodorotlenku wapnia i jego wiązanie przez składniki spoiwa. Z kolei próbka S1 wykazała żywy, malinowy kolor świadczący o odczynie zasadowym materiału i stosunkowo dużej, w porównaniu z S3, zawartości $Ca(OH)_2$.

W dalszej części badań wykonano dwa kompozyty, pierwszy z nich - K1, wykonano z użyciem lnu, natomiast drugi - K2, z użyciem łodygi konopi (Rys. 1).



Rys. 1. Badane kompozyty – K1 (strona lewa); K2 (strona prawa)

Fig. 1. Composites tested – K1 (left side); K2 (right side)

Wykorzystano len w postaci mieszanki: pociętej na ok. 20mm niewymłóconej słomy lnianej oraz pociętych włókien technicznych o długości 15-20 mm (Rys. 2). Objętościowa ilość lnu w mieszance wynosiła 150% względem objętości spoiwa. Ze względu na wysoką nasiąkliwość lnu, wstępnie namoczono go w wodzie by ograniczyć ubytek wody zarobowej w trakcie wykonania mieszanki, a także oczyścić z pyłów i zanieczyszczeń. Łodygi konopi pocięto na kawałki o długościach 10-30mm w ilości 150% objętościowo względem spoiwa (Rys.2). W celu poprawy urabialności zastosowano superplastyfikator na bazie eterów polikarboksylowych. Obniżenie gęstości oraz poprawę właściwości cieplnych kompozytu osiągnięto stosując również lekkie kruszywo drobne - szkło piankowe w ilości 75% objętościowo w stosunku do spoiwa.



Rys. 2. Pocięta słoma lniana (po lewej) oraz pocięty rdzeń konopi (po prawej)
Fig. 2. Chopped flax straw (on left) and chopped hemp core (on right)

3. Właściwości kompozytów

3.1. Właściwości fizyczne kompozytów

Zbadano gęstości objętościowe mieszanki lnu oraz mieszanki konopi w stanie luźnym. Wyniosły one ok. 50 g/dm^3 dla lnu oraz 100 g/dm^3 dla konopi. Przyjmując jako punkt odniesienia jednakowe proporcje objętościowe lnu i konopi w stanie luźnym, kompozyt zawierający len po zagęszczeniu uzyskał jednak zdecydowanie większą gęstość z tego względu, że słoma lniana jest bardziej ściśliwa, zwłaszcza po namoczeniu w wodzie. Chcąc wyrównać gęstości objętościowe kompozytów należałoby odmierzać składniki w stanie zagęszczonym. Ilość kruszywa lekkiego jest jednakowa w obu kompozytach. Wyniki wybranych właściwości fizycznych kompozytów przedstawia tabela 3.

Kompozyt K1 uzyskał gęstość o ok. 30% większą niż K2, co bezpośrednio przekłada się na różnicę w pozostałych właściwościach fizycznych.

Tabela 3. Właściwości fizyczne badanych kompozytów

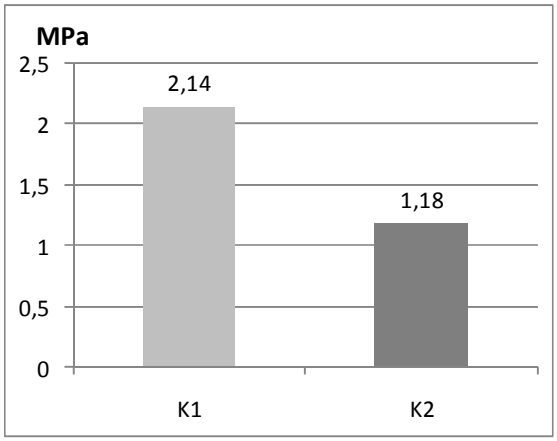
Table 3. Physical properties of the composites tested

Właściwość	K1	K2
Gęstość objętościowa [g/cm^3]	0,72	0,53
Szczelność [%]	31,0	24,0
Porowatość [%]	69,0	76,0
Nasiąkliwość [%]	48,0	53,0

Materiał wykazuje dużą nasiąkliwość rzędu 50%, co jest ściśle związane z jego dużą porowatością rzędu 70% oraz znaczną zawartością materiału organicznego, zwłaszcza słomy lnianej, która bardzo szybko wchłania wodę . Większa część wody, którą materiał jest w stanie wchłonąć, absorbowana jest już w pierwszym minutach po zanurzeniu kompozytu w wodzie. Zjawisko to można opóźnić lub ograniczyć stosując hydrofobizację powierzchniową lub strukturalną. Wysoka porowatość wiąże się ze znaczą przepuszczalnością materiału, co zapewni niezbędną migrację pary wodnej, potrzebną w konstrukcjach drewnianych oraz dobre właściwości cieplne materiału.

3.2. Właściwości mechaniczne kompozytów

Po 28 dniach przechowywania próbek w warunkach laboratoryjnych zbadano wytrzymałość na ściskanie na sześciu próbkach sześciennych 10x10x10cm, z każdej receptury. Wyniki przedstawia wykres (Rys.3).



Rys. 3. Średnia wytrzymałość na ściskanie badanych kompozytów

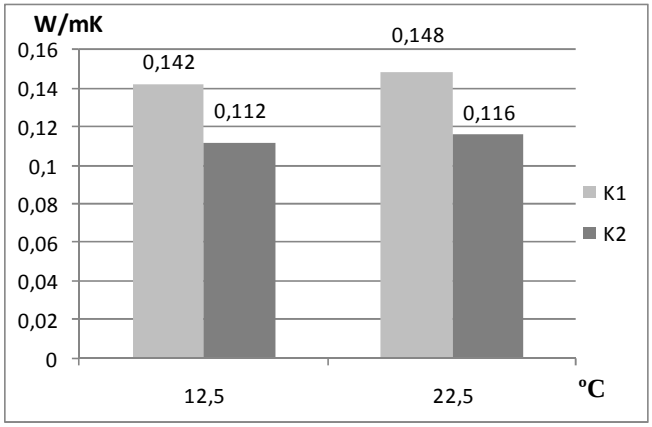
Fig.3. The average compressive strength of the composites tested

Kompozyt K1 uzyskał prawie dwukrotnie większą wytrzymałość (2,14 MPa) niż K2. Związane jest to z większą gęstością materiału. Wyniki badanej serii próbek są powtarzalne. Nie odnotowano znaczących różnic w wytrzymałości.

Materiał poddany sile ściskającej odkształca się w sposób plastyczny. Graniczna wytrzymałość pod maksymalnym obciążeniem utrzymuje się przez pewien czas, po czym następuje powolny spadek wytrzymałości. Plastyczny charakter pracy kompozytu jako materiału pozwoli na przystosowanie się do możliwych odkształceń konstrukcji budynku.

3.3. Właściwości cieplne kompozytów

W celu sprawdzenia wpływu naturalnych wypełniaczy na izolacyjność cieplną, zbadano współczynnik przewodności cieplnej w płytowym aparacie Bocka na próbkach 25x25x5cm. Porównano przewodność cieplną zakładając 2 średnie temperatury pomiędzy płytą grzejną a chłodzącą – 12,5ºC i 22,5ºC. Poniższy wykres przedstawia wartości współczynnika λ (Rys. 4).



Rys. 4. Współczynnik przewodności cieplnej badanych kompozytów
Fig. 4. The thermal conductivity coefficient of the composites tested

Rdzeń konopi wykazuje przewodność cieplną równą 0,048 W/mK dzięki swej porowatej strukturze [3]. Słomy lnianej nie zbadano pod kątem przewodności cieplnej jednak może być ona porównywalna ze słomą zbożową wykorzystywaną w domach ze słomy, czyli 0,052-0,08 W/mK [8]. Zastosowane kruszywo lekkie o współczynniku przewodności cieplnej równym 0,06-0,07 W/mK również wpłynęło po dobre właściwości izolacyjne kompozytu [9].

Wydajność izolacyjna związana jest z gęstością materiału, modyfikowaną poprzez stosunek spoiwa do wypełniacza oraz sposobem układania i zagęszczania kompozytu a w konsekwencji z jego porowatością. Kompozyt K1 ze wzglę-

du na większą gęstość związaną z większym udziałem spoiwa w porównaniu z K2 uzyskał wyższy współczynnik przewodności cieplnej . Średnie wartości λ to 0,15 W/mK dla K1 oraz 0,11 W/mK dla K2. Różne średnie wartości temperatur, wynikające z założonych różnych temperatur płyty dolnej i górnej wywierają minimalny wpływ na wynik. Mniejszą wartość λ uzyskano zadając średnią temperaturę 12,5ºC.

Docelowym zastosowaniem kompozytu K2 jest wypełnienie drewnianej konstrukcji szkieletowej oraz kompozytu K1 jako bloczki ścienne . Aby spełnić obowiązujące wymagania związane z granicznym współczynnikiem przenikania ciepła dla ścian zewnętrznych U=0,25 W/m^{2}K [7], należałoby dołożyć warstwę materiału termoizolacyjnego. Przykładowe rozwiązanie pokazano w tabeli 4.

Tabela 4. Konfiguracja grubości warstw ściennych oraz odpowiadająca im wartość „U”
Table 4.. Configurations of wall layers thickness and the corresponding value of "U"

Kompozyt	**Grubość [mm]**	**Wełna mineralna λ=0,039W/mK [mm]**	**U [W/m^{2}K]**
K1	400	80	0,21
K2	400	50	0,21

4. Podsumowanie

Zaprezentowane w artykule badania miały na celu ustalenie przydatności wypełniaczy organicznych – odpadów z lnu i konopi – do wykonania kompozytu o dobrych właściwościach konstrukcyjno-izolacyjnych do wykonywania ścian w budynkach. Kompozyt K1 z dodatkiem słomy i włókien lnianych miał większą gęstość objętościową, posiadał wytrzymałość na ściskanie średnio o 100% wyższą niż kompozyt K2. Współczynnik przewodzenia ciepła był o 27% niższy w przypadku kompozytu z dodatkiem paździerzy konopnych. Było to wynikiem mniejszej gęstości objętościowej kompozytu K2 w porównaniu z K1 (a tym samym większej porowatości). Zaobserwowano i ustalono wstępnie zależność pomiędzy gęstością objętościową, wytrzymałością materiału a jego współczynnikiem przewodzenia ciepła. Należy zauważyć, że pomimo większej wartości współczynnika λ kompozytu K1, jest on niski, co pozwala na wykorzystanie w/w materiałów jako wypełnienia drewnianych konstrukcji szkieletowych i uzyskanie wymaganej izolacyjności cieplnej przegrody zewnętrznej przy minimalnym udziale dodatkowej izolacji termicznej lub bez jej użycia, w zależności od planowanej grubości ściany. Przy grubości ściany wynoszącej 45 cm wykonanej z kompozytu K2, współczynnik U wynosi 0,24 W/m^{2}K co jest zgodne z warunkami technicznymi (U ≤ 0,25 W/m^{2}K) [7].

Wytrzymałość kompozytów regulowana była odpowiednim składem spoiwa. W celu ustalenia najkorzystniejszego rozwiązania materiałowego przepro-

wadzono badania spoiw wykonanych wg 4 receptur. Do dalszych badań wytypowano jako najkorzystniejszy materiał, spoiwo z dodatkiem metakaolinitu, które uzyskało największą wartość wytrzymałości zbadanej po 28 i 90 dniach. Wprowadzenie domieszki pucolanowej jest wskazane aby przyspieszyć wiązanie, co umożliwiłoby możliwie najszybszy termin rozformowania deskowania na budowie. Kompozyty zawierają kruszywo lekkie – szkło piankowe, które wpłynęło na otrzymanie małej gęstości objętościowej (0,5-0,7 kg/dm^3) i niskiego przewodnictwa cieplnego kompozytów (0,11-0,14 W/mK).

Przeprowadzone na dwóch seriach próbek badania stanowią podstawy do uznania słomy lnianej i konopnej za dobry, z punktu widzenia termoizolacyjności otrzymanego kompozytu, wypełniacz organiczny. Porównując oba materiały pod względem właściwości fizyko-mechanicznych stwierdzono, że odpady z konopi są lepszą alternatywą dla lnu, ze względu na mniejszą przewodność cieplną, porównywalną nasiąkliwość oraz możliwość ograniczenia ilości spoiwa, co jest korzystne z ekonomicznego punktu widzenia oraz przekłada się na otrzymanie mniejszej gęstości kompozytu, zachowując wystarczającą wytrzymałość.

Wykorzystanie lnu i konopi w budownictwie energooszczędnym otwiera także drogę do dalszego poszukiwania materiałów o podobnych właściwościach, będących albo pochodzenia naturalnego albo też odpadem produkcji przemysłowej, który musi być zutylizowany – możliwość wykorzystywania takich materiałów pozwala na likwidacje kosztów z tym związanych i pozytywnie wpływa na aspekty ekologiczne.

Literatura

[1] Allin S.: Building with hemp. Seed Press, 2012.

[2] Arbelaiz A., Ferna´ndez B., Cantero G., Llano-Ponte R., Valea A., Mondragon I.: Mechanical properties of flax fibre/polypropylene composites. Influence of fibre/matrix modification and glass fibre hybridization, Composites: Part A 36, 1637–1644, 2005

[3] Bevan R., Woolley T.: Hemp Lime Construction: A Guide to Building with Hemp Lime Composites.Bracknell, 2010.

[4] Fic S., Brzyski P., Szeląg M.: Composite based on foam lime mortar with flax fibers for use in the building industry, Ecological and Chemistry Engineering. A, nr 7-8/2013.

[5] Fic S., Brzyski P., Szeląg M.: Ocenka ważmożności izpolzowania naturalnych kompozytow z dodawką lnianych wołokon w stroitelstwie, Bisnik No 53, str. 393-399, Odessa 2014.

[6] Stevulova N., Terpakova E., Lidalova L., Priganc S., Estokova A., Helcman M.: Hemp as potential component in suitable construction. VI Konferencja Naukowo Techniczna: Zagadnienia materiałowe w inżynierii lądowej MATBUD'11, Kraków 2011.

[7] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 12 kwietnia 2002 r. (Dz.U. Nr 75, poz. 690)

[8] www.strawbale.pl [dostęp 5.11.2014]

[9] www.astra-polska.com [dostęp 5.11.2014]

SELECTED PROPERTIES OF LIGHTWEIGHT COMPOSITES BASED ON CELLULOSE FILLERS IN ECOLOGICAL BUILDING INDUSTRY

S u m m a r y

Dynamic development of modern materials technology in energy-saving building industry is based on search for environmental solutions enabling reduction of production cost and installation on the construction site, which consequently leads to building of eco-friendly objects. In addition to costs, other crucial factors include availability, ease of application, effectiveness, and optionally, further directions of the solution development. This allows for increased use of natural materials, and materials which constitute waste in the industrial processes or are products of recycling. In case of energy-saving building industry, one of the testing criteria is a possibility of achieving the building materials with a low coefficient of thermal conductivity, characterized by the adequate strength at the same time.

This paper describes the experimental test of preparing the composite based on lime, portland cement, pozzolans, lightweight aggregate, flax straw and fiber, and core of hemp for use in building industry. The first part presents the recipes applied to make sample mixing binders. Based on the results of testing the average compressive strength of binders, the suitability of various binders to make the composite has been determined. The second part demonstrates the effect of using a binder with the best strength parameters to prepare two composites based on the addition of a lightweight aggregate and flax (chopped straw and fiber) and hemp (chopped core).

The paper also compares the results of the mechanical properties (binders and composites) and thermal properties – thermal conductivity (composites). The study also includes the conclusions of the research and identifies possible directions of future development of the proposed solutions in light of new experiences.

Keywords: flax, hemp, lime, building material, binder

Przesłano do redakcji: 27.11.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.36

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 71-80

Mariusz FILIPOWICZ[1]
Mateusz SZUBEL[2]
Krzysztof SORNEK[3]
Estera BOŻEK[4]
Leszek KURCZ[5]
Arkadiusz FIGÓRSKI[6]
Wiktor WESOŁOWSKI[7]
Jacek RĘKA[8]

BADANIA ENERGETYCZNYCH I EKOLOGICZNYCH PARAMETRÓW PRACY DOMOWYCH URZĄDZEŃ GRZEWCZYCH TYPU PIECOKOMINKI

W ostatnich latach obserwujemy dynamiczny rozwój systemów grzewczych opartych na różnorodnych rozwiązaniach technicznych (paliwa, układach wytwarzania i oddawania ciepła, systemy sterowania). Systemy te jednak nie wyparły tradycyjnych urządzeń grzewczych, których historia sięga czasów Imperium Rzymskiego i wcześniej. Te systemy to tradycyjne paleniska reprezentowane obecnie przez piece kaflowe, kominki, czy ich kombinacje – piecokominki. Można wręcz stwierdzić, że obecnie obserwujemy renesans tych urządzeń, łączących elementy ozdobne oraz użytkowe. Nie bez znaczenia jest fakt, że można zaliczyć je do odnawialnych źródeł energii zasilanych biomasą. Względy ekologiczne są o tyle istotne bowiem coraz większą popularność zyskują hasła zakazania spalania paliw

[1] Autor do korespondencji: Mariusz Filipowicz, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, Tel. 604 921-688, filipow@agh.edu.pl

[2] Mateusz Szubel, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, 012 617-34-28, mszubel@agh.edu.pl

[3] Krzysztof Sornek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, 012 617 50-94, ksornek@agh.edu.pl

[4] Estera Bożek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, 012 617 34-28, ebozek@agh.edu.pl

[5] Leszek Kurcz, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, 017 38-22, kurcz@agh.edu.pl

[6] Arkadiusz Figórski, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, 012 617 51-84, figorski@agh.edu.pl

[7] Wiktor Wesołowski, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, 012 617 34-28, wikiwesol@gmail.com

[8] Jacek Ręka, CEBUD S.C., ul. Balicka 320, 30-198 Kraków, Tel. 012 637-36-23, cebud@cebud.eu

współpracy z przedstawicielem rzemiosła podjęto prace nad tymi urządzeniami mając na uwadze dokładne zobrazowanie ich parametrów, możliwości opracowania systemów sterowania czy wreszcie wprowadzenie szeregu innowacji do ich pracy. Niniejszy artykuł prezentuje przykłady i uwagi na temat wyników otrzymanych podczas pierwszego etapu badań w ramach realizowanego projektu. Przedstawiono opis stanowiska badawczego oraz wyniki wybranych pomiarów. Wykonano pomiary temperatury w komorze spalania i ciągu spalinowym układu, analizę podstawowych składników spalin w zależności od regulacji dopływu powietrza do komory spalania. Szybkość ubytku paliwa w komorze spalania w trakcie spalania i widmo płomienia uzupełniły zbiór otrzymanych danych. Wyniki te, poddane odpowiedniej analizie, mają pozwolić na opracowanie efektywnego sterowania pracą urządzenia w celu uzyskania maksymalizacji sprawności i minimalizacji emisji z paleniska.

Słowa kluczowe: piecokominek, analiza spalin, sterowanie spalaniem, efektywność energetyczna, biomasa, drewno

1. Wstęp

Od chwili kiedy ogień na trwale znalazł sobie miejsce we wnętrzach budynków nastąpił rozwój różnych systemów grzewczych opartych na spalaniu drewna i innej biomasy. Historycznym przykładem może być m.in. hypocaustum (rodzaj ogrzewania podłogowego) stosowany na terenie Imperium Rzymskiego już przed narodzinami Chrystusa. Piec umieszony pod podłogą i system kanałów pozwalał efektywnie rozprowadzać ciepłe powietrze.

Obecnie tradycyjne systemy ogrzewania charakteryzują się prostotą konstrukcji, niezbyt zaawansowanym systemami sterowania, względnie niskimi kosztami przy jednocześnie dość dobrych parametrach grzewczych. Na naszych szerokościach geograficznych typowy kominek służy głównie jako dodatkowe źródło ciepła. Ponadto w polskim prawie budowlanym zabrania się użytkowania kominka jako jedynego źródła ciepła. Łącząc funkcjonalnie i konstrukcyjnie piece kaflowe z kominkiem, otrzymujemy bardzo ciekawe rozwiązanie tzw. piecokominek.

Wśród omawianych urządzeń możemy wyróżnić [1]:

- piece tradycyjne,
- piece współczesne (tzw. piecokominki),
- piece współczesne z dodatkowymi wymiennikami ciepła,
- kominki,
- kominki z wymiennikami ciepła.

Schemat budowy pieca tradycyjnego i współczesnego przedstawiony jest na rysunku 1 a i b. Widoczna jest komora spalania (palenisko tradycyjne, murowane z cegieł lub prostek szamotowych). W piecach współczesnych może to też być odpowiedni wkład (stalowy lub żeliwny) lub gotowe palenisko prefabrykowane. Spaliny bezpośrednio po opuszczeniu komory spalania posiadają

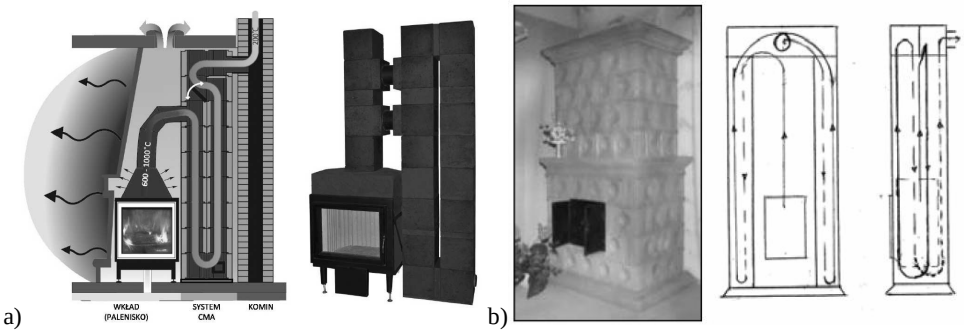
wysoką temperaturę (nawet do 1000°C) i kierowane są przez czopuch do odpowiedniego układu akumulacyjnego wymiennika ciepła z elementów ceramicznych, przepływając przez nie, ogrzewają je i w ten sposób się ochładzają, ochłodzone docierają do komina. Natomiast ogrzane od wewnątrz elementy ceramiczne oddają swoje ciepło do pomieszczenia.
Istotną rolę w tym systemie odgrywają tzw. akumulacyjne wymienniki ciepła, tradycyjnie budowane z cegieł lub prostek szamotowych lub ceramiczne moduły akumulacyjne (np. CMA), które stanowią wymiennik typu spaliny-materiał akumulacyjny.

Akumulacja ciepła we współczesnych piecach odbywa się za pomocą następujących materiałów:

- tradycyjny szamot,
- specjalny rodzaj ogniotrwałego betonu szamotowego – np. polski Akubet;

w postaci elementów takich jak:

- ceramiczne moduły akumulacyjnych wymienników ciepła (CMA),
- ceramiczne płyty akumulacyjne zewnętrznego płaszcza grzewczego (CPA) - płyty stworzone z szamotowej masy akubetowej, dzięki małej grubości bardzo dobrze nadają się do budowy różnego rodzaju elementów konstrukcyjnych, dużych powierzchni grzewczych, a także zewnętrznego płaszcza kominka; wykonywane są również płyty łukowe oraz kątowe,
- gotowe prefabrykowane paleniska akumulacyjne.



a) b)

Rys. 1. Schemat działania i wizualizacja a) piecokominka, b) tradycyjnego pieca kaflowego, na podstawie [2]

Fig. 1. Diagram and visualization of a) a fireplace with the heat accumulation system, b) a traditional tiled stove, based on [2]

Celem zapewnienia optymalnej pracy energetycznej i ekologicznej należy rozwiązać szereg problemów technicznych, są to m.in.:

- zapewnienie odpowiednich warunków spalania w komorze poprzez dostarczanie odpowiedniej ilości powietrza i właściwe rozprowadzenie w niej tego powietrza,

- stosowanie odpowiednich materiałów akumulujących ciepło, dobór kanałów spalinowych o odpowiedniej długości i przekroju oraz optymalizacja ich masy,
- ograniczenie emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłów, wymagane jest tutaj m.in. stosowanie paliwa o odpowiednich parametrach,
- sposób dostosowania do warunków i potrzeb grzewczych użytkownika, mocy grzewczej i okresu grzewczego,
- stworzenie odpowiednich algorytmów sterowania – jest to istotne dla każdego z ww. zagadnień.

Ważność powyższych zagadnień potwierdza analiza specjalistycznej literatury (np. pozycje [3-5]), w których opisano szereg innowacyjnych prac podjętych na tego typu układach grzewczych. Przedstawiono założenia i wyniki zaawansowanych numerycznych symulacji z użyciem oprogramowania typu CFD, prace nad wykorzystaniem zaawansowanych czujników gazu do sterowania procesem spalania, czy sposoby zmniejszenia emisji zanieczyszczeń poprzez wykorzystanie katalizatorów. Liderem badań w tym zakresie są ośrodki z Austrii oraz Niemiec. W tych krajach mocno rozwija się rynek tego typu urządzeń, a badania naukowe są stymulowane przez wprowadzanie coraz ostrzejszych norm ochrony środowiska, co w przeciwieństwie do zakazów spalania danego paliwa ma głęboki sens, gdyż środowiska nie zanieczyszcza paliwo samo w sobie, a to co się wydostaje z komina jako rezultat procesu spalania.

2. Opis przeprowadzonych badań

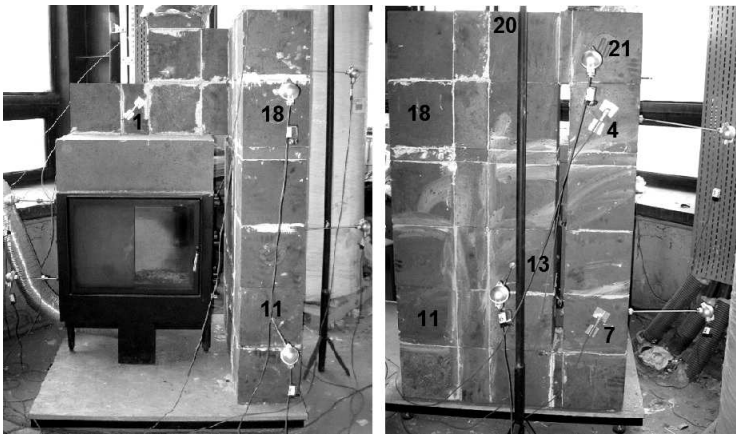
2.1. Stanowisko badawcze

Widok stanowiska badawczego przedstawiony jest na rysunku 2 oraz 3. Podstawowe jego elementy to: układ piecokominka (akumulacyjna komora spalania z modułami akumulującymi ciepło), tensometryczna waga podestowa, zestaw czujników, analizator spalin, kanały dolotowe powietrza z przepustnicami, układ kontrolno-pomiarowy i komputer. W pomiarach wykorzystywano również kamerę termowizyjną i spektrometr optyczny.

2.2. Układ kontrolno-pomiarowy

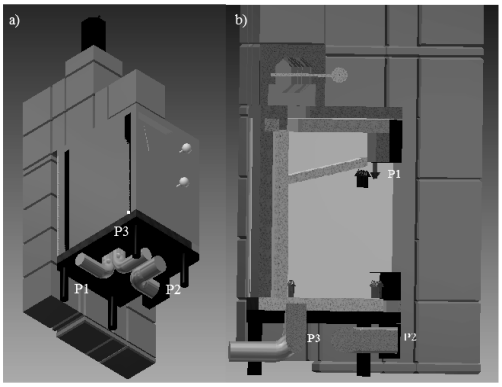
Jednostką centralną jest sterownik programowalny PLC (oparty na systemie WAGO 750) wraz z odpowiednimi modułami we/wy. Programowanie odbywa się z wykorzystaniem środowiska CoDeSys, co pozwala na elastyczne konfigurowanie układu w zależności od potrzeb.

Układ kontrolno-pomiarowy zbiera dane z czujników pomiarowych temperatury ulokowanych we wnętrzu komory spalania i na powierzchni elementów akumulujących ciepło, przetwornika prędkości przepływu powietrza, analizatora spalin oraz podaje sygnały sterujące dla trzech przepustnic powietrza.



Rys. 2. Zdjęcie stanowiska badawczego z usytuowaniem czujników pomiarowych w wybranych punktach

Fig. 2. Photo of the experimental set-up, the sensors located in the selected points are visible



Rys. 3.Wizualizacja kanałów (p1, p2 i p3) doprowadzających powietrze do komory spalania, a) widok od dołu, b) widok z boku

Fig. 3. Visualization of ducts (p1, p2 and p3) delivering air to the combustion chamber, a) bottom view, b) side view

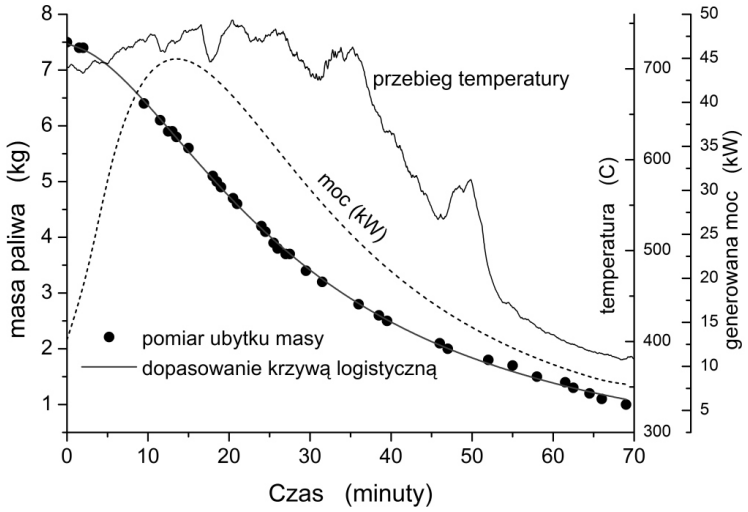
2.3. Procedura badawcza

Pomiary opisywane w niniejszym opracowaniu wykonywane były dla ustalonej wielkości wsadu paliwa do komory spalania piecokominka - 8 kg drewna, przy czym stosowano paliwo o różnej wielkości (grubości) i różnej wilgotności. Próbki paliwa pobierane były do analizy technicznej i elementarnej (m.in. wyznaczona została wartość opałowa), dla kilku próbek przeprowadzono pełną

analizę TGA/DT. Przygotowanie stanowiska polegało na wcześniejszym spaleniu w piecokominku ustalonej wielkość paliwa (ok. 2-3 kg), aby uniknąć nierepreprezentatywnego rozpalania i spalania paliwa w zimnym piecokominku.

3. Wyniki badań

Wyniki przykładowych badań zostały przedstawione na kolejnych rysunkach. Wyznaczona została generowana moc wskutek ubytku paliwa, przy założeniu, że całkowity ubytek paliwa związany jest z jego termochemiczną konwersją. Wynik został przedstawiony na rysunku 4.



Rys. 4. Przebieg ubytku masy paliwa, mocy grzewczej oraz temperatury w komorze spalania

Fig. 4. Fuel mass losses, heat power and temperature during the combustion

Widoczne jest, że w trakcie spalania, paliwo ubywa z różną intensywnością. Bieżąca masa paliwa $m(\tau)$ może być opisana zależnością, tzw. funkcją logistyczną:

$$m(\tau) = \frac{m_0}{1+\left(\tau/\tau_0\right)^p} + m_1 \tag{1}$$

gdzie m_0, m_1, τ_0 i p to zmienne dopasowania. Parametry m_0, m_1 mają jednostkę masy i można je interpretować jako wielkości dające masę początkową – wkład spalania oraz pozostałość po spaleniu (popiół). Parametr p określa szybkość zachodzenia procesu spalania i może być zależny np. od intensywności dostarczania powietrza czy jakości paliwa. Czas τ_0 jest to czas po którym nastąpi ubytek połowy masy m_0. Dla przykładu przytoczonego na rysunku 5, τ_0=28.4±0.5 kg, p0 = 1.73±0.04.

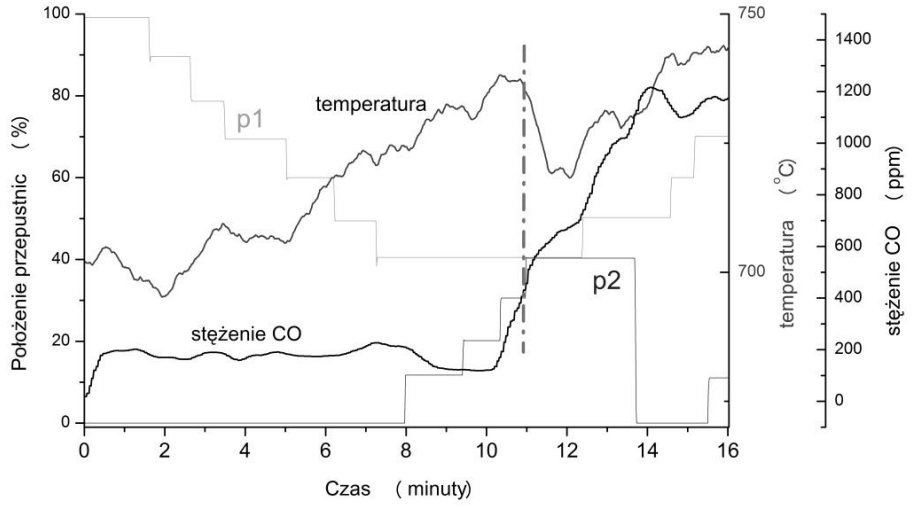
Znając ubytek masy możemy wyznaczyć teoretyczną moc piecokominka:

$$P(\tau) = Q \cdot \frac{dm}{d\tau} \tag{2}$$

gdzie: Q to zmierzone ciepło spalania próbek użytego drewna, równe 16200 kJ/kg.

Oczywiście przytoczone zależności mają charakter przybliżony, gdyż zakładają, że ubytkowi masy towarzyszy cały czas ten sam efekt cieplny, a wiadomo, m.in., że w pierwszym etapie spalania zachodzi dosuszanie paliwa, a w końcowym wyżarza się powstały węgiel drzewny.

Rysunek 5 przedstawia zależności temperatury w komorze spalania i stężenia CO w zależności od ustawienia przepustnic *p1* i *p2*.



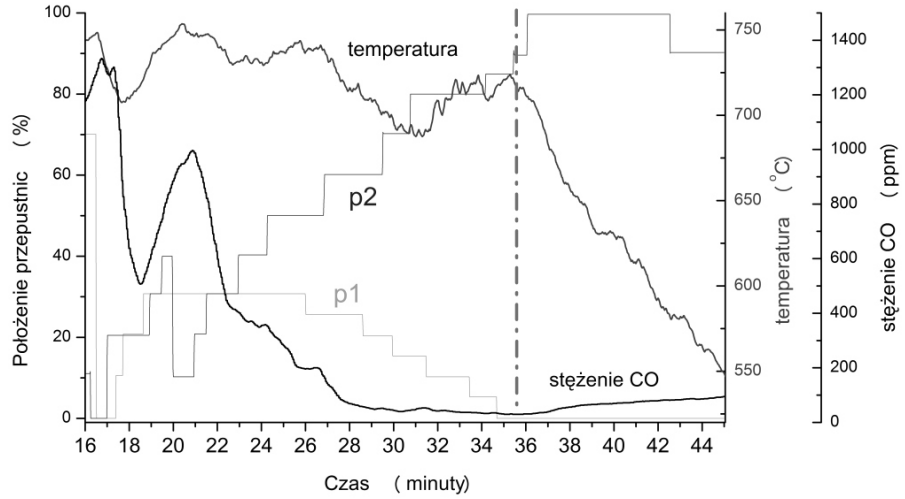
Rys. 5. Przebiegi podstawowych wielkości dla pierwszych 16-tu minut pracy piecokominka

Fig. 5. Values of basic parameters for first 16 minutes of the fireplace operation

Widoczne jest, że w momencie rozpalenia się paliwa temperatura szybko osiągnęła wartość 700°C, wtedy zaczyna się spalanie zasadniczego wsadu paliwa. Przy zmniejszaniu kąta otwarcia przepustnicy *p1* od wartości 100% (pełne otwarcie) do 40% otwarcia, co nastąpiło w ok. 4.5 minucie nie widać zmian procesu spalania. Temperatura utrzymuje się na poziomie ok. 700°C, stężenie CO też jest stabilne (ok. 200 ppm). W 8-mej minucie nastąpiło otwarcie przepustnicy *p2*. Widoczne jest, że niewielkie otwarcia przepustnicy *p2* (od 0-20%) dały korzystny efekt – temperatura nieznacznie wzrosła, a stężenie CO spadło. Kulminacja tego efektu nastąpiła ok. 10-tej minuty. Dalsze zwiększanie stopnia otwarcia przepustnicy *p2* przyniosło efekt odwrotny - temperatura nieznacznie spadła, a stężenie CO zaczęło szybko rosnąć. Moment ten oznaczony został pionową przerywaną linią. Nastąpiło to pomimo zwiększenia dostępu powie-

trza. Dokładne obserwacje pokazują, że ten efekt związany jest z wychłodzeniem obszaru spalania poprzez wprowadzenie zbyt dużej ilości zimnego powietrza – spalanie następuje przy mniejszej temperaturze, co przesuwa równowagę reakcji w stronę tworzenia CO.

W dalszym etapie spalania przedstawionym na rysunku 6 widoczne są następujące zmiany:

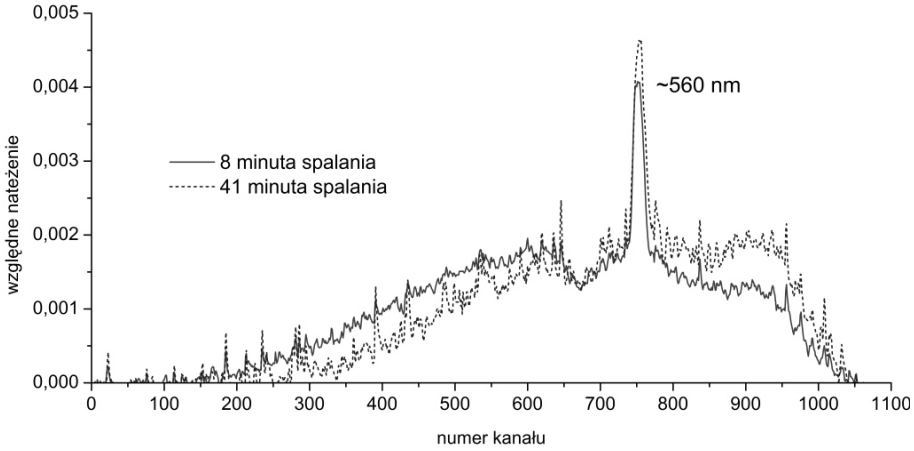


Rys. 6. Przebiegi podstawowych wielkości dla okresu 16-45 minuty pracy piecokominka

Fig. 6. Values of basic parameters for period 16-45 minutes of the fireplace operation

Poprzez zmniejszanie przepływu powietrza przepustnicą *p1* i zwiększanie przepływu poprzez *p2* udało się doprowadzić do rozpoczęcia spadku stężenia CO. Spadek zaczął następować w momencie gdy otwarcie *p1* wynosiło ok. 30% a *p2* ok. 15%. Dalsze zmniejszanie otwarcia p1 i zwiększanie otwarcia *p2* powodowało spadek stężenia CO. Wartość minimalna została osiągnięta w ok. 36 minucie dla *p1* bliskiego zero i *p2* ponad 80%. Niestety takie otwarcie *p2* (a potem jeszcze zwiększenie) spowodowało zbyt duży napływ powietrza i wychłodzenie paleniska – temperatura zaczęła spadać, spowodowało to, że stężenie CO zaczęło znowu rosnąć. Również całkowite zamknięcie *p1* mogło spowodować zmniejszenie podawania powietrza od góry do strefy spalania. Właściwym wydaje się utrzymywanie *p1* na poziomie 20% a *p2* – 60%.

W trakcie prowadzenia procesu spalania badane były widma promieniowania płomienia za pomocą spektrometru. Widmo dla dwóch chwil, tj. 8 i 41 minuty spalania przedstawione jest na rysunku 7.



Rys. 7. Znormalizowane widma płomienia dla wybranych chwil pracy piecokominka

Fig. 7. Normalized flame spectra for selected moments of the fireplace operation

Jest to widmo ciągłe sugerujące występowanie w płomieniu cząstek stałych – sadzy, popiołu i innych. Cechą charakterystyczną widma jest występowanie piku dla długości fali ok. 560 nm, sugerującej, że jest to wzbudzone C_2. Dla końcowego okresu spalania następuje nasilenie fal powyżej 600 nm – od świecącego żaru. Za pomocą widma można ocenić fazę spalania i określić np. ilość nagromadzonego żaru oraz określić zapylenie płomienia. Jest to technika badawcza dość intensywnie ostatnio rozwijana jako element diagnostyczny dla dużych jednostek kotłowych.

4. Podsumowanie i wnioski

Zamierzeniem opisanych badań jest zwiększenie możliwości sterowania pracą kominka, tak aby uzyskać zarówno optymalizację jego parametrów ekonomicznych, jak i redukcję negatywnego wpływu na środowisko. Przytoczone przykłady pokazują, że w ten sposób można zebrać istotną wiedzę odnośnie pracy takich układów i zbudować odpowiednie charakterystyki i modele, które posłużą do dalszych prac. Kolejne planowane etapy tych prac to opracowanie odpowiednich algorytmów sterowania, zbudowanie modelu CFD opisywanego urządzenia oraz stworzenie nowatorskiego systemu tzw. raportowania ekologicznego, w którym niektóre z opisanych powyżej przebiegów będą zdalnie rejestrowane z urządzeń pracujących u użytkowników.

Artykuł opracowany w ramach projektu badawczego Województwa Małopolskiego realizowanego przez firmę CEBUD we współpracy z WEiP AGH.

Literatura

[1] M. Filipowicz i inni, „Pomiary podstawowych parametrów pracy piecokominków", Instal: teoria i praktyka w instalacjach, nr 6/2014, s.26-33

[2] Materiały firmy CEBUD, www.cebud.eu, ostatni dostęp 22.02.2015

[3] D. Menghini i inni, „Numerical and experimental investigations to lower environment al impact of an open fireplace", Experimental Thermal and Fluid Science, 31(2007)477-482

[4] P. Butschbach i inni, "Extensive reduction of toxic gas emissions of firewood-fueled low power fireplaces by improved in situ gas sensoric and catalytic treatment of exhaust gas", Sensors and Actuators B 137(2009)32-41

[5] F. Ozil i inni, „Efficiency of catalytic processes for the reduction of CO and VOC emission from wood combustion in domestic fireplaces", Fuel Processing Technology 90(2009)1053-1061

STUDY ON ENERGY AND ECOLOGICAL PARAMETERS OF DOMESTIC HEATING APPLIANCES LIKE FIREPLACES WITH HEAT ACCUMULATION

S u m m a r y

In recent years one can see rapid development of heating systems based on a variety of fuels, different production systems and heat transmission and control systems. These systems, however, have not supplanted the traditional heating devices, represented by stoves, fireplaces, or combinations thereof. Currently, we are witnessing a renaissance of these devices, combining decorative and functional elements, and that can be included to renewable energy biomass-powered. The attention is paid to the best energy parameters and the minimization of harmful factors associated with the combustion of biomass, because more and more popularity gain slogans to prohibit the burning of solid fuels (including biomass). An example might be Kraków. Therefore, AGH, in cooperation with industry, have been working on these devices whereas accurate presentation of their parameters, development of the control systems and, finally, introduce a number of innovations to the work of such traditional sources of energy. Article describes the test bench and presents the results of the first phase of the research. Temperature measurements in the combustion chamber and the exhaust gas system, an analysis of the basic components of the exhaust gases depending on the regulation of the air supply to the combustion chamber were executed. Measurements have been supplemented with the intensity of fuel consumption and the flame spectrum. A collection of results, subjected to appropriate analysis, will allow the development of device's effective control system for maximizing efficiency and minimizing emissions from the furnace.

Keywords: fireplace with heat accumulation system, exhaust gases analysis, combustion control, energy efficiency, biomass, wood

Przesłano do redakcji: 22.02.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.37

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 81-88

Tomasz GACZOŁ[1]

WENTYLACJA GRAWITACYJNA W BUDYNKACH MIESZKALNYCH - WYBRANE ZAGADNIENIA

Wentylacja grawitacyjna, polega na wymianie powietrza, powstałej z powodu różnicy ciśnień, odbywająca się w sposób ciągły, poprzez przewody wentylacyjne. Jest to stary, sprawdzony i najczęściej stosowany sposób wentylowania pomieszczeń. Złe rozwiązania projektowe, powodują brak skutecznego jej działania. Prawidłowy przepływ powietrza, wywiera istotny wpływ na jakość struktury budowlanej. Brak zawilgoceń i zagrzybień to dowód na poprawne działanie wentylacji. Jest ona również odpowiedzialna za dobre samopoczucie człowieka, a przede wszystkim za jego zdrowie. W referacie zwrócono uwagę na konieczność opracowania już na etapie koncepcji projektowej, schematów wentylacji budynku – pionowy i poziomy przepływ powietrza, zależy od przyjętego rodzaju nawiewu i odprowadzenia mas powietrza z pomieszczeń mieszkalnych. Usytuowanie ścianek, elementów konstrukcji budynku, układ okien i drzwi, a nawet rozmieszczenie elementów stałego wyposażenia mieszkań, ma istotny wpływ na kierunek przepływającego powietrza, a tym samym na wydajność systemu wentylacji grawitacyjnej. Istotnym problemem występującym już na etapie projektu budowlanego jest dobór ilości kanałów oraz odpowiednie obliczenie pola przekroju poprzecznego w zależności od ich wysokości i zapotrzebowania projektowanych pomieszczeń na wielkość przepływu powietrza, wyrażoną krotnością wymiany lub strumieniem powietrza, mierzoną w m^3/s. Dobra znajomość zagadnień związanych z poprawnie działającą wentylacją grawitacyjną, to obowiązek każdego architekta, który jest w pełni odpowiedzialny za zaprojektowany budynek, a przede wszystkim za ludzi, którzy będą jego użytkownikami.

Słowa kluczowe: mikroklimat, nawiew, wywiew, krotność wymiany, strumień powietrza

1. Parametry mikroklimatyczne

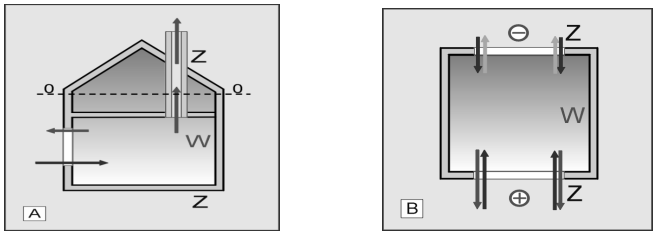
Parametry mikroklimatu pomieszczeń, to parametry powietrza w tych pomieszczeniach. Na parametry mikroklimatyczne mają wpływ: procentowy skład tlenu, azotu i innych gazów oraz różnego rodzaju zanieczyszczeń, a także temperatura powietrza, zalecana w zakresie od 18°C do 20°C, wilgotność względna

[1] Tomasz Gaczoł: Politechnika Krakowska, Wydział Architektury, Instytut Projektowania Budowlanego, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel. nr: 126282459, 500445876, e-mail: at.polgac@neostrada.pl

od 40% - 60% oraz jego ruch, który w pomieszczeniach zamkniętych nie powinien przekraczać 0,5 m/s, a optymalna jego wartość to 0,15 m/s (polskie normy określają prędkość przepływu powietrza w pomieszczeniach zamkniętych na poziomie 0,7 m/s). Ruch powietrza, powoduje mieszanie warstw, dzięki czemu wyrównywany jest skład chemiczny i temperatura. W przypadku niskiego poziomu wilgotności względnej powietrza dochodzi do unoszenia się w nim kurzu, pyłu i wszelkiego rodzaju zanieczyszczeń [1]. Wysoka temperatura i wilgotność, połączona z niedostatecznym ruchem powietrza sprzyja rozwojowi grzybów pleśniowych, roztoczy oraz mikroorganizmów. Niewłaściwe parametry mikroklimatyczne, zanie-czyszczenia chemiczne, pyły, obecność alergenów biologicznych są powodem występowania wielu syndromów chorobowych, takich jak: „Syndrom Chorego Budynku" – SBS (Sick Building Syndrome), alergiczne zapalenie pęcherzyków płucnych, „Choroba Legionistów", pylice, zmiany wywołane czynnikami biologicznymi, choroby powstałe na skutek zwiększonego stężenia dymu tytoniowego oraz tlenku węgla [2].

2. Wentylacja grawitacyjna

Wentylację grawitacyjną uzyskuje się poprzez połączenie z otoczeniem wewnętrznej kubatury pomieszczenia za pomocą kanału wentylacyjnego wyprowadzonego ponad poziom dachu. Płaszczyzna wyrównania ciśnienia znajduje się ponad pomieszczeniem, tak więc w całym jego wnętrzu panuje mniejsze ciśnienie od atmosferycznego. Taki sposób wentylowania nosi nazwę wentylacji grawitacyjnej wywiewnej (rys. 1).



Rys. 1. A - Wentylacja grawitacyjna. Rozkład ciśnienia w budynku 1-kondygnacyjnym z kanałem wywiewnym. B – poziomy przepływ powietrza (różnica ciśnień) - rysunek autora

Fig. 1. A - Gravitational ventilation. Pressure distribution in 1-storey building with the exhaust duct. B - horizontal air flow (pressure differential) - figure of the author

W Polsce wymagania dotyczące intensywności wymiany powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych odnoszą się: do zanieczyszczeń pochodzących od ludzi oraz stopnia wilgotności powietrza. Przyjmuje się, że minimalna ilość świeżego powietrza przypadająca na jedną osobę wynosi 20m^3/h. Według obowiązujących przepisów i norm budowlanych [3,4], intensywność wymiany jest sumą usuwanych mas powietrza z zanieczyszczonych pomieszczeń takich jak

toalety, łazienki i kuchnie. Wielkość mieszkań oraz liczba mieszkających osób nie ma tu znaczenia. W związku z tym, przypadająca na osobę ilość wymienianego powietrza może się zdecydowanie różnić [5].

Tabela 1. Strumień powietrza wentylacyjnego dla wybranych pomieszczeń. Na podstawie: PN-83/B-03430 (wraz ze zmianą A3:2000) „Wentylacja w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania"

Table 1. Ventilation air flow of choosen rooms. Based on: PN-83/B-03430 (with a change in A3: 2000) "Ventilation in buildings, housing and public buildings. Requirements"

Dla kuchni z oknem zewnętrznym, wyposażonej w kuchnię gazową lub węglową	70 m^3/h
Dla kuchni z oknem zewnętrznym, wyposażonej w kuchnię elektryczną - w mieszkaniu do 3 osób - w mieszkaniu dla więcej niż 3 osób	 30 m^3/h 50 m^3/h
Dla kuchni bez okna zewnętrznego lub dla wnęki kuchennej wyposażonej w kuchnię elektryczną	50 m^3/h
Dla łazienki (z ustępem lub bez)	50 m^3/h
Dla oddzielnego ustępu	30 m^3/h
Dla pokoju mieszkalnego, znajdującego się na najwyższej kondygnacji w wielopoziomowym domu jednorodzinnym lub w wielopoziomowym mieszkaniu domu jednorodzinnego	30 m^3/h
Dla pomocniczego pomieszczenia bez okna	15 m^3/h
Kuchnie bez okna zewnętrznego, wyposażone w kuchnię gazową, powinny mieć mechaniczną wentylację wywiewną; usuwany strumień powietrza powinien wynosić	70 m^3/h

Dodatkowym mankamentem jest także zły dobór przekroju poprzecznego kanału wentylacyjnego wywiewnego w stosunku do jego wysokości oraz brak odpowiedniego nawiewu powietrza do pomieszczeń. Częste „projektowanie" wentylacji grawitacyjnej, ogranicza się do wrysowania na projekcie kanałów wentylacyjnych bez analizy przepływu powietrza przez pomieszczenia oraz bez dodatkowych obliczeń możliwości wymiany jaką daje zastosowany przewód wentylacji grawitacyjnej.

Prędkość przepływu powietrza w kanale wywiewnym zależy od różnicy temperatury wewnętrznej i zewnętrznej (tw - tz), od wysokości przewodu wentylacyjnego, a przede wszystkim od pola powierzchni przekroju poprzecznego kanału wywiewnego.

Pole powierzchni przekroju poprzecznego kanału wywiewnego określa się wzorem [6]:

$$F = \frac{L}{v \times 3600} \quad [m^2] \tag{1}$$

gdzie: v – prędkość powietrza w kanale, m/sek (tabela 2),
L – ilość powietrza, m^3/h, obliczona wg wzoru:

$$L = \frac{K}{K_d} \cdot V \quad [m^3/h] \tag{2}$$

gdzie: K – ilość wydzielających się zanieczyszczeń $mg/m^3 \cdot h$,
K_d – dopuszczalne stężenie zanieczyszczeń mg/m^3 (tabela 3),
V – objętość wentylowanego pomieszczenia m^3.

Podana lista wydzielających się zanieczyszczeń (mg/m^3) jest bardziej restrykcyjna od obowiązujących danych, zawartych w zarządzeniu ministra zdrowia z dnia 12 marca 1996 roku (M.P. nr 19 poz. 231), „W sprawie dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia, wydzielanych przez materiały budowlane, urządzenia i elementy wyposażenia w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi".

Tabela 2. Prędkość przepływu powietrza (m/sek.) w murowanych kanałach pionowych, wg Degena. Na podstawie: POLSKI ZWIĄZEK INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW BUDOWNICTWA: "Poradnik inżyniera i technika budowlanego". Warszawa, Arkady 1968 tom 2 część III, s. 373 oraz 385

Table 2. Air flow (m/sek.) speed in bricks made ventilation ducts (Degen). Based on: POLISH ASSOCIATION OF ENGINEERS AND TECHNICIANS CONSTRUCTION: "Guidance engineering and construction technique." Warsaw, Arcade 1968 Volume 2, Part III, p 373, and 385

Tw – Tz Wysokość kanału (m)	**6**	**10**	**16**	**20**	**24**	**30**	**34**	**40**
2	0,30	0,41	0,56	0,64	0,72	0,84	0,40	1,00
3	0,41	0,55	0,71	0,80	0,89	1,00	1,07	1,17
4	0,51	0,67	0,85	0,94	1,03	1,15	1,23	1,32
5	0,59	0,76	0,96	1,07	1,17	1,30	1,38	1,47
6	0,66	0,85	1,06	1,18	1,28	1,41	1,50	1,59
7	0,78	0,97	1,29	1,36	1,48	1,62	1,72	1,84
10	0,85	1,09	1,36	1,52	1,63	1,81	1,92	2,06
12	0,93	1,20	1,50	1,66	1,81	1,99	2,11	2,26
14	1,01	1,30	1,62	1,79	1,95	2,15	2,27	2,43
16	1,08	1,39	1,73	1,91	2,09	2,29	2,42	2,59
18	1,14	1,47	1,83	2,03	2,21	2,43	2,56	2,74
20	1,20	1,54	1,93	2,15	2,33	2,56	2,70	2,89
21	1,23	1,58	1,97	2,20	2,39	2,63	2,77	2,97
22	1,25	1,61	2,01	2,25	2,44	2,68	2,83	3,03
23	1,28	1,65	2,06	2,29	2,50	2,74	2,90	3,10
24	1,31	1,68	2,10	2,34	2,55	2,80	2,96	3,16
25	1,34	1,72	2,15	2,39	2,60	2,86	3,02	3,23
26	1,37	1,75	2,19	2,44	2,66	2,92	3,09	3,30
27	1,39	1,79	2,24	2,46	2,71	2,98	3,15	3,36
28	1,42	1,82	2,28	2,52	2,76	3,04	3,21	3,43
29	1,44	1,86	2,32	2,57	2,81	3,09	3,27	3,49
30	1,47	1,89	2,36	2,62	2,96	3,15	3,33	3,55

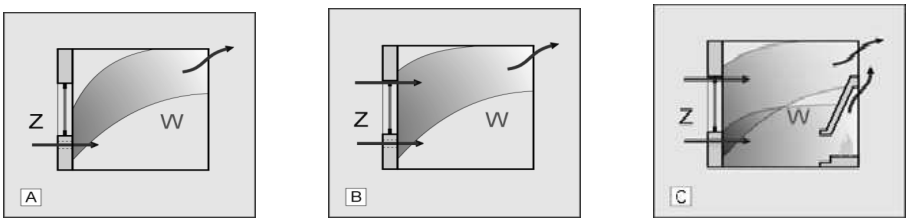
Tabela 3. Wartość stężeń gazów, par i pyłów dopuszczalnych ze względów zdrowotnych. Na podstawie: POLSKI ZWIĄZEK INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW BUDOWNICTWA: ”Poradnik inżyniera i technika budowlanego”. Warszawa, Arkady 1968, tom 2 część III, s. 373

Table 3. Concentrating gasses, steams and dusts admissible in respects to health. Based on: POLISH ASSOCIATION OF ENGINEERS AND TECHNICIANS CONSTRUCTION: "Guidance engineering and construction technique." Warsaw, Arcade 1968, Volume 2, Part III, p 373

Nazwa substancji	Stężenie dopuszczalne mg/l	Nazwa substancji	Stężenie dopuszczalne mg/l
Aceton	0,2	Eter	0,03
Akroleina	0,002	Fenol	0,005
Alkohol butylowy	0,2	Fluorowodór i sole fluoru	0,001
Alkohol etylowy	1,0	Formaldehyd	0,005
Alkohol metylowy	0,05	Fosfor (żółty)	0,00003
Amoniak	0,02	Jod	0,001
Anilina	0,005	Kwas azotowy	0,002
Arsen i jego związki przeliczone na wolny arsen	0,0003	Kwas siarkowy	0,002
Arsenowodór	0,0003	Mangan i jego związki	0,0003
Benzen	0,1	Nitrobenzen	0,005
Benzol	0,1	Ołów i jego związki	0,00001
Benzyna, nafta, oleje mineralne	0,3	Ozon	0,0001
Chlor	0,001	Rtęć	0,00001
Chlorowodór	0,01	Siarkowodór	0,01
Cyjanowodór	0,0003	Siarczan cynku	0,005
Czterochlorek węgla	0,05	Terpentyna	0,3
Dwusiarczek węgla	0,01	Tlenki azotu	0,005
Dwutlenek siarki	0,02	Tlenki cynku	0,005
Dwutlenek węgla	10,00	Tlenki węgla	0,02
		Tytoniowy i herbaciany pył	0,003

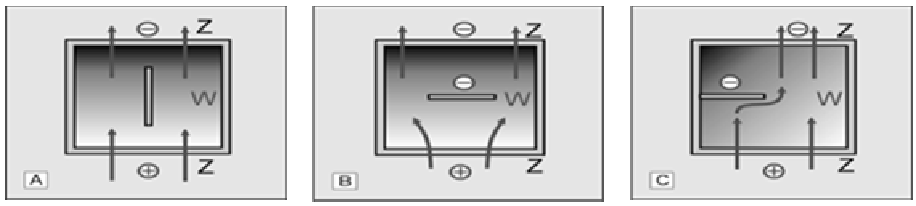
3. Przepływ powietrza w pomieszczeniach

Ze względu na ruch powietrza w pomieszczeniach wentylowanych i występujące w nich tzw. „strefy martwe”, należy zawsze przeprowadzić analizę przepływu mas powietrza. Wentylacja grawitacyjna powinna usuwać z pomieszczeń lekkie i cięższe zanieczyszczenia. Jednak czasem ze względu na wadliwy np.: układ okien i drzwi w pomieszczeniach, przegrody pionowe takie jak ścianki działowe, elementy konstrukcji budynku oraz ustawione umeblowanie, nie dochodzi do prawidłowej wymiany powietrza. Brak wymogów stosowania kratek wentylacyjnych znajdujących się w górnej części ściany, np. nad nadprożem drzwiowym, uniemożliwia swobodny ruch powietrza i powoduje występowanie niewentylowanej strefy na pewnej wysokości pomieszczenia. W takim przypadku umieszczanie antresol lub łóżek piętrowych w pokojach jest dużym błędem, mającym ogromny wpływ na nasze zdrowie [7],[8]. Prawidłowo działająca wentylacja grawitacyjna odpowiada za dobry stan techniczny przegród budowlanych. Często widoczne zagrzybienia i zawilgocenia, świadczą o złym działaniu wentylacji lub o jej całkowitym braku. Poniżej przedstawiono wybrane schematy analizy pionowego i poziomego przepływu mas powietrza w pomieszczeniach mieszkalnych (rys. 2, rys. 3).



Rys. 2. Wentylacja grawitacyjna - analiza pionowego przepływu powietrza w pomieszczeniach wentylowanych (Z - przestrzeń zewnętrzna, W - przestrzeń wewnętrzna) - rysunek autora

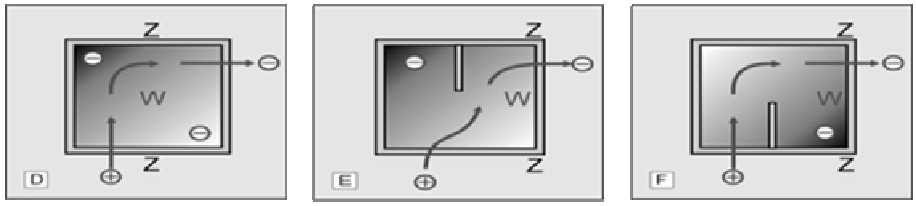
Fig. 2. Natural ventilation - analysis of vertical air flow in ventilated residents - drawing of the author



- układ optymalny - ściana wewnętrzna jest równoległa do kierunku przepływu powietrza
- otwory okienne usytuowane na przeciwległych ścianach

- układ poprawny - ściana wewnętrzna, prostopadła do kierunku przepływu powietrza; duże otwory okienne po obu stronach, gwarantują dobrą wentylację pomieszczenia

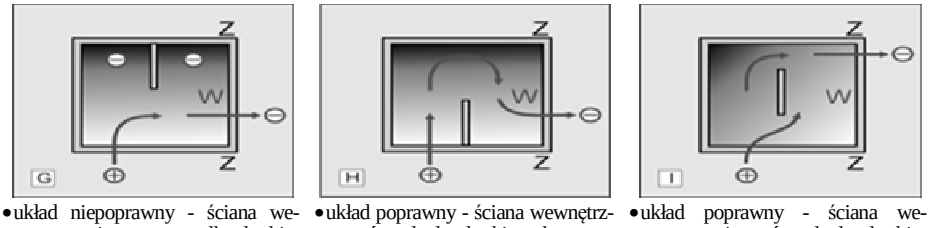
- układ niepoprawny - ściana wewnętrzna jest prostopadła do kierunku przepływu powietrza, zasłania część pomieszczenia, którego narożnik jest źle wentylowany



- układ poprawny - brak ściany wewnętrznej tak usytuowane otwory, powodują ukośny przepływ powietrza
- w narożach - „strefy martwe"

- układ niepoprawny - ściana wewnętrzna jest równoległa do kierunku przepływu powietrza, zasłania części pomieszczenia, pozbawiając go wentylacji

- układ niepoprawny - ściana wewnętrzna jest prostopadła do kierunku przepływu powietrza, mała ilość otworów okiennych



- układ niepoprawny - ściana wewnętrzna jest prostopadła do kierunku przepływu powietrza słaba wentylacja powierzchni pomieszczenia

- układ poprawny - ściana wewnętrzna, równoległa do kierunku przepływu powietrza, usytuowanie otworów
- dobra wentylacja pomieszczeń

- układ poprawny - ściana wewnętrzna jest równoległa do kierunku przepływu po-wietrza, usytuowanie otworów powoduje dobrą wentylację

Rys. 3. Wentylacja grawitacyjna - analiza poziomego przepływu powietrza w pomieszczeniach wentylowanych w zależności od usytuowania otworów okiennych i ścian (+ nadciśnienie; - podciśnienie) - rysunek autora

Fig. 3. Natural ventilation - an analysis of the horizontal air flow in ventilated areas depending on the location of windows and walls - drawing of the author

4. Wnioski

Wentylacja grawitacyjna ma istotny wpływ na warunki higieniczne w pomieszczeniach budynków mieszkalnych. Odpowiednia ilość świeżego powietrza zapewnia człowiekowi dobre samopoczucie, a przede wszystkim decyduje o jego zdrowiu.

Głównym powodem podjęcia tematu jest:

- słaba znajomość odpowiednich metod projektowych poprawnie działającej wentylacji grawitacyjnej przez niektórych projektantów,
- przestarzałe normy i regulacje prawa budowlanego,
- stopień zanieczyszczenia powietrza wewnętrznego pomieszczeń mieszkalnych, jest często większy niż powietrza zewnętrznego,
- oszczędzanie energii, poprzez celowe uszczelnianie pomieszczeń, redukowanie wentylacji grawitacyjnej, obniża jakość powietrza wewnętrznego i jest przyczyną powstania wielu groźnych schorzeń (SBS - „Zespół Chorego Budynku", „Choroba Legionistów", pylice , alergiczne zapalenie pęcherzyków płucnych, , zmiany wywołane czynnikami biologicznymi, choroby powstałe na skutek zwiększonego stężenia dymu tytoniowego, tlenku i dwutlenku węgla) [9][10],
- wentylacja grawitacyjna w istotny sposób decyduje o dobrym stanie technicznym przegród budowlanych,
- znajomość zagadnień związanych z poprawnie działającą wentylacją grawitacyjną, to obowiązek każdego architekta, który jest w pełni odpowiedzialny za zaprojektowany budynek, a przede wszystkim za ludzi, którzy będą jego użytkownikami.

Literatura

[1] Kusionowicz T.: „Problemy projektowania budynków mieszkalnych, a zdrowie człowieka". Monografia, Kraków 2008. Politechnika Krakowska, seria architektura, s. 43, 51,52

[2] Gaczoł T.: „Wentylacja jako czynnik kształtowania architektonicznego". Monografia, Kraków 2002. Politechnika Krakowska, Wydział Architektury.

[3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury „W sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie". z dnia 12 kwietnia 2002 r. (Dz.U. Nr 75, poz. 690) ze zmianami.

[4] PN-83/B-03430 (wraz ze zmianą A3:2000) „Wentylacja w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania".

[5] Jędrzejewska-Ścibak T., Sowa J.: „Zdrowe powietrze w domu". Warszawa ,Wydawnictwo MURATOR 2000 s. 47.

[6] Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa: "Poradnik inżyniera i technika budowlanego". Warszawa, Arkady 1968, tom 2 część III, s. 373 oraz 385.

[7] Jędrzejewska-Ścibak T., Sowa J. Praca zbiorowa: „Problemy jakości powietrza wewnętrznego w Polsce ’97”. Warszawa 1998. Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Ogrzewnictwa i Wentylacji.

[8] Jędrzejewska-Ścibak T., Sowa J. Praca zbiorowa: „Problemy jakości powietrza wewnętrznego w Polsce ’99”. Warszawa 2000. Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Środowiska, Instytut Ogrzewnictwa i Wentylacji.

[9] Wojtczak A.: „Choroby wewnętrzne”. Wydawnictwo Lekarskie PZWL Warszawa 1995, tom 2, str. 67,68, oraz str. 120-125, tom 3, s. 876-890.

[10]Wald I.: Członkowska A.: „Neurologia kliniczna”. Państwowy Zakład Wydawnictw Lekarskich. Warszawa 1987, s. 236,237.

GRAVITATIONAL VENTILATION IN RESIDENTIAL PREMISES. CHOSEN QUESTIONS

S u m m a r y

Natural ventilation , involves the exchange of air resulting, due to the pressure difference, which takes place continuously through ventilation ducts. It is an old, well proven and most widely used method of rooms ventilation. Bad design solutions, causing her lack of effective action. Proper air flow has a significant effect on the quality of a building structure. Lack of moisture and fungi is proof of its correct functioning. It is also responsible for psychological comfort and well-being of human being, and above all for health. The paper highlights the need to develop at the stage of conceptual design, building ventilation patterns - vertical and horizontal air flow, depending on the adopted type of supply and discharge its masses of utility, residential premises. Walls location, structural elements of the building, the layout of windows and doors, and even the layout of the permanent equipment of flats, has a significant impact on the air flow direction, and thus the performance of the natural ventilation system. An important problem occurring at the design stage is the selection of the construction and the number of channels corresponding cross-sectional area calculation, depending on their height and space requirements of the designed air flow rate, expressed as multiples of the exchange or the air flow, measured in m^3/s. Good knowledge of issues related to a properly working air pressure is the duty of every architect who is fully responsible for the designed building, and most of all for people who are its users.

Keywords: microclimate, air flow, exhaust air, times of the exchange, air stream

Przesłano do redakcji: 14.04.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.38

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 89-98

Halina GARBALIŃSKA[1]
Bartłomiej MAJKOWSKI[2]

POMIARY SORPCYJNE WSPÓŁCZYNNIKA DYFUZJI WILGOCI RÓŻNEGO RODZAJU ZAPRAW

W referacie przedstawiono możliwość wykorzystania niestacjonarnych pomiarów sorpcyjnych do określenia współczynnika dyfuzji D_m porowatych materiałów budowlanych. Badaniami objęto trzy różne zaprawy: cementową, cementowo-wapienną i modyfikowaną. Eksperyment zrealizowano w 18 klimatach – przy trzech temperaturach: 5, 20, 35°C i przy sześciu poziomach wilgotności względnej powietrza φ. Na podstawie uzyskanych wyników badań sorpcyjnych wyznaczano dla poszczególnych zapraw wartości współczynnika dyfuzji wilgoci odpowiadające różnym temperaturom i różnym poziomom sorpcyjnego zawilgocenia. Przedstawione w referacie obliczenia współczynników dyfuzji D_m bazowały na procedurach typu $\sqrt{t}$ i typu logarytmicznego. Otrzymane rezultaty pozwoliły ocenić użyteczność obydwu procedur w odniesieniu do testowanych materiałów. We wszystkich cyklach i w przypadku każdej z zapraw uzyskiwano zbliżone wartości współczynników $D_m(\sqrt{t})$ i $D_m(\ln)$, co pozwala rekomendować obydwie procedury jako porównywalne. Przeprowadzone badania pozwoliły ponadto ocenić wpływ zawartości wilgoci na wielkość współczynników dyfuzji. Stwierdzono występowanie jednoznacznej tendencji w odniesieniu do każdej temperatury i każdej z badanych zapraw. Zaobserwowano wzrost wartości D_m wraz ze zwiększaniem się wilgotności względnej do poziomu 50%. Dla tego poziomu zawilgocenia materiału współczynnik dyfuzji osiągał wartość maksymalną. Następnie wartość tego współczynnika spadała stopniowo w miarę wzrostu wilgotności. Stwierdzono, że w najszerszym zakresie wilgotności, tj. przy $\varphi \approx 96\%$ współczynniki dyfuzji osiągają wartość minimalną, odpowiadającą zakresowi najniższych wilgotności. Przeprowadzone badania pozwoliły ocenić nie tylko wpływ wilgotności, ale także wpływ temperatury na wyznaczane współczynniki dyfuzji. Obydwie zastosowane metody wykazały znaczący wpływ tego czynnika na wyznaczane wartości współczynników dyfuzji D_m.

Słowa kluczowe: sorpcja, dyfuzja wilgoci, współczynnik dyfuzji, zaprawa, materiał porowaty

[1] Autor do korespondencji: Halina Garbalińska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, 91-449-48-29, Halina.Garbalinska@zut.edu.pl
[2] Doktorant Bartłomiej Majkowski, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, 91-449-48-29, Bartlomiej.Majkowski@zut.edu.pl

1. Wprowadzenie

Typowe materiały budowlane takie jak cegła, beton, zaprawy charakteryzują się strukturą kapilarno-porowatą. Zjawiska transportu wilgoci zachodzące w tych materiałach składają się na bardzo skomplikowany proces. Związane jest to ze złożoną strukturą porowatości w materiałach tego typu, jak również z występowaniem rozmaitych mechanizmów transportu wilgoci, takich jak: dyfuzja, przepływ laminarny, błonkowy, kapilarny, których współudział w globalnym strumieniu wilgoci często zmienia się bardzo znacząco w trakcie trwania procesu, np. wysychania lub nawilżania [1]. W ujęciu fenomenologicznym proces transportu wilgoci w materiale porowatym w zakresie wilgotności sorpcyjnej opisany jest przez współczynnik dyfuzji wilgoci. Współczynnik ten może być wyznaczony z zadowalającą dokładnością jedynie na drodze doświadczalnej [6]. Stanowi on parametr materiałowy, w którym znajduje swój ilościowy wyraz intensywność procesu migracji wilgoci. Przy czym w zależności od wilgotności materiału i stanu wilgotnościowego powietrza w jego bezpośrednim otoczeniu, molekuły wody mogą wnikać w głąb materiału w wyniku procesu sorpcji, albo wędrować w kierunku otoczenia w wyniku procesu desorpcji [1]. W artykule przedstawiono próbę wykorzystania zadania odwrotnego [7], bazującego na zarejestrowanym przebiegu procesu sorpcji, do wyznaczenia współczynnika D_m trzech materiałów budowlanych. Eksperyment zrealizowany został w trzech temperaturach T i sześciu zakresach wilgotności względnej powietrza $\Delta\varphi$. Do wyznaczenia D_m wykorzystano dwie różne procedury obliczeniowe: metodę typu $\sqrt{t}$ – odnoszącą się w swoich założeniach teoretycznych do fazy początkowej procesu [2] oraz metodę logarytmiczną – dotyczącą jego zaawansowanej fazy [3].

2. Opis badań

Do testowania przydatności niestacjonarnej techniki sorpcyjnej wybrano trzy popularne rodzaje zapraw budowlanych – cementową (ZC), modyfikowaną (ZM) oraz cementowo-wapienną (ZCW). Eksperyment objął zakres dodatnich temperatur (T = 5°C, 20°C, 35°C), jakie realnie mogą wystąpić w przeciętnych warunkach budowlanych. Badania w każdej temperaturze realizowano przy sześciu poziomach wilgotności φ, pokrywających niemal cały zakres wilgotności sorpcyjnej (od $\varphi \approx 11\%$ do $\varphi \approx 98\%$).

Eksperyment polegał na wycięciu równoległościennych próbek o grubości 1 cm, następnie zaizolowaniu ich na pobocznicach i umieszczeniu w atmosferze o stałej temperaturze i niezmiennej wilgotności. Wymiana wilgoci między próbką a otoczeniem odbywała się przez dwie powierzchnie czołowe. Próbki w trakcie badań sorpcji przechowywane były w szczelnych pojemnikach o stałej wilgotności oraz w komorach termostatycznych o stałej temperaturze. Dla utrzymania niezmiennej wilgotności względnej powietrza próbki umieszczono

w atmosferze nad nasyconymi roztworami następujących soli: LiCl ($\varphi \approx 11\%$), $MgCl_2$ ($\varphi \approx 32 \div 34\%$), $Mg(NO_3)_2$, ($\varphi \approx 50 \div 59\%$), NaCl ($\varphi \approx 75 \div 76\%$), KCl ($\varphi \approx 83 \div 88\%$), K_2SO_4 ($\varphi \approx 96 \div 98\%$). W zależności od zadanej temperatury wilgotność w szczelnych pojemnikach z różnymi roztworami wykazywała różnice rzędu kilku procent.

Istota pomiarów polegała na rejestracji zmieniającej się masy próbki aż do momentu jej ustabilizowania się. Odstępy między badaniami wynoszące początkowo 6, 8, 12 godzin wydłużono z czasem do 7 dni. Na początku bowiem przyrosty masy były wyraźne, a w miarę zbliżania się do równowagi sorpcyjnej stawały się coraz wolniejsze. Pomiary zmieniającej się masy próbki wykonywane były za pomocą wagi laboratoryjnej o dokładności 1mg.

Przed rozpoczęciem zasadniczego eksperymentu próbki wysuszono do stałej masy, a następnie poddawano procesom sorpcji. Realizowane były one w trzech temperaturach: 5°C, 20°C, 35°C, przy czym każdorazowo badania dotyczyły sześciu coraz to szerszych zakresów wilgotności względnej: $\varphi \approx 0\% \rightarrow \varphi \approx 11\%$, $\varphi \approx 0\% \rightarrow \varphi \approx 32 \div 34\%$, $\varphi \approx 0\% \rightarrow \varphi \approx 50 \div 59\%$, $\varphi \approx 0\% \rightarrow \varphi \approx 75 \div 76\%$, $\varphi \approx 0\% \rightarrow \varphi \approx 75 \div 76\%$, $\varphi \approx 0\% \rightarrow \varphi \approx 75 \div 76\%$.

W założonych w eksperymencie 18 klimatach poddano badaniom sorpcyjnym łącznie 162 próbki. Na podstawie zebranych wyników obliczono dla poszczególnych materiałów wartości współczynników dyfuzji wilgoci odpowiadające różnym temperaturom i różnym poziomom wilgotności.

3. Współczynnik dyfuzji wilgoci

Współczynnik dyfuzji wilgoci D_m może być wyznaczany w pomiarach stacjonarnych bądź niestacjonarnych. W niniejszym artykule przedyskutowano możliwość wykorzystania niestacjonarnej techniki pomiarowej opartej na pomiarach sorpcji, a bazującej na dwóch niezależnych procedurach obliczeniowych. Parametr D_m wyznaczono korzystając z reguły typu $\sqrt{t}$ oraz reguły logarytmicznej. Procedury te odniesione zostały do trzech testowanych materiałów (ZC, ZM, ZCW), które przebadano w trzech wytypowanych temperaturach oraz sześciu ściśle ustalonych poziomach wilgotności powietrza.

W obliczeniach posłużono się wzorami zaproponowanymi w [1]:

• dla procedury $\sqrt{t}$:

$$D_m = a_{\sqrt{t}}^2 \frac{\pi d^2}{16 \Delta m_{max}^2} \tag{1}$$

$$a_{\sqrt{t}} = \frac{\Delta m_t}{\sqrt{t}} \tag{2}$$

• dla procedury logarytmicznej:

$$D_m = -a_{ln}\frac{d^2}{\pi^2} \tag{3}$$

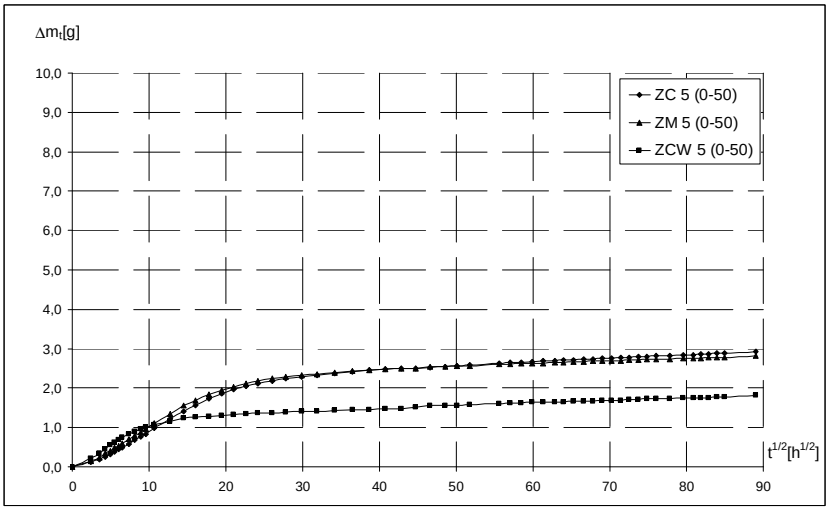
$$a_{ln} = \frac{ln\left(1-\frac{\Delta m_t}{\Delta m_{max}}\right)+0{,}21}{t} \tag{4}$$

gdzie: D_m – współczynnik dyfuzji wilgoci [m^2/h];
$a_{\sqrt{t}}$, $a_{\ln}$ – współczynniki kierunkowe [g/h^{0,5}], [1/h];
d – grubość próbki [m];
Δm_t – zmiana masy po czasie t [g];
Δm_{max} – całkowita zmiana masy [g];
t – czas [h].

Sporządzone odwzorowania funkcji $\Delta m_t = f(\sqrt{t})$ oraz $\ln(1-\Delta m_t/\Delta m_{max}) = f(t)$ dla poszczególnych próbek stanowiły podstawę do wyznaczenia współczynników kierunkowych w odniesieniu do uzyskanych 324 pojedynczych wykresów. Na wykresach odwzorowujących przebieg funkcji $\Delta m_t = f(\sqrt{t})$ ustalano odcinek (przypisany fazie początkowej procesu), cechujący się prostoliniowym przebiegiem i wyznaczano odpowiadający mu współczynnik kierunkowy $a_{\sqrt{t}}$. Z kolei z wykresów przedstawiających przebieg funkcji logarytmicznej $\ln(1-\Delta m_t/\Delta m_{max}) = f(t)$ sczytywano odcinek (przypisany fazie zaawansowanej badanego procesu sorpcji) cechujący się prostoliniowym przebiegiem i wyznaczano odpowiadający mu współczynnik $a_{\ln}$. Dysponując współczynnikami kierunkowymi wyznaczonymi oddzielnie dla każdej próbki o grubości d, obliczano współczynnik dyfuzji przy zastosowaniu niezależnie każdej z reguł, czyli ustalano wartości $D_m(\sqrt{t})$ i $D_m(\ln)$. Dla poszczególnych zakresów $\Delta\varphi$ określano następnie średnią arytmetyczną $D_m(\sqrt{t})$ oraz $D_m(\ln)$, na podstawie wyników uzyskanych w danym pomiarze na trzech próbkach każdego z badanych materiałów, analogicznie jak w pracy [5].

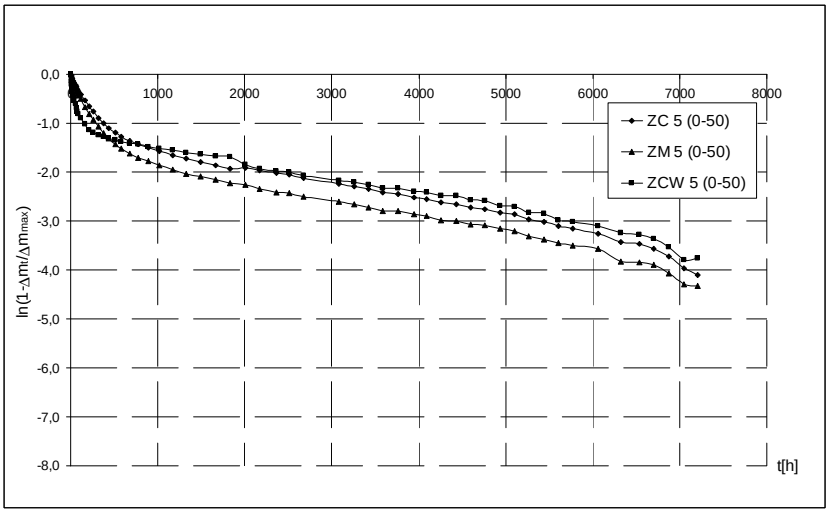
4. Uzyskane wyniki

Dla zilustrowania podstaw obydwu procedur przedstawiono na rysunkach 1÷6 przykładowe wypadkowe wykresy dotyczące trzech badanych zapraw, a odwzorowane w poszczególnych temperaturach T = 5, 20, 35°C w odniesieniu do zakresu wilgotności $\Delta\varphi \approx 0 \rightarrow 50 \div 59\%$.



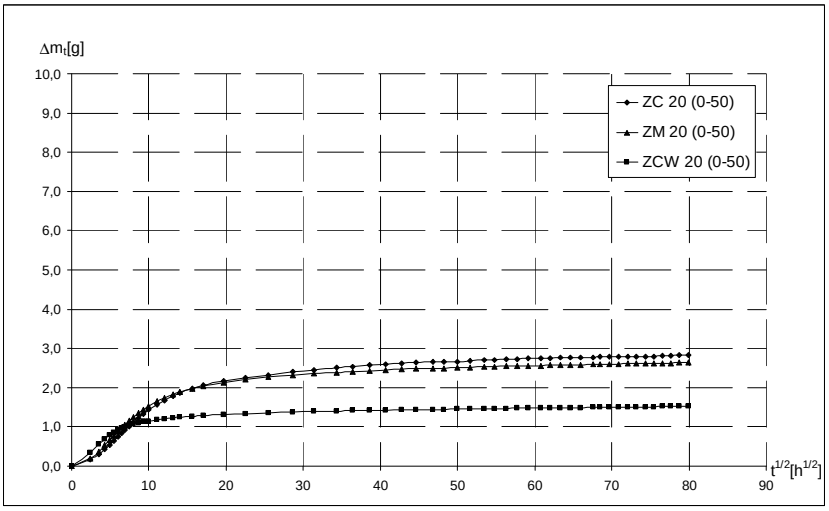
Rys. 1. Wypadkowe przebiegi $\Delta m_t = f(\sqrt{t})$ dla zaprawy cementowej, zaprawy modyfikowanej oraz cementowo-wapiennej w $T = 5^oC$ oraz $\varphi = 0\% \rightarrow 59\%$

Fig. 1. Graph of function $\Delta m_t = f(\sqrt{t})$ for cement mortar, modified mortar and cement-lime mortar at $T = 5^oC$ and $\varphi = 0\% \rightarrow 59\%$



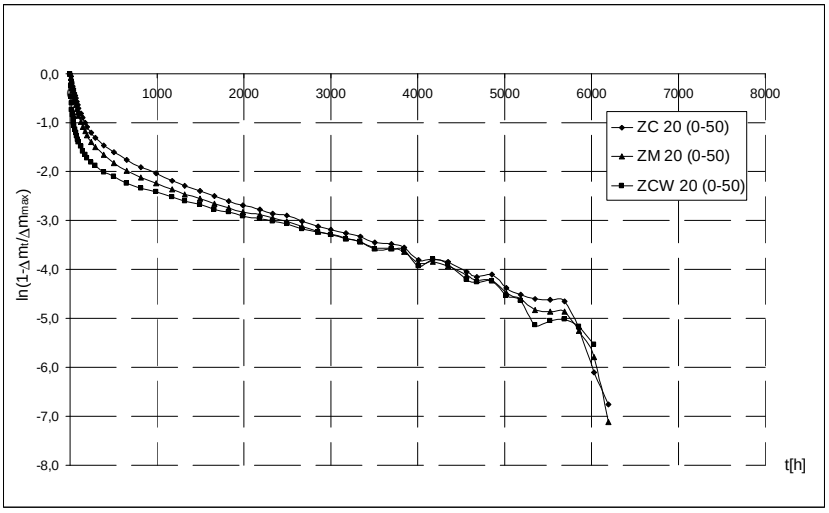
Rys. 2. Wypadkowe przebiegi $\ln(1-\Delta m_t/\Delta m_{max}) = f(t)$ dla zaprawy cementowej, zaprawy modyfikowanej oraz cementowo-wapiennej w $T = 5^oC$ oraz $\varphi = 0\% \rightarrow 59\%$

Fig. 2. Graph of function $\ln(1-\Delta m_t/\Delta m_{max}) = f(t)$ for cement mortar, modified mortar and cement-lime mortar at $T = 5^oC$ and $\varphi = 0\% \rightarrow 59\%$



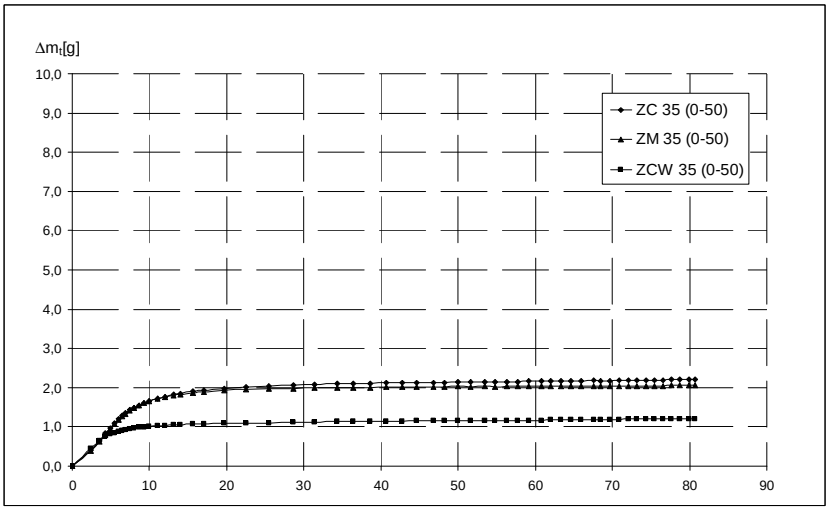
Rys. 3. Wypadkowe przebiegi $\Delta m_t = f(\sqrt{t})$ dla zaprawy cementowej, zaprawy modyfikowanej oraz cementowo-wapiennej w $T = 20^oC$ oraz $\varphi = 0\% \rightarrow 54\%$

Fig. 3 Graph of function $\Delta m_t = f(\sqrt{t})$ for cement mortar, modified mortar and cement-lime mortar at $T = 20^oC$ and $\varphi = 0\% \rightarrow 54\%$



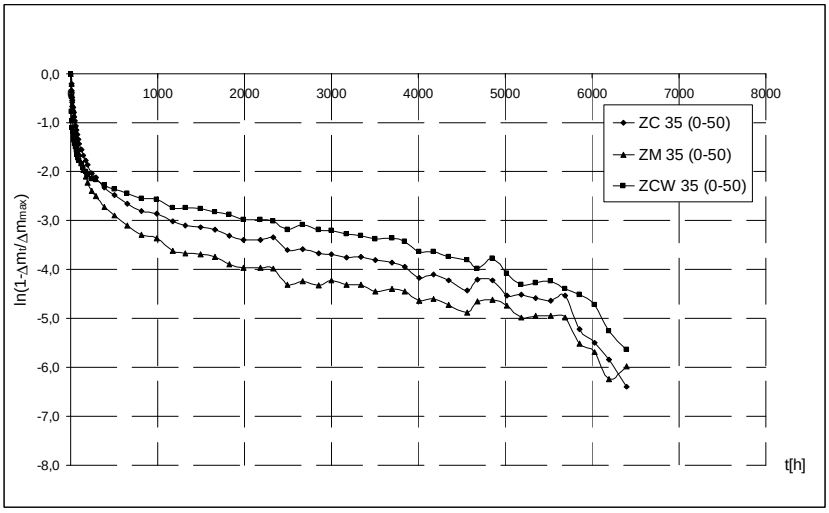
Rys. 4. Wypadkowe przebiegi $\ln(1-\Delta m_t/\Delta m_{max}) = f(t)$ dla zaprawy cementowej, zaprawy modyfikowanej oraz cementowo-wapiennej w $T = 20^oC$ oraz $\varphi = 0\% \rightarrow 54\%$

Fig. 4. Graph of function $\ln(1-\Delta m_t/\Delta m_{max}) = f(t)$ for cement mortar, modified mortar and cement-lime mortar at $T = 20^oC$ and $\varphi = 0\% \rightarrow 54\%$



Rys. 5. Wypadkowe przebiegi $\Delta m_t = f(\sqrt{t})$ dla zaprawy cementowej, zaprawy modyfikowanej oraz cementowo-wapiennej w $T = 35^oC$ oraz $\varphi = 0\% \rightarrow 50\%$

Fig. 5. Graph of function $\Delta m_t = f(\sqrt{t})$ for cement mortar, modified mortar and cement-lime mortar at $T = 35^oC$ and $\varphi = 0\% \rightarrow 50\%$



Rys. 6. Wypadkowe przebiegi $\ln(1-\Delta m_t/\Delta m_{max}) = f(t)$ dla zaprawy cementowej, zaprawy modyfikowanej oraz cementowo-wapiennej w $T = 35^oC$ oraz $\varphi = 0\% \rightarrow 50\%$

Fig. 6. Graph of function $\ln(1-\Delta m_t/\Delta m_{max}) = f(t)$ for cement mortar, modified mortar and cement-lime mortar at $T = 35^oC$ and $\varphi = 0\% \rightarrow 50\%$

Sporządzone wykresy z założenia służą do wyznaczania współczynników kierunkowych $a_{\sqrt{t}}$ oraz $a_{\ln}$, przypisywanych do prostoliniowych odcinków w przebiegach funkcyjnych $\Delta m_t = f(\sqrt{t})$ oraz $\ln(1-\Delta m_t/\Delta m_{max}) = f(t)$. Współczynniki $a_{\sqrt{t}}$ oraz $a_{\ln}$ stanowią podstawę dalszego obliczania współczynników dyfuzji $D_m(\sqrt{t})$ oraz $D_m(\ln)$ odpowiadających danej próbce, badanej sorpcyjnie w danym cyklu o ściśle zdefiniowanych uwarunkowaniach cieplno-wilgotnościowych.

W tabeli 1 zestawiono współczynniki dyfuzji poszczególnych zapraw wyznaczone w $T = 5, 20, 35$°C w kolejno testowanych zakresach wilgotności.

Podane w tabeli współczynniki $D_m(\sqrt{t})$ oraz $D_m(\ln)$ stanowią średnie wartości obliczone na podstawie wyników składowych uzyskanych daną metodą z trzech próbek badanych w danym cyklu.

Tablica 1. Zestawienie wypadkowych wartości D_m wyznaczonych dla testowanych zapraw w pomiarach sorpcyjnych za pomocą metody typu $\sqrt{t}$ oraz metody logarytmicznej.

Table 1. Average values of mass diffusivity D_m of tested mortars found in the sorption measurements by $\sqrt{t}$-type method and logarithmic method.

Zaprawa	Zakres $\Delta\varphi$ [%]	Temperatura 5°C		Temperatura 20°C		Temperatura 35°C	
		$D_m(\sqrt{t})$	$D_m(\ln)$	$D_m(\sqrt{t})$	$D_m(\ln)$	$D_m(\sqrt{t})$	$D_m(\ln)$
ZC	0→11	8,30E-09	8,24E-09	3,84E-08	3,81E-08	6,45E-08	6,11E-08
	0→32÷34	1,85E-08	1,75E-08	6,36E-08	6,15E-08	18,33E-08	17,94E-08
	0→50÷59	2,62E-08	2,52E-08	6,96E-08	6,76E-08	19,99E-08	20,11E-08
	0→75÷76	1,82E-08	1,78E-08	5,41E-08	5,12E-08	15,13E-08	15,28E-08
	0→83÷88	1,37E-08	1,34E-08	3,37E-08	3,36E-08	8,71E-08	9,03E-08
	0→96÷98	8,32E-09	9,06E-09	1,91E-08	1,77E-08	7,07E-08	7,22E-08
ZM	0→11	2,00E-08	2,01E-08	3,00E-08	3,00E-08	8,05E-08	8,14E-08
	0→32÷34	2,85E-08	2,86E-08	7,70E-08	7,67E-08	19,86E-08	19,50E-08
	0→50÷59	3,39E-08	3,48E-08	9,84E-08	9,83E-08	20,23E-08	19,83E-08
	0→75÷76	3,61E-08	3,57E-08	6,78E-08	6,75E-08	17,67E-08	17,39E-08
	0→83÷88	1,56E-08	1,54E-08	4,25E-08	4,27E-08	12,56E-08	12,61E-08
	0→96÷98	9,99E-09	9,96E-09	2,02E-08	2,02E-08	7,05E-08	7,11E-08
ZCW	0→11	5,63E-08	5,37E-08	10,68E-08	10,47E-08	9,68E-08	9,91E-08
	0→32÷34	7,31E-08	7,25E-08	16,20E-08	15,37E-08	26,75E-08	27,30E-08
	0→50÷59	10,78E-08	10,79E-08	26,67E-08	24,36E-08	39,26E-08	37,91E-08
	0→75÷76	3,99E-08	3,93E-08	9,17E-08	9,16E-08	21,25E-08	21,62E-08
	0→83÷88	2,25E-08	2,24E-08	9,64E-08	9,62E-08	18,33E-08	18,38E-08
	0→96÷98	4,70E-09	4,68E-09	2,28E-08	2,30E-08	8,05E-08	7,76E-08

5. Podsumowanie

Zrealizowane badania sorpcyjne, którymi objęto trzy materiały kapilarno-porowate, dowodzą, że dwie testowane procedury sorpcyjne w przypadku takich materiałów jak ZC, ZM i ZCW cechują się dobrym odtworzeniem założeń teoretycznych w przebiegach funkcyjnych $\Delta m_t = f(\sqrt{t})$ oraz $\ln(1-\Delta m_t/\Delta m_{max}) = f(t)$ i w konsekwencji gwarantują poprawne określenie wartości $D_m(\sqrt{t})$ oraz $D_m(\ln)$, na podstawie wyznaczonych wcześniej współczynników kierunkowych $a_{\sqrt{t}}$ oraz $a_{\ln}$. Obydwie procedury obliczeniowe wykorzystane do wyznaczenia D_m dostarczyły zbliżonych wartości tego współczynnika.

Przeprowadzone badania pozwalają ponadto ocenić, jak wpływa na wartość współczynnika dyfuzji zmieniający się zakres wilgotności. Analizując współczynnik D_m z uwagi na zmieniającą się wilgotność można zaobserwować jednoznaczną tendencję obserwowaną w każdej temperaturze i dotyczącą każdej z badanych zapraw. Stwierdza się mianowicie wzrost wartości D_m wraz ze zwiększaniem się wilgotności względnej do poziomu 50%. W miarę dalszego wzrostu wilgotności obserwuje się spadek D_m. Przy badaniach prowadzonych w najszerszym zakresie, tj. przy $\varphi \approx 96\%$ współczynniki D_m osiągają wartość minimalną, zbliżoną do tej wyznaczanej w zakresie najniższych wilgotności.

Zestawione w tabeli 1 dane pozwalają także na ilościową ocenę wpływu temperatury w poszczególnych analizowanych przypadkach. Stwierdza się bardzo znaczące oddziaływanie tego czynnika na wartości D_m. Im wyższa temperatura tym wyższa wartość współczynnika dyfuzji. W zdecydowanej większości przypadków odnotowano wzrosty sięgające kilkuset procent.

Wobec uzyskiwania we wszystkich cyklach zbliżonych wartości współczynników $D_m(\sqrt{t})$ oraz $D_m(\ln)$ w przypadku każdej z zapraw – można uznać obydwie procedury za porównywalne i kwalifikujące się do wyznaczania D_m z niestacjonarnych procesów sorpcji.

Literatura

[1] Garbalińska H.: Izotermiczne współczynniki transportu wilgoci porowatego materiału budowlanego. Prace Naukowe Politechniki Szczecińskiej Nr 571. Szczecin 2002.

[2] Garbalińska H.: Measurement of the mass diffusivity in cement mortar: use of initial rates of water absorption. International Journal of Heat and Mass Transfer 2002 Vol. 45 No. 6, s. 1353-1357.

[3] Garbalińska H.: Application of the logarithmic procedure to absorption measurements of mass diffusivity for cement mortars. Research Journal Heat and Mass Transfer 40, wyd. Springer-Verlag 2004, s. 963-972.

[4] Garbalińska H.: Application of $\sqrt{t}$-type, logarithmic and half-time methods in desorptive measurements of diffusivity in narrow humidity ranges. Cement and Concrete Research 36 (2006), s. 1294-1303.

[5] Garbalińska H., Garbasz B.: Wąsko-przedziałowe pomiary sorpcyjne współczynnika dyfuzji cegły ceramicznej, silikatowej i betonu komórkowego. XI Polska Konfe-

rencja Naukowo-Techniczna Fizyka budowli w Teorii i Praktyce, Czasopismo Naukowe tom II, Sekcja Fizyki Budowli Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN, Łódź 2007, s. 35-40.

[6] Krus M.: Feuchtetransport- und Speicherkoeffizienten poröser mineralischer Baustoffe. Theoretische Grundlagen und neue Meßtechniken. Dissertation, Universität Stuttgart 1995.

[7] Künzel H. M., Kiessl K.: Bestimmung des Wasserdampfdiffusionswiderstandes von mineralischen Baustoffen aus Sorptionsversuchen. Bauphysik 1990 Jg. 12 H. 5, s. 140-150.

SORPTION MEASUREMENTS FOR DEFINING THE MOISTURE DIFFUSION COEFFICIENT OF DIFFERENT KIND OF MORTARS

S u m m a r y

The paper presents possibilities of application of non-stationary sorption measurements to determine the diffusion coefficient D_m of porous building materials. The research covers three different mortars: cement mortar, cement-lime mortar and modified mortar. The experiment was conducted in 18 different types of climate, at the three following temperatures: 5°C, 20°C and 35°C, and at six relative humidity levels φ. Basing of the results of sorption measurements, values of diffusion coefficient D_m were calculated for different mortars, and the particular values obtained referred to various temperatures and various levels of sorption moisture. Calculations of coefficient D_m shown in this paper were based on $\sqrt{t}$-type and logarithmic-type procedures. The obtained results allowed to evaluation the usability of two procedures for the tested materials. In all cycles and for each of the mortars, similar values of coefficients $D_m(\sqrt{t})$ and $D_m(\ln)$ were observed, which enables to recommend the both procedures as comparable ones. Moreover, the research allowed to assess the influence of moisture content on diffusion coefficient values. A clear tendency appeared for each temperature and each of the mortars researched. There was observed increase of the D_m value together with the rise of relative humidity up to the level of 50%. For this level of moisture in the material the diffusion coefficient reached the maximum value. After that, the value of the coefficient was gradually decreasing together with increase of moisture. It was concluded that in the broadest humidity range, i.e. at $\varphi \approx 96\%$, diffusion coefficients reach the minimum values referring to the range of lowest level of moisture. The conducted research allowed to assess not only the influence of moisture but the impact of temperature as well. The both methods showed considerable influence of this factor on D_m values.

Keywords: sorption, moisture diffusion, diffusion coefficient, mortar, porous material

Przesłano do redakcji: 01.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.39

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 99-106

Tomasz GRUDNIEWSKI[1]
Zofia LUBAŃSKA[2]
Sławomir CZERNIK[3]

CHARAKTERYSTYKA AFM CIENKICH WARSTW SnO_2 UZYSKANYCH PODCZAS SPUTTERINGU MAGNETRONOWEGO PRZY WYBRANYCH WARUNKACH PROCESU

Mikroskopia sił atomowych (AFM-*Atomic Force Microscopy*) znajduje obecnie szerokie zastosowanie w dziedzinie charakteryzacji materiałów elektronicznych [1,2]. Oprócz precyzyjnego pomiaru topografii powierzchni z rozdzielczością umożliwiającą obserwowanie warstw atomowych, współczesne urządzenia tego typu oferują wiele dodatkowych możliwości, obejmujących badanie właściwości elektrycznych, magnetycznych jak i zmian zachodzących przy wahaniach temperatury. Jednym z zastosowań może być charakteryzacja otrzymanych warstw na podstawie obserwowanych obrazów struktur oraz powiązanie obserwowanej struktury z parametrami elektro-optycznymi. Szczególnie interesujące są struktury przewodzące prąd, przeźroczyste oraz takie, które absorbują jak najwięcej energii z padającego promieniowania [3-7]. Autorzy w niniejszej pracy wykonali badania metodą mikroskopii sił atomowych (AFM NT-MDT Ntegra Spectra C – Rys.1.) cienkich warstw SnO_2 otrzymanych w procesie napylania w Line 440 Alliance Concept. Postanowiono zbadać zależności pomiędzy topografią warstw a temperaturą procesu napylania, ilością gazów biorących udział w procesie oraz równolegle własnościami elektrycznymi. Starano się odszukać zależności umożliwiające charakteryzowanie parametrów elektro-optycznych warstw SnO_2 (uzyskiwanych w różnych temperaturach) w oparciu o obrazy pozyskane techniką AFM. Autorzy uważają, że badania struktur z wykorzystaniem AFM usprawnią dobór procesów napylania celem otrzymania oczekiwanych własności elektrycznych i optycznych. Otrzymane podczas prac rezultaty pozwalają na chwilę obecną skorelować własności elektro-optyczne warstw z ich topografią oraz procesami wytwarzania. Przeprowadzone eksperymenty pozwoliły w fazie finalnej na otrzyanie przezroczystych tlenków SnO_2 o zakładanej rezystancji.

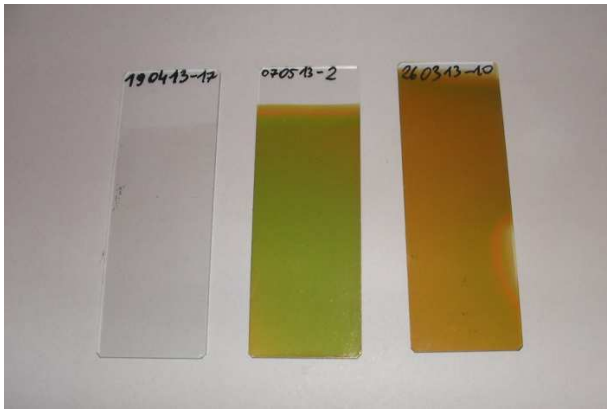
Słowa kluczowe: tlenek cyny, parametry cienkich warstw, elektrody przezroczyste

[1] Autor do korespondencji: Tomasz Grudniewski, Zakład Informatyki, Katedra Nauk Technicznych, Państwowa Szkoła Wyższa, Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska, 833449908, knt@pswbp.pl
[2] Zofia Lubańska, Zakład Informatyki, Katedra Nauk Technicznych, Państwowa Szkoła Wyższa, Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska, 833449908, knt@pswbp.pl
[3] Centrum Badań nad Innowacjami, Państwowa Szkoła Wyższa, Sidorska 105, 21-500 Biała Podlaska, 608619570, czernikslawomir@gmail.com

1. Eksperyment

Proces nanoszenia warstw SnO_2 prowadzono z wykorzystaniem Magnetronu Line 440 Alliance Concept wyposażonym m.in. w target Sn. Warstwy były nanoszone na podłoża szklane (szkiełka Microscope slides LABGLASS). Jako gaz roboczy w procesie napylania magnetronowego zastosowano argon z dodatkiem tlenu w wybranych, na podstawie dotychczasowych eksperymentów, ilościach. Podczas prowadzonych eksperymentów zdecydowano się na zmianę następujących parametrów nanoszenia warstw w procesie sputteringu:

a) zmianie ulegał skład gazów roboczych: tlen od 0 do 30% (stała ilość argonu Ar: 50 sccm i zmienna tlenu O_2: 5 do 20 sccm);
b) czas trwania procesu: uzależniony pośrednio od temperatury i prędkości schładzania rozgrzanej próbki;
c) temperatury: od temperatury pokojowej do 450°C z krokiem 50 ^{o}C.



Rys. 1. Przykładowe zmiany transmisji próbek w zależności od temperatury oraz ilości tlenu

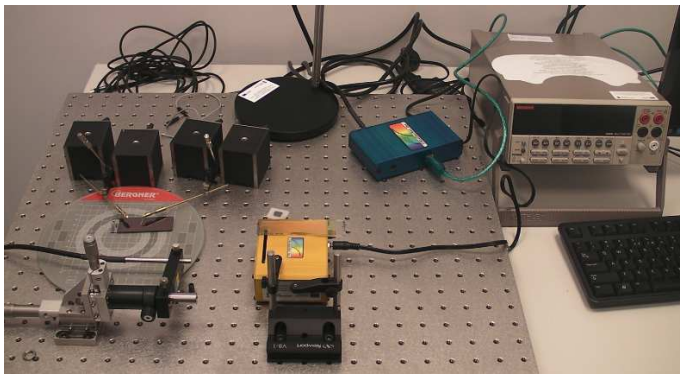
Fig. 1. Transmission change of the prepared samples

Tab. 1. Parametry procesu nanoszenia SnO_2 dla pokazanych na Rys. 1 próbek

Tab. 1. Process parameters of the samples shown on Fig. 1

Próbka	Temperatura procesu [^{o}C]	Ar [sccm]	O_2 [sccm]
190413-17	150	50	20
070513-2	450	50	7,5
260313-10	450	50	20

W wyniku prowadzonych eksperymentów próbowano uzyskać tlenek cyny o jak parametrach oczekiwanych w zastosowaniach elektro - optycznych. Zgodnie z oczekiwaniami były to: jak najszersze spektrum transmisji światła, jak i najmniejsza rezystancja. Pozostającym niewymienionym wcześniej modyfikowalnym czynnikiem jest czas trwania procesu. W przypadku prowadzonych badań czas dla wszystkich procesów był stały i wynosił 5 minut (pozostałe parametry procesu napylania zawarto w Tab. 1). Czas napylania dobrano eksperymentalnie w badaniach poprzedzających – jako minimalny umożliwiający w przypadku SiO_2 otrzymanie mierzalnej optycznie i elektrycznie warstwy. Napylone próbki poddawano procesowi pomiaru rezystancji czteropunktowej (KEIHLEY 2000) oraz transmisji spektralnej (spektrofotometr StellarNet Inc Blue Wave Vis-25) (Rys. 2).

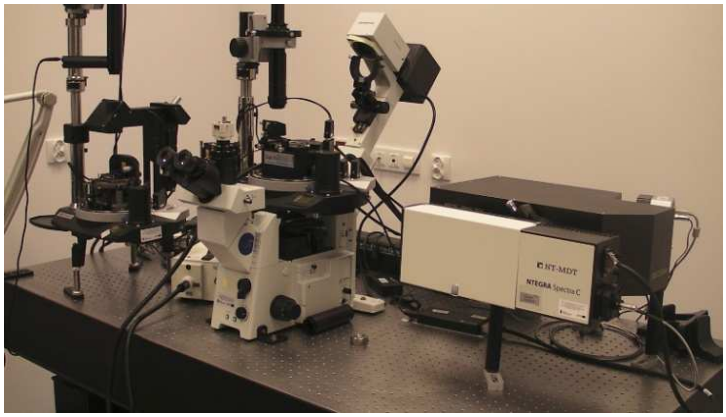


Rys. 2. Układ do pomiaru rezystancji i transmisji

Fig. 2. Transmitance and resistivity measurement setup

Każdą z wykonanych próbek obserwowano pod kątem zmian w proporcjach składu chemicznego z wykorzystaniem SwiftED 3000 (X-Ray Microanalysis for Hitachi Electron Microscope TM3000).

Ze względu na równoległe prace nad modyfikacją topografii napylanych warstw (zwiększenie pola powierzchni absorbującej promieniowanie poprzez modyfikację topografii) postanowiono zbadać zależność pomiędzy tworzonymi warstwami a ich topografią z wykorzystaniem mikroskopii AFM. Pomiary AFM wykonano metodą kontaktową (*ang. contact mode*), przy użyciu tipów krzemowych o grubośći: 0,3mm (CSG10). W trybie kontaktowym zmiany siły odpychającej pomiędzy igłą sondy a podłożem w trakcie skanowania stanowią podstawę obrazowania topografii powierzchni. Sygnałem używanym do tego obrazowania jest sygnał podawany do skanera w kierunku prostopadłym do powierzchni przy utrzymywaniu prawie stałej siły pomiędzy ostrzem a podłożem, w pętli sprzężenia zwrotnego. W niniejszej pracy obrazy uzyskano za pomocą oprogramowania NOVA 1.1.0.1824 wersja do rejestracji i analizy obrazu do przetwarzania otrzymanych wyników.

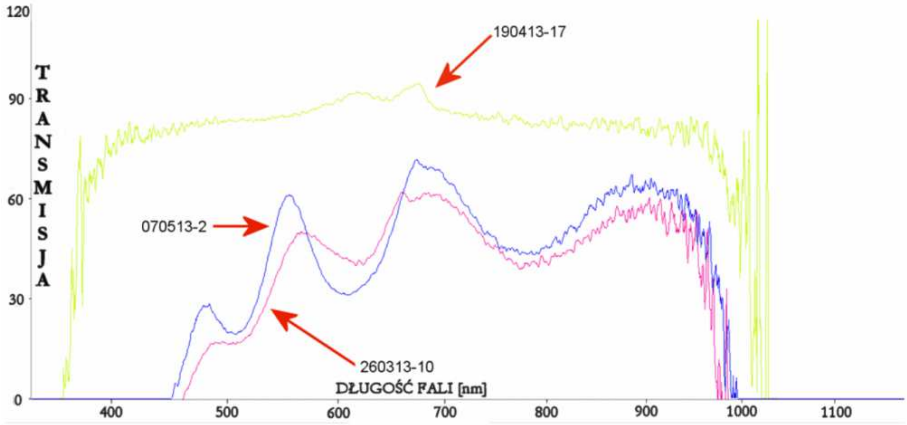


Rys. 3. Użyty w eksperymencie mikroskop sił atomowych NT-MDT Ntegra Spectra C

Fig. 3. Used in experiments AFM microscope NT-MDT Ntegra Spectra C

2. Wyniki badań

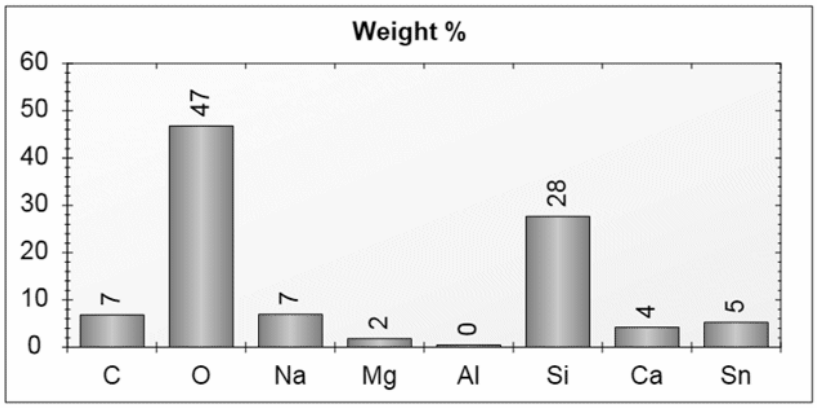
Rezultaty badań transmisji światła przez wybrane próbki zaprezentowano na Rys. 4 (są to wybrane próbki o skrajnych obserwowanych wartościach transmisji). Zgodnie z obserwacjami największym pochłanianiem cechowała się próbka 260313-10.



Rys. 4. Spektrum transmisji światła dla wybranych próbek

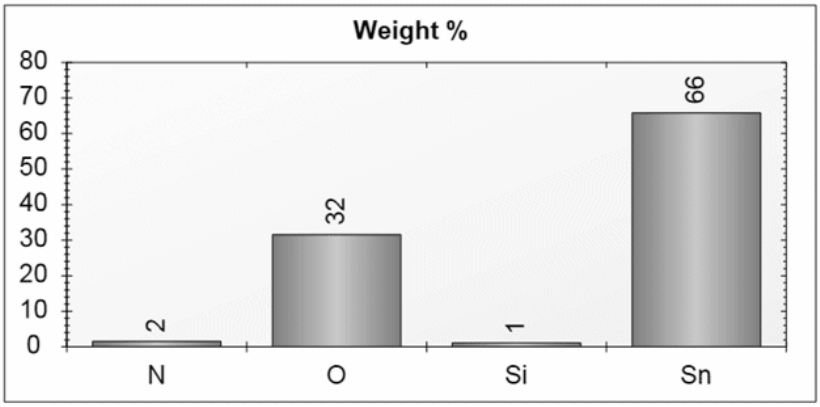
Fig. 4. Transmission spectra for the selected samples

Równolegle do badań nad rezystancją i transmisją próbek przeprowadzono analizę zmian składu chemicznego otrzymanych w warstw. Przykłady obserwacji składu dla próbek o maksymalnej i minimalnej transmisji zaprezentowano na Rys. 5 i Rys. 6.



Rys. 5. Skład chemiczny próbki 260313-10

Fig. 5. Chemical composition of the 260313-10 sample



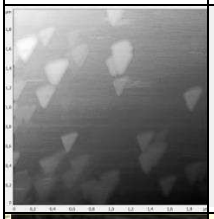
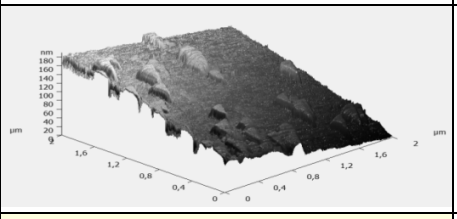
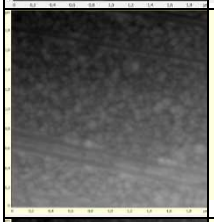
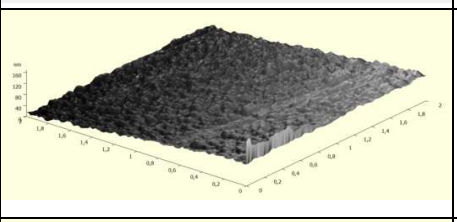
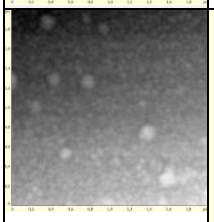
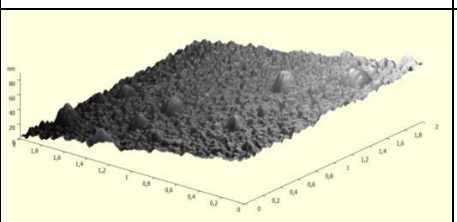
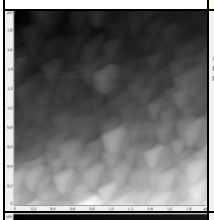
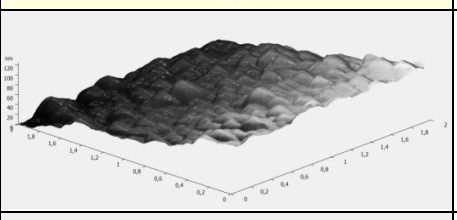
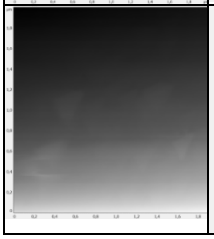
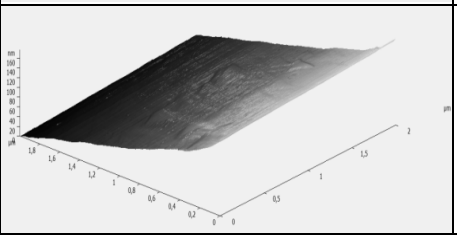
Rys. 6. Skład chemiczny próbki 190413-17

Fig. 6. Chemical composition of the 190413-17 sample

Obrazy AFM warstwy SnO_2, wytworzonej na podłożu szklanym metodą magnetronowego napylania w różnych temperaturach zawarto w tabeli (Tab. 2). Na ich podstawie można stwierdzić dużą jednorodność powierzchni warstw – zaobserwowano związek pomiędzy uporządkowaniem otrzymanej warstwy a jej własnościami elektrycznymi.

Tab. 2. Obrazy AFM 2D/3D 2µm x 2µm warstwy SnO_2 wytworzonej metodą rozpylania magnetronowego oraz odpowiadające im parametry procesu i rezystancja dla wybranych próbek

Tab. 2. AFM 2D/3D 2µm x 2µm images of the SnO_2 layer prepared in magnetron sputtering

2D	3D	T [°C]	O [sccm]	Ar [sccm]	R [Ω]
		250	20	50	0,1 MΩ
		250	5	50	150 Ω
		450	20	50	3 MΩ
		450	5	50	350 Ω
		150	20	50	2,1 MΩ

3. Wnioski

Badania morfologii powierzchni metodą mikroskopii AFM wykazały, że:

1) topografia powierzchni zależy od temperatury zastosowanej w procesie sputteringu;
2) potwierdzono, że cienkie warstwy SnO_2 mają strukturę krystaliczną;
3) rezystancja zależy od temperatury oraz składu gazów roboczych oraz daje się ją powiązać z chropowatością obserwowaną techniką AFM;
4) najlepszą (najmniejszą) rezystancję warstwy wraz z relatywnie dobrą transparentnością otrzymano dla próbek nanoszonych w atmosferze zawierającej 7-15 % tlenu;
5) na podstawie przeprowadzonych badań można powiązać topografię otrzymanych próbek SiO_2 z ich parametrami elektro-optycznymi; z obserwacji jednoznacznie wynika, że niejednorodność powierzchni struktury SiO_2 wpływa pozytywnie na rezystancję.

Literatura

[1] A. Bosseboeuf, M. Dupeux, M. Boutry, T. Bourouina, D. Bouchier, D. Débarre, *Characterization on W Films on Si and SiO2/Si Substrates by X-Ray Diffraction, AFM and Blister Test Adhesion Measurements,* Microsc. Microanal. Microstuct. 8 (1997) 261-272.

[2] M. Batzill, U. Diebold, *The surface and materials science of thin oxide*, Progress in Surface Science 79 (2005) 47-154.

[3] Posadowski W. M.: Pulsed magnetron sputtering of reactive compounds, Thin Solid Films, vol. 343–344 (1999), s. 85–89.

[4] Musil J., Baroch P., Vlcek J., Nam K.H., Han J.G.: Reactive magnetron sputtering of thin films: present and trends, Thin Solid Films, vol. 475 (2005), s. 208–218.

[5] Kaczmarek D.: Modyfikacja wybranych właściwości cienkich warstw TiO_2, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.

[6] Gurlo A.: Interplay between O_2 and SnO_2: Oxygen ionosorption and Spectroscopic Evidence for Adsorbed Oxygen. ChemPhysChem, 7 (2006) 2041–2052.

[7] Izydorczyk W., Adamowicz B., Miczek M., Waczyński K.: Computer analysis of an influence of oxygen vacancies on the electronic properties of the SnO2 surface and near-surface region. Physica Status Solidi (a), 203 (2006) 2241.

AFM CHARACTERIZATION OF SNO2 THIN FILMS OBTAINED BY MAGNETRON SPUTTERING IN LINE 440 SETUP USING DIFFERENT PROCESS COMPONENTS

S u m m a r y

Atomic force microscopy is one of the most popular method used in surface imaging. This method allows to measure the surface topography and determine the dimensions of the structures in the subatomic resolution [1]. Due to its properties, it can be applied to the measurement of conductors and semiconductor surfaces prepared in various processes. The experiment is focused on SnO_2 and ITO thin layers which can be used as transparent electrodes [2]. The authors are trying to illustrate the correlation between process parameters - creation of semiconductor in magnetron sputtering by different process conditions (temperature and cooling process, gas pressure and composition), surface of the sample and its other electro-optical parameters. The authors of this research performed experiments using atomic force microscope (AFM NT-MDT Ntegra Spectra C - Fig.1.). SnO2 thin films were prepared in a sputtering system Line 440 Alliance Concept. It was decided to examine the relationship between the topography of the layers and the temperature of the sputtering process, the amount of gas involved in the process and parallel electrical properties. Attempts were made to find a relationship permitting the characterization of the electro-optical parameters SnO2 layer (obtained at different temperatures) based on the obtained AFM images. The authors believe that the study of structures using AFM facilitate the selection process in order to obtain the expected sputtering electrical and optical properties. Results obtained during the work permit at the moment correlate the electro-optical properties of the layers of their topography and manufacturing processes.

Keywords: tin oxide, thin film parameters, transparent electrodes

Przesłano do redakcji: 15.04.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.40

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 107-116

Andrzej GRZEBIELEC[1]
Artur RUSOWICZ[2]

WYKORZYSTANIE GRUNTOWYCH POMP CIEPŁA W SYSTEMACH KLIMATYZACJI

Pompy ciepła, współpracujące z gruntowymi wymiennikami ciepła są urządzeniami charakteryzującymi się jednymi z wyższych współczynników efektywności wśród pomp ciepła. Lepsze efekty udaje się osiągnąć jedynie w przypadku urządzeń współpracujących z wodą gruntową. Najgorsze, z punktu widzenia efektywności energetycznej są rozwiązania wykorzystujące powietrze atmosferyczne jako dolne źródło ciepła. Nie mniej jednak, z punktu widzenia ekonomii daleko im do rozwiązań z kotłami węglowymi czy nawet gazowymi. Głównym problemem są koszty inwestycyjne. W przypadku instalacji z pompami ciepła koszty inwestycyjne są od kilku do kilkunastu razy wyższe. Celem pracy jest określenie, w jaki sposób można poprawić ekonomiczny aspekt pracy pomp ciepła poprzez wykorzystanie ich w systemach klimatyzacji w okresie letnim. W celu modelowania pracy układu został wykorzystany model ASHRAE dla wymienników gruntowych pionowych dla polskich warunków atmosferycznych. Wyniki pracy pokazują, że istniejącą instalację z pompą ciepła można wykorzystać do celów klimatyzacyjnych, a dodatkowo, w znaczący sposób można poprawić efektywność pracy układów klimatyzacji (25%). Wynika to z faktu, że w tego typu rozwiązaniach górnym źródłem ciepła, w systemach klimatyzacji jest grunt a nie powietrze atmosferyczne. Grunt w okresie letnim charakteryzuje się niższą temperaturą niż powietrze atmosferyczne. Wszystkie te czynniki powodują, że bilans ekonomiczny instalacji z pompą ciepła robi się coraz bardziej korzystny. Jednak, aby osiągnąć jak najlepsze rozwiązanie, należy współpracę systemu grzewczego z systemem klimatyzacji uwzględnić już na poziomie projektowania budynku.

Słowa kluczowe: pompy ciepła, wymienniki gruntowe, klimatyzacja, efektywność energetyczna, modelowanie matematyczne

1. Wprowadzenie

Pompy ciepła są urządzeniami grzewczymi wykorzystywanymi do ogrzewania budynków, ale także wykorzystywanymi w innych procesach na przykład w suszarnictwie [5]. Można spotkać także hybrydy łączące w sobie pompy cie-

[1] Autor do korespondencji: Andrzej Grzebielec, Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Cieplnej, 00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 21/25, +48 22 234 52 32, angrzeb@itc.pw.edu.pl
[2] Artur Rusowicz, Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Cieplnej, 00-665 Warszawa, ul. Nowowiejska 21/25, +48 22 234 52 21, rusowicz@itc.pw.edu.pl

pła i kolektory słoneczne [2]. Pompy ciepła realizują obiegi lewobieżne. Obiegi lewobieżne są realizowane także przez układy klimatyzacji czy chłodniczo-mroźnicze [8]. Ich zadaniem jest transportowanie ciepła ze środowiska o temperaturze niższej do środowiska o temperaturze wyższej. Urządzenia te, wykorzystują najczęściej energię mechaniczną (z technicznego punktu widzenia są to sprężarki). Warto wspomnieć, że w technice można spotkać także inne sposoby realizacji obiegów lewobieżnych, są to pompy ciepła: absorpcyjne, adsorpcyjne, termoelektryczne, termoakustyczne czy magnetyczne [5]. W chwili obecnej to właśnie urządzenia sprężarkowe są najczęściej spotykane. Wynika to z dwóch faktów: ceny urządzenia oraz wysokich współczynników efektywności tego typu rozwiązania w porównaniu z innymi pompami ciepła.

Uwzględniając koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, pompom ciepła nadal daleko do rozwiązań, w których stosuje się kotły węglowe czy gazowe. Analizy ekonomiczne pokazują, że czas zwrotu inwestycji w pompę ciepła to okres kilkudziesięciu lat. Trzeba pamiętać, że najdłużej, co 20 lat, instalację trzeba wymieniać na zupełnie nową. Tak więc inwestycja jest nieopłacalna.

Pompy ciepła w porównaniu z kotłami mają jednak zaletę, można je wykorzystać do celów klimatyzacyjnych. A komfort cieplny coraz bardziej staje się istotny dla Polaków w okresie wiosenno, letnio, jesiennym. I systemy klimatyzacji stają się coraz bardziej popularne i to nie tylko w budynkach użyteczności publicznej czy biurowcach, ale także w budownictwie mieszkaniowym. Kotły także da się wykorzystać w systemach klimatyzacji realizując obiegi adsorpcyjne, absorpcyjne czy termoakustyczne jednak ich efektywność jest kilka razy niższa niż układów sprężarkowych, co sprawia, że ekonomicznie jest to nieopłacalne.

Rozwiązania stosowane w budynkach użyteczności publicznej czy biurowcach są powszechnie znane, poza tym w ich działaniu często priorytetem nie jest ekonomia tylko komfort cieplny. Dlatego w artykule skupiono się na rozwiązaniach dedykowanych dla budownictwa mieszkaniowego - głównie domków jednorodzinnych.

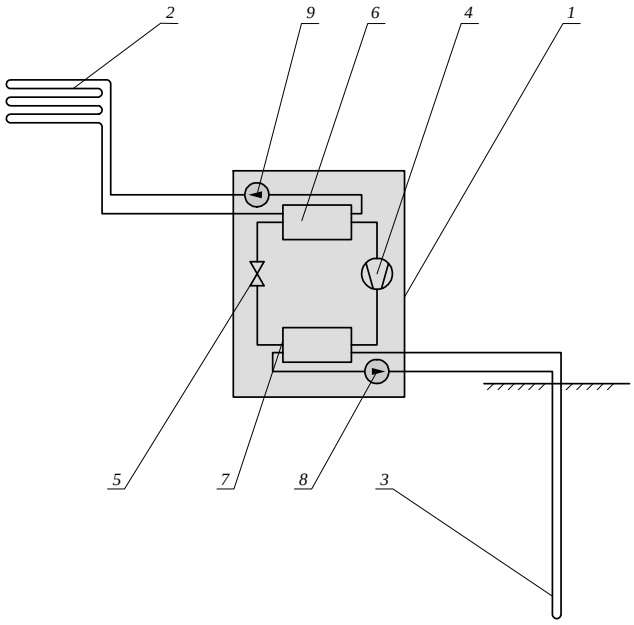
2. Metody wykorzystania pomp ciepła w systemach klimatyzacji

Obecnie dostępne na rynku pompy ciepła zazwyczaj wyposażone są w zawór czterodrogowy, który umożliwia zmianę kierunku transportu ciepła. Zimą ciepło transportowane jest z gruntu do budynku, latem ciepło transportowane jest z budynku do gruntu. Fizycznie realizowane jest to w ten sposób, że parownik ze skraplaczem zmieniają swoje role.

Pompy ciepła można zintegrować z systemami klimatyzacji na kilka sposobów. Zależy to od systemu klimatyzacji, sposobu ogrzewania budynku, a także od momentu, w którym następuje integracja obu systemów. Najlepszym momentem jest integracja na poziomie projektowania budynku oraz obu systemów. Jednak najczęstsza praktyka jest taka, że integracja następuje w późniejszej fazie poprzez dołożenie systemu klimatyzacji do istniejącego systemu ogrzewania.

2.1. Układy klimatyzacji pośredniej

Układy pośrednie charakteryzują się tym, że powietrze znajdujące się w pomieszczeniach chłodzone jest z wykorzystaniem czynnika pośredniczącego. Najczęściej tym czynnikiem jest woda, gdyż układy te pracują w zakresie temperatury od +7 do +12 °C. Coraz bardziej popularne są rozwiązania z wykorzystaniem materiałów PCM, które umożliwiają magazynowanie pewnej ilości ciepła (chłodu) [3,9]. Wśród tych systemów można wyróżnić dwa rodzaje rozwiązań. Tak zwaną klimatyzację podłogową (rysunek nr 1), jak i klimatyzację wykorzystującą wymienniki naścienne czy klimakonwektory.



Rys. 1. Pompa ciepła wykorzystywana do chłodzenia podłogowego (1 - pompa ciepła, 2 - wymiennik podłogowy, 3 - pionowy wymiennik gruntowy, 4 - sprężarka, 5 - zawór rozprężny, 6 - wymiennik pełniący rolę parownika, 7 - wymiennik pełniący rolę skraplacza, 8 - pompa obiegowa wodnego roztworu glikolu, 9 - pompa obiegowa wody lodowej)

Fig. 1. The heat pump used for floor cooling systems (1 - heat pump, 2 - floor heat exchanger, 3 - vertical ground heat exchanger, 4 - compressor, 5 - expansion valve, 6 - evaporator, 7 - condenser, 8 - glycol punp, 9 - chilled water circulation pump)

Pomimo wielu wad, chłodzenie podłogowe jest najczęściej spotykane w tego typu układach klimatyzacji pośredniej, gdyż uruchomienie tego typu klimatyzacji to tylko zmiana trybu pracy pompy ciepła, wykorzystującej zasadę działania zaworu czterodrogowego. Oznacza to, że każdy kto posiada pompę ciepła przeznaczoną do ogrzewania podłogowego, automatycznie posiada także

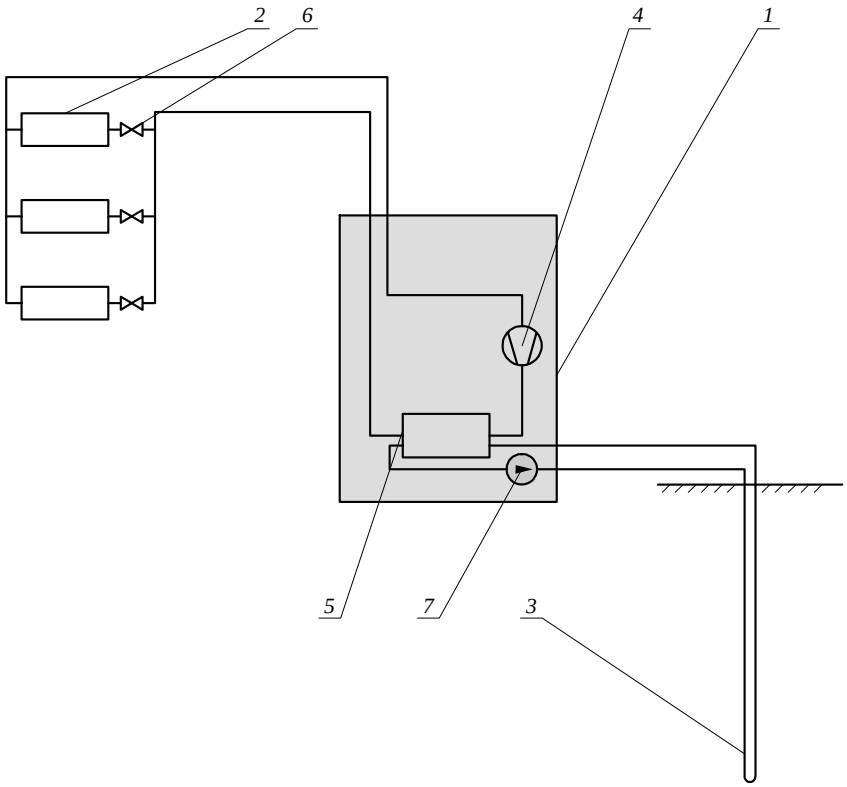
możliwość wykorzystania jej do klimatyzacji podłogowej. Ograniczeniem jest tutaj jedynie sposób integracji pompy ciepła z systemem ciepłej wody użytkowej. Rozwiązanie to posiada dwie główne wady. Pierwsza z nich to efekt tak zwanej zimnej podłogi. Ludzie generalnie preferują ciepłą podłogę a chłodniejsze powietrze na wysokości głowy. Druga wada to możliwość wykraplania się pary wodnej na powierzchni podłogi. Stosując klimakonwektory istnieje możliwość odprowadzania skroplin i unika się zimnej podłogi.

2.2. Układy klimatyzacji bezpośredniej

Klimatyzacja bezpośrednia musi być przewidziana na poziomie projektu, gdyż czynnik roboczy pomp ciepła dopływa bezpośrednio do wymienników ciepła znajdujących się w poszczególnych pomieszczeniach, gdzie przez zmianę fazy realizuje proces grzania lub chłodzenia powietrza. Na schemacie (rys. 2) została zaprezentowana pompa ciepła zintegrowana z tego typu systemem. W każdym pomieszczeniu, które należy ogrzewać czy chłodzić musi znajdować się co najmniej jeden wymiennik ciepła. Rozwiązania te są generalnie kojarzone z układami klimatyzacji o nazwach VRV[3] czy VRF[4], co na język polski tłumaczy się jako układy ze zmiennym przepływem czynnika chłodniczego. Układy te charakteryzują się wysokimi współczynnikami efektywności zarówno chłodniczej jak i grzewczej natomiast posiadają kilka wad. Układy są rozległe co powoduje, że ewentualne nieszczelności są trudne do wykrycia. Ze względu na zmienny przepływ czynnika roboczego w układach pojawiają się problemy ze smarowaniem sprężarki, gdyż olej nie zawsze krąży w sposób optymalny. Układy ze zmiennym przepływem czynnika roboczego występują w dwóch typach: dwururowe i trójrurowe. Na schemacie (rys. 2) został pokazany układ dwururowy co powoduje, że cała instalacja pracuje albo jako pompa ciepła albo jako układ klimatyzacji. W układach trójrurowych istnieje możliwość, ustawiania trybu pracy dla każdego wymiennika. Takie rozwiązanie jest szczególnie przydatne dla budynków mocno przeszklonych, gdzie w okresie wiosennym czy jesiennym południowe strony trzeba ochładzać, a północne ogrzewać.

Innym rozwiązaniem klimatyzacji bezpośredniej jest wykorzystanie pompy ciepła w systemach z wentylacją kanałową (rysunek 3). Legislacja Unii Europejskiej przewiduje, że za kilka lat wszystkie nowo powstające domy muszą charakteryzować się bardzo niskimi współczynnikami zużycia energii. Ograniczanie przewodności cieplnej przegród budowlanych jest faktem i już w chwili obecnej większość strat ciepła z budynku to straty wentylacyjne. W celu obniżenia strat wentylacyjnych przewidywane jest, że wszystkie budynki będą wyposażone w systemy wentylacji mechanicznej oraz w rekuperatory.

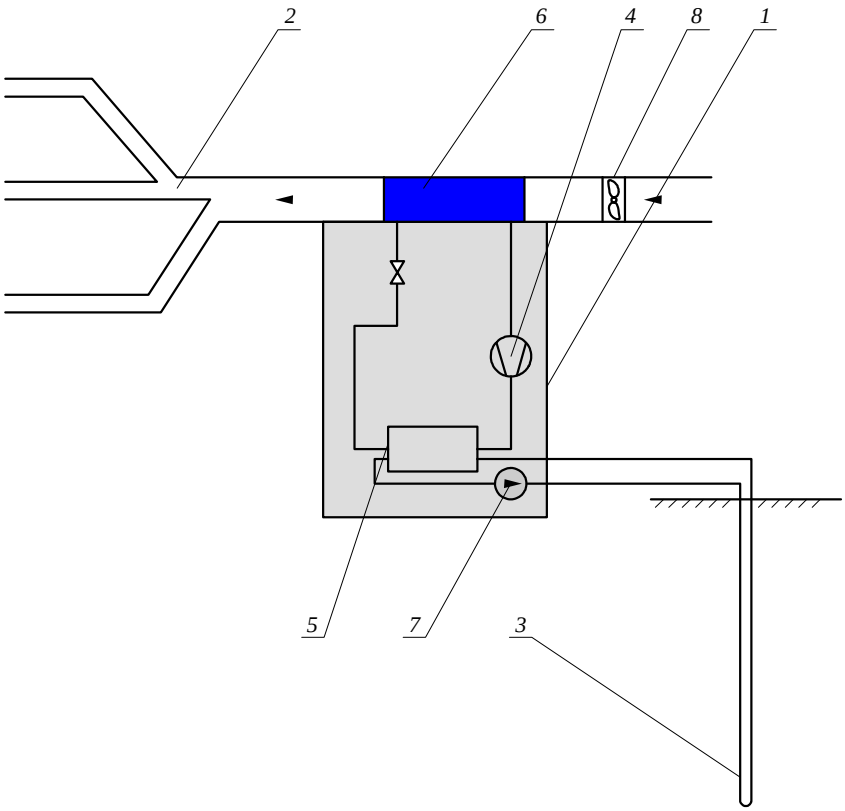
[3] VRV - Variable Refrigerant Volume - zmienna objętość przepływającego czynnika chłodniczego
[4] VRF - Variable Refrigerant Flow - zmienny przepływ czynnika chłodniczego



Rys. 2. Pompa ciepła wykorzystywana w układach bezpośredniego odparowania (1 - pompa ciepła, 2 - parownik układu sprężarkowego, 3 - pionowy wymiennik gruntowy, 4 - sprężarka, 5 - wymiennik pełniący rolę skraplacza, 6 - zawór rozprężny, 7 - pompa obiegowa wodnego roztworu glikolu)

Fig. 2. The heat pump used in direct expansion systems (1 - heat pump, 2 - evaporators, 3 - vertical ground heat exchanger, 4 - compressor, 5 - condenser, 6 -, expansion valve, 7 - glycol pump)

Powszechne wykorzystanie rekuperatorów spowoduje, że budynki będą wyposażone w kanałowy system dostarczania świeżego powietrza do budynku. Jeżeli w budynku znajduje się kanałowa wentylacja mechaniczna z powodzeniem można ją wykorzystać do celów grzewczych jak i klimatyzacyjnych. W głównym kanale należy umieścić wymiennik pompy ciepła. Podobnie jak w poprzednim wypadku system ten musi być przewidziany w momencie projektowania budynku, gdyż do istniejącego systemu wentylacji mechanicznej najczęściej nie będzie można dołożyć wymienników. Jeśli system wentylacji przewidziany jest tylko do dostarczania świeżego powietrza, to strumień powietrza będzie niewystarczający aby przenieść także wymaganą ilość ciepła. W tym celu system wentylacji musi być wyposażony w komorę mieszania, a część powietrza musi być zawracana.



Rys. 3. Pompa ciepła współpracująca z kanałowym systemem chłodzenia (1 - pompa ciepła, 2 - system kanałów wentylacyjnych, 3 - pionowy wymiennik gruntowy, 4 - sprężarka, 5 - wymiennik pełniący rolę skraplacza, 6 - kanałowy parownik, 7 - pompa obiegowa wodnego roztworu glikolu, 8 - wentylator)

Fig. 3. The heat pump works with ventilation system (1 - heat pump, 2 - air ducts, 3 - vertical ground heat exchanger, 4 - compressor, 5 - condenser, 6 - evaporator, 7 - glycol pump, 8 - fan)

3. Metodologia badań

Ze względu na fakt, że budynki będą coraz bardziej energooszczędne, rozwiązaniem, które będzie najbardziej popularne, to układ składający się z pompy ciepła z wymiennikami gruntowymi pionowymi, wentylacją mechaniczną kanałową, wyposażoną w rekuperator. Z tego powodu modelowaniu matematycznemu zostanie poddany obiekt zbudowany właśnie w takiej konfiguracji. Układ został przedstawiony na schemacie (rys. 3). W przypadku zastosowania układu wentylacji do dostarczania lub odbierania ciepła do/z pomieszczeń kanały muszą być większe niż w przypadku stosowania ich jedynie do dostarczania wymaganej ilości świeżego powietrza. Jednak niewątpliwą zaletą tego rozwiązania

jest fakt, że pompa ciepła będzie pracować ze zdecydowanie lepszymi współczynnikami efektywności niż w przypadku ogrzewania podłogowego. Jest to spowodowane niższą temperaturą górnego źródła ciepła. Powietrze należy ogrzewać do temperatury około 22°C, a w przypadku wody płynącej w grzejnikach podłogowych czy klimakonwektorach należy ją podgrzać do co najmniej 40°C. Podobnie sytuacja ma się w przypadku klimatyzacji. Powietrze należy ochłodzić do 25°C, a w przypadku układów pośrednich, wodę lodową standardowo schładza się do 7°C.

Czynnik roboczy, jaki zostanie zastosowany w układzie pompy ciepła, to czynnik R407C, jeden z popularniejszych w chwili obecnej czynników roboczych stosowanych w sprężarkowych pompach ciepła [6].

4. Model obliczeniowy

Do obliczeń został przystosowany model proponowany przez ASHRAE [1], w którym wyznacza się, jak głęboki powinien być odwiert w przypadku gdy pompa ciepła jest wykorzystywana do celów grzewczych (równanie 1) oraz jak głęboki powinien być odwiert w przypadku, gdy pompę ciepła wykorzystuje się do celów klimatyzacji (równanie 2).

$$L_h = \frac{q_a R_{ga} + (q_{lh} - W_h)(R_p + PLF_m R_{gm} + R_{gd} F_{sc})}{t_g - \frac{t_{wi} + t_{wo}}{2} - t_p} \tag{1}$$

$$L_c = \frac{q_a R_{ga} + (q_{lc} - W_c)(R_p + PLF_m R_{gm} + R_{gd} F_{sc})}{t_g - \frac{t_{wi} + t_{wo}}{2} - t_p} \tag{2}$$

gdzie:
F_{sc} – współczynnik strat cieplnych wynikających z przekazywania ciepła z rurki do rurki (w jednej roztwór glikolu płynie w dół, w drugiej do góry),
L_c – wymagana długość odwiertu dla układu klimatyzacji,
L_h – wymagana długość odwiertu dla układów ogrzewania grzania,
PLF_m – współczynnik określający ile miesięcznie pompa ciepła będzie pracować, 0 – oznacza, że nie będzie wcale pracować, 1 – że przez 100% czasu będzie włączona,
q_a – średni roczny strumień ciepła dostarczanego do gruntu (uwzględniający pracę pompy ciepła, zarówno jako urządzenie grzejne jak i klimatyzacyjne),
q_{lc} – zapotrzebowanie budynku na chłód w kW,
q_{lh} – obliczeniowe zapotrzebowanie budynku na ciepło w kW,
R_{ga} – efektywny opór cieplny gruntu dla impulsu rocznego, (m·K)/kW;

R_{gd} – efektywny opór cieplny gruntu dla impulsu dziennego, (m·K)/kW;
R_{gm} – efektywny opór cieplny gruntu dla impulsu miesięcznego, (m·K)/kW;
R_p – opór cieplny przewodzenia przez rurkę;
t_g – niezmienna średnia roczna temperatura gruntu, ^oC;
t_p – temperatura obniżenia/podniesienia niezmiennej temperatury gruntu, wywołana odwiertami w pobliżu modelowanego odwiertu.
t_{wi} – temperatura cieczy przy wlocie do wymiennika pompy ciepła;
t_{wo} – temperatura cieczy przy wylocie z wymiennika pompy ciepła;
W_c – moc elektryczna pompy ciepła podczas chłodzenia;
W_h – moc elektryczna pompy ciepła podczas grzania;

Projektując układ jednocześnie przeznaczony do grzania oraz chłodzenia, należy wybrać dłuższy z odwiertów. Stosując metod różnic skończonych wyznaczone zostały godzinowe parametry glikolu wpływającego i wypływającego z wymiennika. Na podstawie tej wartości określona została temperatura przemiany fazowej czynnika R407C w wymienniku pompy ciepła. Analogiczne obliczenia dla systemu wentylacyjnego oraz danych meteorologicznych [12] pozwoliły wyznaczyć temperaturę przemiany fazowej w drugim wymienniku pompy ciepła. Na podstawie temperatur została wyznaczona godzinowa efektywność pompy ciepła. W ten sposób uzyskano efektywność układu dla każdej godziny w roku.

5. Wyniki obliczeń

Na podstawie obliczeń zostało określone jaki wpływ na system klimatyzacji ma wykorzystanie pompy ciepła współpracującej z wymiennikiem gruntowym. Dla modelowanego budynku pracującego z klimatyzacją ze skraplaczami chłodzonymi przez powietrze zewnętrze z czynnikiem roboczym R407C, średnioroczny współczynnik efektywności chłodniczej wyniósł 3,38. Natomiast wykorzystując pompę ciepła współczynnik efektywności wzrósł do 4,5. Wynika to z faktu, że temperatura skraplania w tym drugim przypadku była niższa o 10 K. W praktyce oznacza to, że eksploatacyjne koszty użytkowania zmniejszą się także o 25%, co w przypadku systemów klimatyzacji jest bardzo dużym osiągnięciem. Oprócz wpływu działania pompy ciepła na system klimatyzacji, system klimatyzacji korzystnie wpłynie na system grzania. To z kolei wynika z faktu, że podczas sezonu letniego, kiedy układ odbiera ciepło z powietrza i transportuje je do gruntu - ciepło to jest następnie zimą odbierane. Oznacza to, że w okresie zimowym temperatura gruntu będzie wyższa niż w systemie, w którym układu klimatyzacji nie ma. Powoduje to, że temperatura parowania czynnika roboczego będzie wyższa, a to z kolei powoduje, że średnioroczny współczynnik efektywności pompy ciepła także będzie wyższy. Z obliczeń wynika, że zyski te będą rzędu 11%.

6. Podsumowanie

Komfort zarówno cieplny jak i ten rozumiany ogólnie, ma coraz większe znaczenie dla ludzi mieszkających w Polsce. Z tego też powodu układy klimatyzacji stają się coraz popularniejsze. Praca pokazuje, że posiadając pompę ciepła w budynku można w znaczący sposób obniżyć koszty użytkowania systemów klimatyzacji. Standardowe systemy klimatyzacji charakteryzować się mogą średnio o 1 niższym współczynnikiem sezonowym COP. Wg obliczeń różnica ta wynosi 1,12. Wynika to z kilku przyczyn. Temperatura górnego źródła ciepła jest niższa niż w przypadku klimatyzacji standardowej, a to powoduje, że układ będzie pracował z wyższą efektywnością. Z drugiej strony układ klimatyzacji poprawia działanie systemu grzewczego zimą, gdyż grunt wokół wymienników w pewnym sensie będzie działał jak magazyn ciepła. To sprawi, że sezon grzewczy będzie się rozpoczynał ze zdecydowanie wyższą temperaturą gruntu niż w przypadku układu niewspółpracującego z system klimatyzacji. Z obliczeń wynika, że efektywność pompy ciepła wzrośnie o 11%.

Literatura

[1] ASHRAE Handbook, 1999 HVAC Applications, A31 Geotermal energy.

[2] Chabane f., Moummi N., Benramache S.: Experimental analysis on thermal performance of a solar air collector with longitudinal fins in a region of Biskra, Algeria. Journal of Power Technologies 93 (1) (2013) 52–58.

[3] Chwieduk D.: Dynamics of external wall structures with a PCM (phase change materials) in high latitude countries. Energy 59 (2013) pp. 301-313.

[4] Cyklis P., Kantor R., Górski B., Ryncarz T.: Hybrydowe sorpcyjno-sprężarkowe systemy ziębnicze. Część 3. Wyniki badań systemu. Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, tom nr 8 (2012), s. 322-331.

[5] Grzebielec A.: Możliwość zastosowania pomp ciepła w procesach suszenia. Chłodnictwo 8 (2013), s 18-20.

[6] Grzebielec A., Pluta Z., Ruciński A., Rusowicz A.: Czynniki chłodnicze i nośniki energii. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2011.

[7] Grzebielec A., Rusowicz A.: Kierunki rozwoju syntetycznych czynników chłodniczych w Europie, Polska Energetyka Słoneczna 1-4/2012, s.45-49.

[8] Grzebielec A., Rusowicz A., Kuta A.: Rola urządzeń i instalacji realizujących obiegi lewobieżne w wirtualnych elektrowniach. Rynek Energii 1 (110), 2014, strony 40-45.

[9] Jaworski M.: Thermal performance of heat spreader for electronics cooling with incorporated phase change material, Applied Thermal Engineering, 35 (2012) 212-219.

[10] Kavanaugh S.P.: Simulation an experimental verification of a vertical ground-coupled heat pump system. Ph.D. thesis. Oklahoma State University, Stillwater, OK, 1985.

[11] Kavanaugh S.P., Rafferty K.: Ground-source heat pumps-Design of geothermal systems for commercial and institutional buildings. ASHRAE, Atlanta, 1997.

[12] Lorenc H.: Atlas Klimatu Polski. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa 2005.

[13] Trela M., Kwidzyński R., Butrymowicz D.: A study of transcritical carbon dioxide cycles with heat regeneration. Archives of thermodynamics, Vol. 34(2013), No. 3, 197-217.

GROUND HEAT PUMP IN AIR CONDITIONING SYSTEMS

S u m m a r y

Heat pumps, working with ground heat exchangers are devices characterized by some of the higher rates of efficiency. Better results attained, only in the case of devices with the ground water. The worst heat pumps, from the point of view of energy efficiency are solutions using atmospheric air as a heat source. Nevertheless, from the point of view of economics are far from coal or gas boilers. The main problem is the cost of the investment. Heating systems with heat pumps are the investment costs of a few to several times higher than others. The aim of the study is to determine how to improve the economic aspect of heat pumps work by using them in air conditioning systems during the summer. In order to model the work of the ASHRAE model was used for the vertical ground heat exchangers for Polish weather conditions. The results of the work show that the existing installation of the heat pump can be used as air-conditioning, and in addition, can significantly improve the efficiency of air conditioning systems (25%). This is due to the fact that in such embodiments the upper heat source, in air conditioning systems and the source is not the atmospheric air. Ground in the summer is characterized by a lower temperature than the ambient air. All these factors make the economic balance of heat pump systems is getting more favorable. However, to achieve the best possible solution, with the cooperation of the heating system air conditioning system has already taken into account at the design of the building.

Keywords: heat pumps, ground heat exchangers, air conditioning, energy efficiency, mathematical modeling

Przesłano do redakcji: 18.02.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.41

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 117-126

Beata JAGIEŁA[1]
Marek GOSZTYŁA[2]

KONCEPCJE RESTAURACJI KLASZTORU OO. BERNARDYNÓW W RZESZOWIE WEDŁUG PROJEKTÓW ZYGMUNTA HENDLA

Celem niniejszego opracowania jest próba analizy koncepcji restauracji zespołu OO. Bernardynów w Rzeszowie autorstwa krakowskiego architekta – Zygmunta Hendla. Architekt o znanym nazwisku i dorobku mógł stworzyć swoje koncepcje projektowe na obiekcie o cennych nawarstwieniach kulturowych, przy którym zatrudniani byli mistrzowie o najwyższym autorytecie. Pogłębiona analiza konceptu konserwatorskiego z I dekady XX wieku, przeprowadzona zostanie w oparciu o dokumentację projektową pochodzącą ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie. Projekty, których autorem jest jeden z wybitniejszych architektów i konserwatorów przełomu XIX i XX wieku, pozwalają przybliżyć przyjmowane metody postępowania konserwatorskiego w omawianym okresie. Projekty te, są na tyle cenne, że mogą dawać nowy pogląd na zachodzące zmiany w rozwoju konserwatorstwa. Pozwoli to w sposób znaczny pogłębić wiedzę tak w zakresie historii omawianego zabytku, jak i historii konserwacji zabytków na ziemiach Galicji w okresie autonomii. Architekt krakowski był autorem projektów oraz nadzorował prace konserwatorskie prowadzone w klasztorze w latach 1896-1906. Stworzył koncepcję nadbudowy obiektu, wprowadził propozycję opracowania arkadowego w formie wykształconych boni i klińców elewacji na parterze od strony dziedzińca klasztornego. Opracował projekt rozrzeźbienia elewacji poprzez zwieńczenie ryzalitu trójkątnym przyczółkiem oraz plastycznego podkreślenia narożnych linii pionowych projektując pilastry o trzonach boniowanych. Na przestrzeni lat 2004-2006 w klasztorze prowadzono prace osuszania murów fundamentowych, prace budowlano konserwatorskie murów zewnętrznych i wewnętrznych klasztoru. W roku 2009 zaakceptowano projekty rozbudowy i adaptacji poddasza klasztornego na funkcje mieszkalne oraz założenia ogrodowego od strony północnej. Prace wykonane na początku XXI wieku w swojej ogólnej koncepcji stanowią powrót do niezrealizowanych projektów Z. Hendla. Współczesna realizacja zachowując formę dachu skupiła się na poszerzeniu programu funkcjonalnego wnętrza.

Słowa kluczowe: zabytek architektury, kościół, klasztor, architekt, konserwacja zabytków, autonomia galicyjska

[1] Autor do korespondencji: Beata Jagieła, starszy wykładowca w Państwowej Wyższej Szkole Techniczno – Ekonomicznej w Jarosławiu, adres zamieszkania: ul. Polna 10/2, 37-500 Jarosław, tel. 798400009, beata.jagiela@op.pl
[2] Marek Gosztyła, kierownik Katedry Konserwacji Zabytków, Politechnika Rzeszowska, tel. 178651939, gosztyla@prz.edu.pl

1. Wstęp

Na temat Bazyliki OO. Bernardynów w Rzeszowie napisano już wiele. Jest tak dlatego, że świątynia ta, będąca sanktuarium Matki Bożej Rzeszowskiej, należy do najznamienitszych zabytków miasta nad Wisłokiem, a jej nobliwa sylwetka stanowi jeden z najpiękniejszych i zarazem najbardziej charakterystycznych elementów w jego panoramie. Bodaj najnowszą publikacją opisującą zarówno dzieje, jak i architekturę zespołu klasztorno – kościelnego jest opracowanie o charakterze przewodnika autorstwa E. Kurowskiej oraz ojca W.P. Tokarskiego – proboszcza oraz kustosza Sanktuarium [7].

Celem autorów niniejszego artykułu nie może być więc powtarzanie treści, które się pojawiają we wspomnianym opracowaniu, a także publikacjach wcześniejszych, ale uzupełnienie ich o nowe, nieznane fakty do tej pory nie będące przedmiotem oddzielnego studium. Gros z nich dotyczy modernizacji jaką przeprowadzono w świątyni na przełomie XIX i XX stulecia, pod okiem znanego architekta, a zarazem wytrawnego konserwatora zabytków – Zygmunta Hendla.

2. Rys historyczny zespołu OO. Bernardynów w Rzeszowie

Opisywany zespół klasztorny w wraz z kościołem jest dobitnym dowodem na to, że przejście od stylu manierystycznego do wczesnobarokowego nie dokonało się nagle. Polegało ono na stopniowym wypieraniu jednych elementów przez drugie. W przypadku dzieł architektury, zważywszy na rozciągnięcie w czasie ich powstawania, widać to najwyraźniej.

Zespół klasztorny OO. Bernardynów, o którym mowa, wzniesiono w I połowie XVII w. w miejscu dużo starszej budowli sakralnej usytuowanej w tym miejscu – drewnianego kościółka p.w. Wniebowzięcia panny Marii [10, s. 45]. Jego powstanie było odpowiedzią na cudowne objawienie się w tym miejscu Matki Bożej Jakubowi Ado, które miało miejsce dnia 15 sierpnia 1513 roku. Obecny kościół i klasztor powstał dzięki ówczesnemu właścicielowi miasta M.S. Ligęzie, z zamysłem pomieszczenia mauzoleum rodowego. Sam fundator, ubrany w habit zakonny znalazł miejsce swego spoczynku pod progiem świątyni [3, s. 23-24].

Kościół będący dziełem budowniczych z Lipska powstał na przestrzeni lat 1624-1629. Ligęza przekazał obiekt Bernardynom w roku ukończenia prac. W I poł. XVIII stulecia (1735-1739) wykonano w obiekcie sakralnym nową polichromię, której fundatorem był Jerzy I. Lubomirski. Do kościoła wstawiono wówczas nowe nastawy ołtarzowe w kaplicach Pana Jezusa i Panny Marii oraz położono nową posadzkę.

Około 1832 roku pojawiły się w kościele nowe ołtarze: św. Antoniego, św. Franciszka i św. Jana z Dukli [7, s. 33].

Kościół został ponownie poddany renowacji w latach 1898-1909 pod kierunkiem Z. Hendla. Od tego czasu był parokrotnie restaurowany wliczając w to czasy współczesne, kiedy to odrestaurowano m.in. elewację świątyni.

Opis świątyni (zarówno jej architektury jak i wystroju) zawarty został w akcie donacyjnym Ligęzy. Według tego zapisu w kościół jest budowlą na planie krzyża łacińskiego z dwiema bocznymi kaplicami. W podziemiach małego chóru zakonnego usytuowanego w obrębie wschodniej części prezbiterium istniała niegdyś dodatkowo kolejna, trzecia kaplica – św. Krzyża [7, s. 32; 2, s. 199-202].

Kościół jest budowlą orientowaną, murowaną z cegły, dziełem o dużych walorach artystycznych, posiadającym późnorenesansowy charakter wzbogacony elementami baroku. Korpus główny świątyni jest jednonawowy, prezbiterium zamknięte półkolistą apsydą. W sylwecie budowli dominuje okazała wieża na planie kwadratu, dostawiona do jej bryły od strony zachodniej. Na skrzyżowaniu naw umieszczono kopułę, którą wieńczy pokaźna latarnia. Kaplice transeptu przesklepiono sklepieniami krzyżowymi, nawę zaś kolebką. Prostota bryły architektonicznej, pełne harmonii proporcje, ascetyczna dekoracja ograniczona do artykulacji otworów okiennych - to cechy należące do renesansowej puli środków formalnych w architekturze. Wspomniane okna, urozmaicające monotonię elewacji, zakomponowano w dwóch rzędach: w górnym okrągłe w lunetach, w dolnym zaś zamknięte łukiem półokrągłym. Rozwiązanie to dubluje układ otworów okiennych dzwonnicy.

Elementem świadczącym o rysie barkowym bryły budowli jest umieszczenie na skrzyżowaniu naw kopuły zwieńczonej latarnią.

Przy prezbiterium znajduje się zakrystia i oddzielne pomieszczenie skarbczyka. Ramiona transeptu przeznaczono na kaplice: od strony południowej znajdujemy kaplicę Matki Boskiej Rzeszowskiej, od strony północnej zaś kaplicę Pana Jezusa.

Wystrój kościoła posiada we większości przypadków pierwotny XVII-wieczny charakter, uzupełniony przez późniejsze elementy pochodzące z XVIII i XIX wieku. Powyższy, dość lapidarny w swej formule opis, udowadnia to, jak złożoną kwestią jest sztywna klasyfikacja stylowa konkretnego zabytku. ,,Niejednokrotnie bowiem bywa tak, że kolejne style architektoniczne nawarstwiają się tworząc w określonym obiekcie ciekawy mariaż stylistyczny. Nie jest też możliwe oddzielenie na zasadzie cięcia nożem wykwitów poszczególnych epok stylowych, gdyż ich przechodzenie jedna w drugą nie odbywało się nagle lecz na przestrzeni lat.”[3, s. 26]

3. Projekty Zygmunta Hendla

W latach 1898-1906 pod kierunkiem Zygmunta Hendla świątynia została gruntownie odnowiona. Projekty tej restauracji, które udało się odnaleźć w zbiorach Muzeum Narodowego w Krakowie, można podzielić na dwie zasadnicze kategorie: te dotyczące przekształceń (niezrealizowanych zresztą)

bryły klasztoru oraz projekty wyposażenia kościoła. W pierwszej grupie znajdują się niniejsze projekty:

- Widok części Elewacji - Fragment I i II piętra, 1900 rok,[3]
- Fasada frontowa - Budynek o trzech kondygnacjach (parter, pierwsze i drugie piętro, podpiwniczony,[4]
- Fragment elewacji, 1900 rok.[5]Fragment fasady o trzech kondygnacjach podpiwniczonych, 1900 rok,[6]
- Gzyms fasady frontowej, 1900 rok,[7]
- Plan odnowienia, 1900 rok,[8]
- Fragment fasady budynku od strony dziedzińca.[9]

Drugą grupę obejmują zaś projekty wymienione poniżej:

- Krypta grobowa - Ołtarz z marmuru, 1900 rok,[10]
- Projekt oszklenia okna witrażem, 1900 rok,[11]
- Projekt oszklenia okna witrażem, 1900 rok,[12]
- Projekt ażurowej bramki wykonanej z metalu, do balustrady oddzielającej prezbiterium od nawy, 1900 rok,[13]
- Fragment części Ołtarza Głównego - Projekt przebudowy, 1900 rok,[14]
- Wyposażenie wnętrza, stalle - 2 rys. Ujęcie frontalne stall, widok boczny, 1900. Projekt cyborium - 2 rys.: "Widok z frontu"; "Widok z boku", 1900 rok,[15]
- Konfesjonał - 3 rys.: Widok z boku; Widok frontalny; Plan, 1900 rok,[16]
- Balustrada w prezbiterium - 3 rys.: Profil dolnej części słupa; Górna płyta balustrady; Profil, 1900 rok,[17]
- 4 rys. Plan kościoła; Widok frontalny połowy balustrady wraz z bramką; Widok frontalny części stall; Widok boczny konfesjonału, 1900 rok.[18]
- Posadzka, 1900 rok,[19]
- Przekształcenie tabernakulum – Projekt, 1900 rok,[20]

[3] Zbiory Muzeum Narodowego w Krakowie, Dział III, nr inw. MNK III-PL-815.
[4] Tamże, nr inw. MNK III-PL-816.
[5] Tamże, nr inw. MNK III-PL-817.
[6] Tamże, nr inw. MNK III-PL-820.
[7] Tamże, nr inw. MNK III-PL-825.
[8] Tamże, nr inw. MNK III-PL-832.
[9] Tamże, nr inw. MNK III-PL-852.
[10]Tamże, nr inw. MNK III-PL-814.
[11] Tamże, nr inw. MNK III-PL-818.
[12] Tamże, nr inw. MNK III-PL-819.
[13] Tamże, nr inw. MNK III-PL-821.
[14] Tamże, nr inw. MNK III-PL-823.
[15] Tamże, nr inw. MNK III-PL-826.
[16] Tamże, nr inw. MNK III-PL-827.
[17] Tamże, nr inw. MNK III-PL-829.
[18] Tamże, nr inw. MNK III-PL-830.
[19]Tamże, nr inw. MNK III-PL-831.

- Projekt przebudowy - rysunek roboczy - Ołtarz główny (sic!) - Widok i przekroje fragmentów, 1900 rok,[21]
- Projekt mensy przed wielkim ołtarzem:2 rys.: Widok główny; Widok boczny, 1900 rok,[22]
- Projekt mensy przed wielkim ołtarzem - 3 rys.: Przekrój; Widok główny; Widok boczny, 1900 rok,[23]
- Plan prezbiterium balustrady przed głównym ołtarzem, 1900 rok,[24]
- Konfesjonał - 2 rys.: Widok frontalny; Ujęcie boczne, 1900 rok,[25]
- Przekształcenie tabernakulum ołtarza - Ujęcie frontalne, 1900 rok.[26]

Projekty te wyszczególnione zostały w porządku kolejności sygnatur. Autorzy omówią je szczegółowo w tematycznych artykułach.

Krakowskiemu architektowi zawdzięczamy projekty dotyczące rozbudowy i przekształcenia elewacji budynku klasztornego OO. Bernardynów w Rzeszowie. Budynek klasztorny „na podmurowaniu" powstał równolegle z kościołem bernardyńskim. Wiemy o nim tyle, że miał duże sklepienie piwnic, na parterze mieścił refektarz, kuchnie oraz izby w liczbie sztuk pięciu; na piętrze zaś trzynaście cel oraz obszerną salę. Był to obiekt drewniany do którego przynależała zabudowa o charakterze gospodarczym, tzw. „domek dla gościa" oraz ogród. Już na początku następnego stulecia dzięki fundacji najprawdopodobniej Hieronima Augustyna Lubomirskiego został zastąpiony nowym, murowanym budynkiem wzniesionym na przestrzeni lat 1702-1707 pod kierownictwem Piotra Belottiego, który pełnił na dworze H. A. i J. I. Lubomirskich funkcję nadwornego architekta.[27] Autorem projektu budynku klasztornego był wybitny architekt Tylman z Gameren zamieszkujący wówczas w Warszawie. Jego częste bytności w grodzie nad Wisłokiem były spowodowane nadzorem prac prowadzonych wg jego projektu przy kościele pijarów oraz (a może – przede wszystkim) na zamku w Rzeszowie. [13, zał. 1]

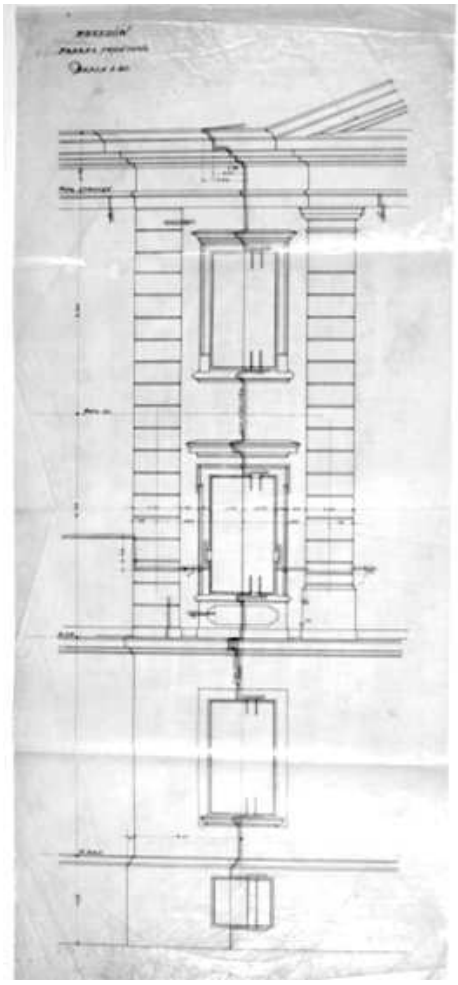
Klasztor wg projektu Tylmana z Gameren przetrwał do chwili obecnej w prawie niezmienionej postaci (nie licząc adaptacji poddasza przeprowadzonej w I dekadzie XXI wieku). Jest to dwukondygnacyjny obiekt na rzucie czworoboku, posiadający kwadratowy dziedziniec. Przylega do kościoła od strony północno- zachodniej. W latach 40. XX wieku rozebrano mur otaczający przyklasztorny ogród, który przylegał do zachodniego oraz południowego skrzydła klasztoru.

Zespół klasztorny przeszedł dość gruntowną restaurację w latach 1896-1906 pod nadzorem Z. Hendla – jak się okazuje jednak nie wybrano wówczas jego dość rewolucyjnych projektów, zasadniczo ingerujących w bryłę obiektu.

---

[20] Tamże, nr inw. MNK III-PL-835.
[21] Tamże, nr inw. MNK III-PL-840.
[22] Tamże, nr inw. MNK III-PL-848.
[23] Tamże, nr inw. MNK III-PL-849.
[24] Tamże, nr inw. MNK III-PL-851.
[25] Tamże, nr inw. MNK III-PL-2066.
[26]Tamże, nr inw. MNK III-PL-2087.
[27] Warto zaznaczyć, ze przeszła ona w schedzie na jego syna – Jana Chrzciciela Belottiego.

Hendel zdecydował się urozmaicić elewację frontową klasztoru poprzez wprowadzenie na osi ryzalitu trójkątnego naczółka oraz wzmocnić linie pionowe poprzez wprowadzenie boniowania na narożach ryzalitu i być może także rozdzielające kolejne osie elewacji (rys. 1). Jak widać na jednym z nich, architekt miał zamiar podwyższyć budynek klasztoru o dodatkową kondygnację. Warto też zwrócić uwagę na fakt, że otwory okienne pierwszej kondygnacji dziedzińca miały zostać według tej śmiałej koncepcji ujęte arkadowym boniowaniem, co przywodzi na myśl rozwiązanie zastosowane przez H. Skowrona w projektach dziedzińca nowopowstałego zamku rzeszowskiego, obecne także na wcześniejszych projektach Hendla dotyczących adaptacji zamku w Rzeszowie dla potrzeb więziennictwa, które mogły być w tym przypadku pierwowzorem[28] (rys. 2).

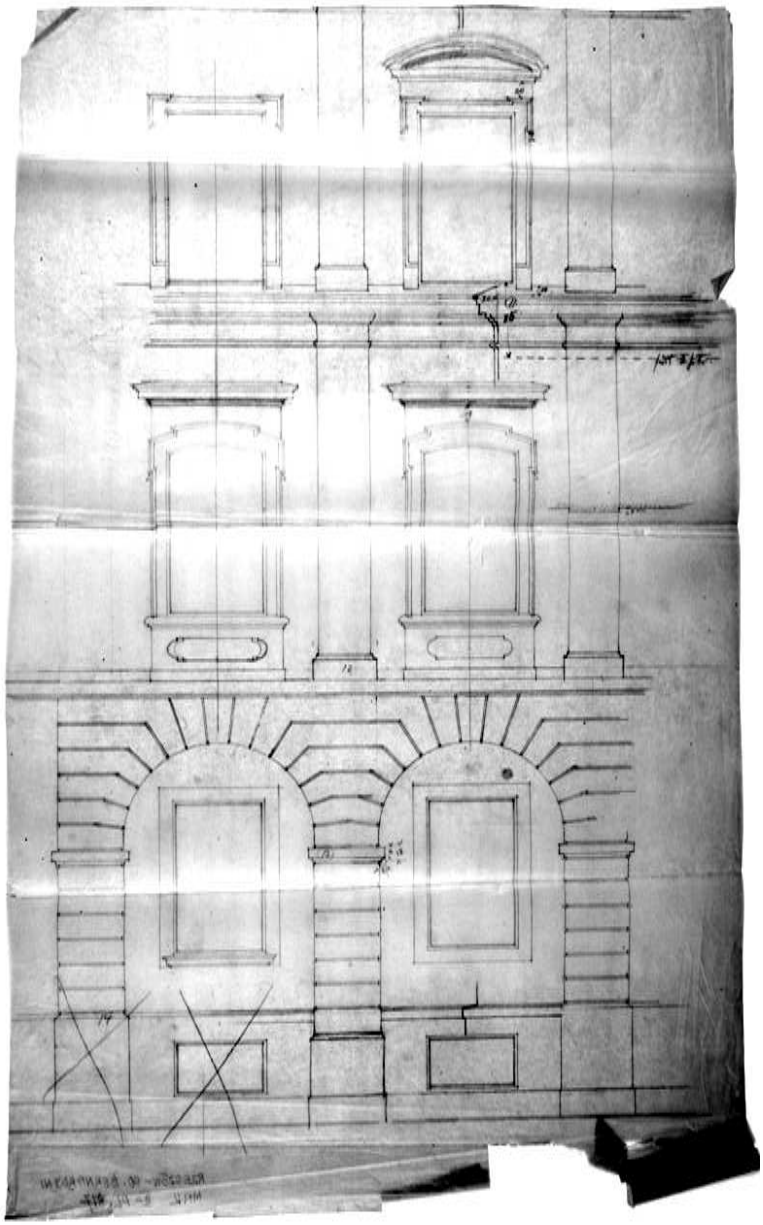


Rys. 1. Fasada frontowa, Muzeum Narodowe w Krakowie[29]

Fig. 1. The front facade, National Museum in Krakow

[28] Zob. B. Jagieła, *Zygmunt Hendel i jego niezrealizowane projekty adaptacji zamku Lubomirskich w Rzeszowie dla potrzeb więziennictwa*, [w:] Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej „Budownictwo i inżynieria środowiska", z. 59, nr 2/2012/II, t. I, s. 349-360.

[29] Zygmunt Hendel, Rzeszów - Kościół przy klasztorze OO. Bernardynów - Fasada frontowa - Budynek o trzech kondygnacjach (parter, pierwsze i drugie piętro, podpiwniczony), 95 x 41.6 cm, tusz, płótno, Zbiory Muzeum Narodowego w Krakowie, Dział III, nr inw. MNK III-PL-816.



Rys. 2. Fasada frontowa, Muzeum Narodowe w Krakowie [30]

Fig. 2. The front facade, National Museum in Krakow

[30] Zygmunt Hendel, Rzeszów - Kościół przy klasztorze OO. Bernardynów - Fasada frontowa - Budynek o trzech kondygnacjach (parter, pierwsze i drugie piętro, podpiwniczony), 95 x 41.6 cm, tusz, płótno, Zbiory Muzeum Narodowego w Krakowie, nr inw. MNK III-PL-817.

Na przestrzeni lat 2004-2006 prowadzono prace konserwatorskie osuszające mury fundamentowe, cokół kościoła i klasztoru, a także prace remontowo konserwatorskie murów zewnętrznych i wewnętrznych klasztoru, które kontynuowano także później.

W październiku 2009 roku – dokonano uzgodnień dotyczących możliwości rozbudowy i adaptacji poddasza klasztornego na cele mieszkalne wraz z budową ogrodów nad nieistniejącym jeszcze wówczas parkingiem od strony północnej. Potrzeba powiększenia powierzchni mieszkalnej w budynku klasztornym, pojawiła się jak wiemy już wcześniej, na co odpowiedź stanowiły niezrealizowane projekty Hendla, dotyczące nadbudowy kolejnej kondygnacji. Współczesna rozbudowa części mieszkalnej, ograniczona do adaptacji poddasza, które doświetlono lukarnami, ma wybitnie funkcjonalny charakter.

Przebadane projekty znanego architekta krakowskiego Z. Hendla pozwoliły przedstawić jego bogaty warsztat artystyczny. Kreślił rozwiązania architektoniczne bryły i detalu, wystroju wnętrza w każdej skali. Proponował projekty malarskie, rzeźbę i snycerkę. Operował przestrzenią i światłem, posiadał umiejętności wczuwania się w atmosferę miejsca. Poznawał idee minionych styli i projektował kontynuację odczytanych wartości. Te talenty architekta wpisały twórcę do kart historii architektury. Niemniej należy zauważyć, że propozycje projektowe Z. Hendla nie omijały trendów epoki w której przyszło mu żyć i tworzyć. Projekty elewacji oraz ołtarzy zawierają pierwiastki kierunków charakterystycznych dla przełomu XIX i XX wieku. Zważywszy, jednak kwestię rozwoju konserwatorstwa, to w sposób znaczący, zaświadczają o bardzo rozsądnym i pieczołowitym traktowaniu pamiątek historycznych ze strony wybitnego architekta.

Literatura

[1] Bogdalski Cz.: Pamiętnik kościoła i klasztoru OO. Bernardynów w Leżajsku, Kraków 1929.

[2] Fischinger A., Krukowski P.: Kościół Bernardynów w Rzeszowie, [w:] Studia renesansowe, t. 3, 1963.

[3] Gosztyła M., Jagieła B.: Reprezentatywne zabytki kultury materialnej Podkarpacia, Jarosław 2004.

[4] Hendel Z., Kopera F.: Kościół św. Idziego, „Biblioteka Krakowska", Kraków 1905, 29.

[5] Hendel Z., Kopera F.: Resztki murów romańskich w kościele św. Jana w Krakowie, „Rocznik Krakowski", 1907, T. 9.

[6] Kronika Klasztoru OO. Bernardynów, 1862 r.

[7] Kurowska E., Tokarski W.P. OFM: Bazylika Ojców Bernardynów w Rzeszowie. Przewodnik, Rzeszów 2009.

[8] Laskowski A.: Pałac Klobassy w Skołyszynie - niespełniony sen naftowego magnata, [w:] Dwór polski. Zjawisko historyczne i kulturowe, Warszawa 2000.

[9] Łuszczkiewicz W.: Klasztor leżajski i jego dzieła sztuki. Wrażenia z podróży, Kraków 1895.

[10] Malczewski J.: Dzieje Rzeszowa do 1914 roku, Rzeszów 1985.

[11] Pierwsze Sprawozdanie CK Szkoły Przemysłowej we Lwowie za rok szkolny 1892/93 (z rysunkami gmachu szkolnego), Lwów 1893.

[12] Stępień P. M.: Hendel Zygmunt, [w:] Polski słownik biograficzny konserwatorów zabytków, red. Henryk Kondziela, Hanna Krzyżanowska, z. 2, Poznań, Wydaw. Poznańskie 2006.

[13] Wojewódzki Urząd Ochrony Zabytków w Rzeszowie: Karta Ewidencyjna Zabytków Architektury i Budownictwa, Kościół OO. Bernardynów w Rzeszowie, opr. J. Malczewski, 10.01.93, zał. nr 1.

[14] Zbiory Wojewódzkiego Urzędu Ochrony Zabytków w Rzeszowie: Dokumentacja Konserwatorska, Rzeszów – ołtarz główny kościoła OO. Bernardynów w Rzeszowie, opr. S. Juszczak, Rzeszów 1996.

[15] Zygmunt Hendel, [w:] Polski Słownik Biograficzny konserwatorów zabytków, red. Kondziela H., Krzyżanowska H., Poznań 2006.

THE CONCEPTION OF RESTORATION OF GROUP BERNARDINE MONASTERY IN RZESZOW BY ZYGMUNT HENDEL THROUGH PRIZM OF SAVED PROJECT DOCUMENTATION

S u m m a r y

The aim of the article is an attempt of analysing the assumed concepts of restoring the complex of Friars Minors of Observance in Rzeszów by the architect of Cracow - Zygmunt Hendel. The architect of the famous name and achievements could create his own project concepts of the object with valuable cultural influences along with employing the masters of the highest authority. The in-depth characteristics of restoring projects from the first decade of the 19th century was performed on the basis of the project documentation coming from the resources of the National Museum in Cracow. The projects, whose author is one of the most outstanding architects and restorers at the turn of the 19th and 20th centuries allow approximating the assumed methods of restoration within the mentioned period. These projects are so precious that they may provide a new outlook on the changes made in the development of restoration. It allows us to deepen knowledge of both the history of the discussed monument and its history and development of restoring monuments on the area of Galicia in the period of autonomy. The Cracow architect was the author of many projects and he supervised restoration works performed in the monastery in the years 1896-1906. He created the superstructure concept of the object, introduced the proposal of arcaded development in form of shaped rustication strips and elevation voussoirs on the ground floor from the side of the monastery courtyard. He developed the project of irregular elevation configuration by cresting with a triangle pediment and plastic underlining of corner vertical lines while designing the pilasters with rusticated cores. In the years 2004 - 2006, the monastery underwent the works on drying foundation walls, the works of construction and restoration of external and internal walls of the monastery. In the year 2009, the projects of expansion and adaption of the monastery loft to housing functions and garden establishment from the northern side were accepted. The works performed at the beginning of the 21st century, in its general concept, constitute the return to the undeveloped projects by Z. Hendel. The contemporary development, retaining the form of a roof, focused on extending the functionality of the interior.

Keywords: architectural monument, church, monastery, architect, renovation of monuments, Galicia autonomy

Przesłano do redakcji: 19.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.42

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 127-136

Beata JAGIEŁA[1]
Marek GOSZTYŁA[2]

PROJEKTY KONSERWATORSKIE ZYGMUNTA HENDLA W KOŚCIELE OO. BERNARDYNÓW W RZESZOWIE

Dokonania Hendla poprzedzające prace konserwatorskie przy zespole OO. Bernardynów w Rzeszowie, a także piastowane przezeń stanowisko konserwatora okręgu tarnowsko - rzeszowskiego stanowiły najlepszą legitymację architekta i były powodem zatrudnienia go jako kierownika prac przy zespole OO. Bernardynów w Rzeszowie.
Jak wynika z zachowanych projektów – było to wymagające i zakrojone na dużą skalę przedsięwzięcie. Hendel łączył w swej działalności zawodowej badania i konserwacje zabytków architektury z twórczością architektoniczną. Najczęściej wypowiadał się w formach eklektyzmu. Część jego licznych projektów nigdy nie doczekała się realizacji na skutek splotu różnych okoliczności. W pacach przy obiektach zabytkowych przeważał kierunek restauracji, przy dość szerokim zróżnicowaniu rodzaju i stopnia ingerencji – od powściągliwych, ograniczonych uzupełnień substancji zabytkowej (poddanej zabiegom konserwatorskim na miarę ówczesnego stanu wiedzy i rozwoju technologii) do zasadniczej przebudowy i rozbudowy obiektu.
Poniżej przedstawiono ważniejsze z działań konserwatorskich i projektowych oraz ich specyfikę.
Opis projektów będących przedmiotem koncepcji restauracji zespołu OO. Bernardynów w Rzeszowie, zarówno tych, które doczekały się realizacji, jak i tych, które nie zrealizowano, autorzy omawiają na przykładzie ołtarza Świętego Krzyża, tabernakulum w kaplicy Matki Bożej Rzeszowskiej, mensy ołtarzowej w kaplicy Matki Bożej Rzeszowskiej, konfesjonałów. Omówiony został również projekt witraża. Celem opracowania jest próba analizy przyjmowanych koncepcji restauracji zespołu OO. Bernardynów w Rzeszowie autorstwa krakowskiego architekta – Zygmunta Hendla. Pogłębiona charakterystyka projektów konserwatorskich z I dekady XX wieku, przeprowadzona została w oparciu o dokumentację projektową pochodzącą ze zbiorów Muzeum Narodowego w Krakowie. Pozwoli to w sposób istotny pogłębić wiedzę tak w zakresie historii omawianego zabytku, jak i historii rozwoju konserwacji zabytków na ziemiach Galicji w okresie autonomii.

Słowa kluczowe: zabytek architektury, kościół, klasztor, architekt, konserwacja zabytków, autonomia galicyjska

[1] Autor do korespondencji: dr Beata Jagieła, starszy wykładowca w Państwowej Wyższej Szkole Techniczno – Ekonomicznej w Jarosławiu, adres zamieszkania: ul. Polna 10/2, 37-500 Jarosław, tel. 798400009, beata.jagiela@op.pl
[2] dr hab. inż. prof. PRz. Marek Gosztyła, kierownik Katedry Konserwacji Zabytków na Politechnice Rzeszowskiej, tel. 17 865 1939, gosztyla@prz.edu.pl

1. Wstęp

W prezbiterium Bazyliki OO. Bernardynów w Rzeszowie rozmieszczono pomniki pośmiertne przedstawicieli rodu Ligęzów datowane na I poł. XVII wieku, którzy zaliczani są do fundatorów świątyni. Są to pomniki manierystyczne będące najprawdopodobniej dziełem Sebastiana Sali. W niszach prezbiterium umieszczone zostały symetrycznie zgrupowane po cztery w dwóch rzędach sylwetki klęczących mężczyzn naturalnej wielkości wykonane z mlecznego alabastru. Siedem z nich to rycerze w renesansowych zbrojach, natomiast ósma przedstawia biskupa w szatach pontyfikalnych. Pod niszami umieszczono tablice inskrypcyjne z czarnego marmuru. To bardzo eleganckie zestawienie bieli alabastru z kontrastową czernią stanowi, oprócz niezaprzeczalnych wartości rzeźbiarskich figur, o klasie tego zabytku.

W kaplicy Matki Boskiej Rzeszowskiej znajduje się, umieszczona w środkowej części retabulum, słynąca cudami figura Matki Boskiej z Dzieciątkiem o późnogotyckim rodowodzie, powstała około 1475 roku.[3] Niezwykle piękną, wykonaną z drewna i polichromowaną rzeźbę przyoblekają barokowe szaty: suknia i płaszcz spływające bogactwem ozdób. Głowę Maryi wieńczy barokowa korona wykonana ze złoconego srebra, będąca perełką jubilerskiej roboty. Po bokach retabulum widnieją barokowe obrazy olejne z połowy XVIII wieku przedstawiające sceny z życia Maryi. Wnętrze kaplicy, podobnie jak i wnętrze całej świątyni, pokrywa rokokowa polichromia z połowy XVIII wieku autorstwa Antoniego Szulca z Warszawy oraz Tomasza i Krzysztofa Kędzierskich z Rzeszowa [3;7].

Ołtarz Świętego Krzyża, znajdujący się obecnie w korytarzu łączącym kościół z klasztorem jest bez wątpienia jednym z najważniejszych zabytków rzeszowskiego kościoła bernardyńskiego. Został on wykonany przy użyciu czarnego marmuru oraz mlecznego alabastru użytego do wykonania elementów detalu architektonicznego. Centralną część ołtarza stanowi arkadowa płycina, w którą wkomponowano krzyż. Ołtarzowi towarzyszyły niegdyś dwie figury: *Matki Bożej Bolesnej* oraz *św. Jana*. Pod ołtarzem znajdują się doczesne szczątki fundatorów sanktuarium, o czym informuje tablica z inwokacją i wspomnieniem o fundacji Mikołaja Spytka Ligęzy usytuowana w dolnej części ołtarza. Na gzymsach po lewej i prawej stronie znajdują się rzeźby geniuszów śmierci. Autorem dzieła jest najprawdopodobniej wytrawny rzeźbiarz: Sebastian Sala, nie należy się więc dziwić temu, że ołtarz zwrócił uwagę Zygmunta Hendla, który na marginesach swego rysunku umieścił lapidarne notki dotyczące zaginionych figur.

Początek XX wieku należy łączyć z rozpoczęciem prac projektowych w zespole OO. Bernardynów w Rzeszowie przez Z. Hendla.

[3] W 1763 roku cudowną figurę koronowano.

2. Hendlowska koncepcja restauracji

Opis projektów związanych z restauracja zespołu OO. Bernardynów w Rzeszowie, zarówno tych, które zrealizowano jak i tych, które nie doczekały się z różnych względów realizacji – zaczniemy od bardzo ciekawego projektu dotyczącego restauracji ołtarza Świętego Krzyża.

W zbiorach Muzeum Narodowego w Krakowie zachował się projekt restauracji niniejszego ołtarza (rys.1). Co ciekawe, projekt ten zdaje się stanowić lustrzane odbicie istniejącej, oryginalnej realizacji, zakłada bowiem wprowadzenie okładzin z białego alabastru tam gdzie oryginalnie występuje czarny marmur i na odwrót. Biorąc pod uwagę fakt, że ubytki kamiennych elementów ołtarzy w czasach poprzedzających projektowaną renowację, łatano często nieprofesjonalnie, szpachlując je pośpiesznie kitami – sens chęci wyposażenia ołtarza w nowe okładziny marmurowe i alabastrowe wydaje się zrozumiałym. Czyżby jednak tak daleko idąca ingerencja w kolorystykę ołtarza, być może podyktowana chęcią rozjaśnienia go, była zasadna? Jak się wydaje, musiano uznać, że nie, ołtarz bowiem jak wiemy nie został odnowiony w duchu śmiałego projektu Hendla.

Dodatkowo – według projektu krakowskiego architekta - geniusze śmierci mieli zostać umieszczeni na cokołach w partii szczytowej ołtarza – tak się jednak nie stało.



Rys. 1. Ołtarz z marmuru, Muzeum Narodowe w Krakowie [4]

Fig. 1. The marble altar, National Museum in Krakow

[4] Zygmunt Hendel, Rzeszów - Kościół przy klasztorze OO. Bernardynów - Krypta grobowa - Ołtarz z marmuru, 1900 rok, 46.8 x 35.2 cm, farba, papier, Zbiory Muzeum Narodowego w Krakowie, Dział III, nr inw. MNK III-PL-814.

Mogła na tym zaważyć decyzja dotycząca przeniesienia ołtarza z podziemnej kaplicy i umieszczenia go w korytarzu północnym kościoła[5]. Sklepienie rzeczonego korytarza jest zawieszone na tyle nisko, że figury geniuszy, oznaczone na projekcie numerami 1 i 2 – najzwyczajniej nie mogły się tam pomieścić.

Kolejnym wartym uwagi projektem jest reprodukowany powyżej projekt przekształcenia tabernakulum, które znajduje się w kaplicy Matki Bożej Rzeszowskiej, który został najprawdopodobniej zrealizowany. Jest to ciekawe o tyle, że realizacja ta nie była do tej pory wiązana z wybitnym, krakowskim architektem. Dopisek u góry projektu (wariant II – nowy), pozwala w dużej mierze na ukonkretnienie powyższych przypuszczeń.

Tabernakulum dekoruje w części centralnej umieszczona na osi płycina zamknięta łukiem półokrągłym z uskokiem, z obu stron flankowana hermami z wyobrażeniami aniołów o wertykalnych, szpiczastych skrzydłach. Ponad dwoma, mocno rysującymi się, gzymsami oraz oddzielającą je przestrzenią dekorowaną płycinami, umieszczono wieńczącą całość, monstrancją podtrzymywaną przez dwoje symetrycznie zakomponowanych putt z finezyjnie rozwiniętymi skrzydłami. Repozytorium na hostię otacza płomienista gloria. Całość w sposób niezwykle subtelny i trafny koresponduje z charakterem wnętrza kaplicy (rys. 2).



Rys. 2. Projekt cyborium, Muzeum Narodowe w Krakowie [6]

Fig. 2. The ciborium project, National Museum in Krakow

[5] Wojewódzki Urząd Konserwatora Zabytków w Rzeszowie, Karta Ewidencyjna Zabytków Architektury i Budownictwa, *Kościół OO. Bernardynów w Rzeszowie*, opr. J. Malczewski, 10.01.93, zał. nr 1.

[6] Zygmunt Hendel, Rzeszów - Kościół przy klasztorze OO. Bernardynów - Projekt cyborium - 2 rys.: "Widok z frontu"; "Widok z boku", 1900 rok, 40.3 x 37 cm, papier, Zbiory Muzeum Narodowego w Krakowie, Dział III, nr inw. MNK III-PL-826.

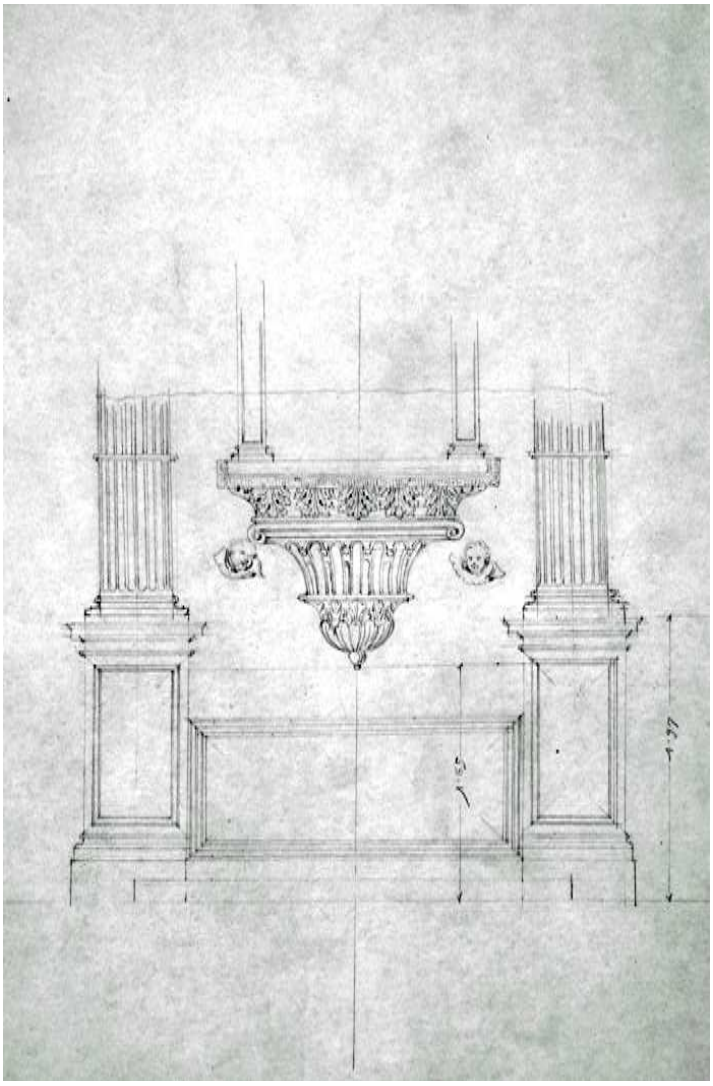
To, czy Zygmunt Hendel jest także twórcą przebudowy mensy ołtarzowej w kaplicy Matki Boskiej Rzeszowskiej – oraz dekoracyjnego obramowania absydy mieszczącej cudowną figurę – wymaga dalszej weryfikacji – niemniej jednak zachowane projekty (nr inw. MNK III-PL-2087, nr inw. MNK III-PL-835) (rys. 3 i 4) pozwalają na wysnucie takiej hipotezy oraz nakazują przebadanie stopnia ingerencji Hendla w oryginalny kształt ołtarza zwanego na projekcie: wielkim.



Rys. 3. Przekształcenie tabernakulum wielkiego ołtarza, Muzeum Narodowe w Krakowie [7]

Fig. 3. The transformation of the tabernacle of the great altar, National Museum in Krakow

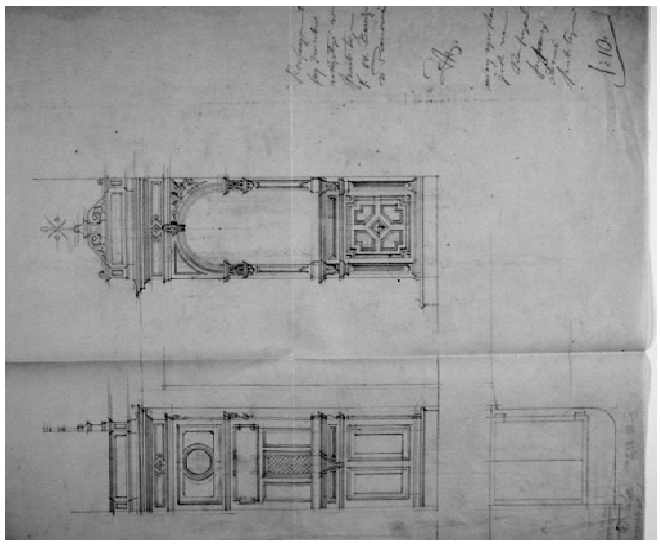
[7] Zygmunt Hendel, Rzeszów - Kościół klasztorny OO. Bernardynów - Przekształcenie tabernakulum wielkiego ołtarza (sic!) - Ujęcie frontalne, 1900 rok, 44.5 x 27.3 cm, ołówek, bibułka, Zbiory Muzeum Narodowego w Krakowie, Dział III, nr inw. MNK III-PL-2087.



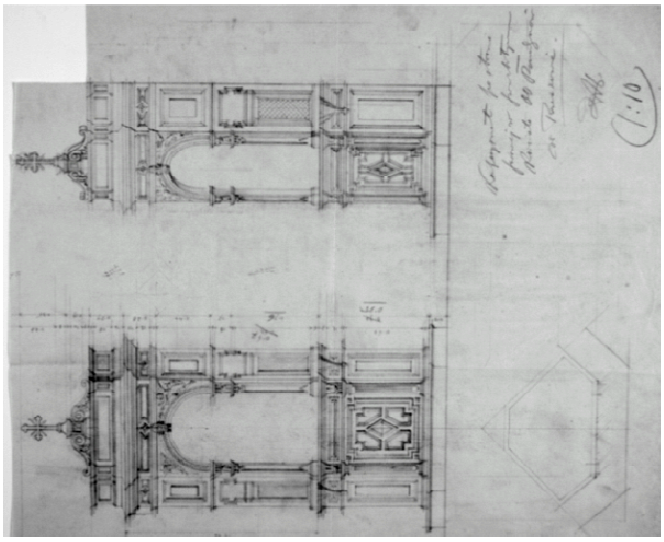
Rys. 4. Przekształcenie tabernakulum, Muzeum Narodowe w Krakowie [8]

Fig. 4. The transformation of the tabernacle, National Museum in Krakow

[8] Zygmunt Hendel, Rzeszów - Kościół klasztorny OO. Bernardynów - Przekształcenie tabernakulum [kaplica Matki Boskiej Rzeszowskiej – dopisek B.J.]– Projekt, 1900 rok, 56 x 40 cm, karton, Zbiory Muzeum Narodowego w Krakowie, Dział III, nr inw. MNK III-PL-835.



Rys. 6. Konfesjonał, Muzeum Narodowe w Krakowie[9]
Fig. 6. The confessional, National Museum in Krakow



Rys. 5. Konfesjonał, Muzeum Narodowe w Krakowie[10]
Fig. 5. The confessional, National Museum in Krakow

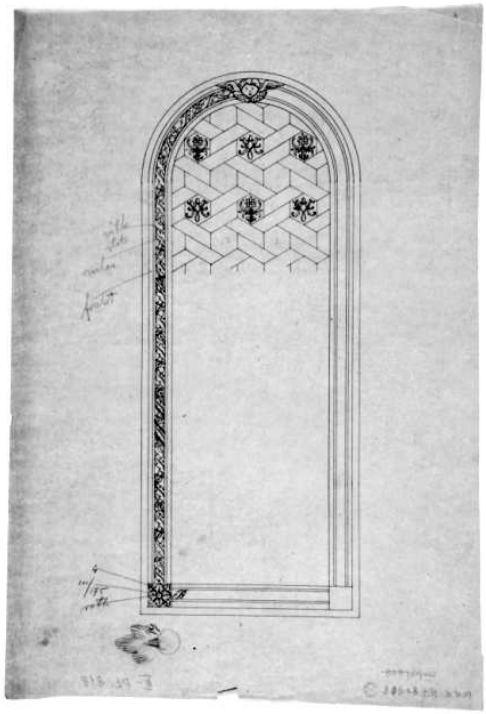
[9] Zygmunt Hendel, Rzeszów - Kościół przy klasztorze OO Bernardynów - Konfesjonał - 3 rys.: Widok z boku; Widok frontalny; Plan, 1900 rok, 62 x 50.5 cm, papier, Zbiory Muzeum Narodowego w Krakowie, Dział III, nr inw. MNK III-PL-827.

[10] Zygmunt Hendel, Rzeszów - Kościół klasztorny OO. Bernardynów - Konfesjonał - 2 rys.: Widok frontalny; Ujęcie boczne, 1900 rok, 54.3 x 48.3 cm, wymiary 3: 40.5 x 58.5 cm, papier, Zbiory Muzeum Narodowego w Krakowie, Dział III, nr inw. MNK III-PL-2066.

Następnymi projektami, z których przynajmniej jeden najprawdopodobniej został zrealizowany, acz w okrojonej wersji (brak dekoracyjnego zwieńczenia widocznego na projekcie), są projekty dwu konfesjonałów mających znaleźć się w obszarze prezbiterium. Jeden z nich usytuowany po prawej stronie prezbiterium posiadający numer MNK III-PL-2066 (rys. 5) znajduje się tam po dziś dzień. Drugiego natomiast nie udało się odnaleźć, ustalono natomiast, że żaden z konfesjonałów przekazanych do kościoła w Skępem w latach 70. XX wieku przez rzeszowskich Bernardynów - nie mógł być wykonany wg projektu o numerze MNK III-PL-827 (rys. 6). Został on zaprojektowany przez Hendla z zamiarem umieszczenia go przy drzwiach zakrystii w prezbiterium.

Skąd wiadomo, że to projekty realizacyjne nie zaś inwentaryzacyjne? Na obecnym etapie badań, które domagają się gruntownej weryfikacji w kontekście dokumentacji archiwalnej, jest parę przesłanek pozwalających na takie przypuszczenie. Pierwszą z nich jest zapisek samego architekta umieszczony na drugim z projektów. Architekt powołuje się w nim na dokładnie zwymiarowane proporcje zamieszczone na rys. 5 sugerując najprawdopodobniej wykonawcy – zastosowanie proporcji identycznych także i w tym przypadku. Kolejną i najważniejszą rzeczą jest geometryczna dekoracja płycin zdobiących obudowę siedziska – identyczna jak w przypadku obudowy klęczników stalli, których Hendel jest bezdyskusyjnym projektantem.

Ostatnim z projektów dotyczących wystroju świątyni bernardyńskiej w Rzeszowie jest projekt witraża (rys. 7). Pełen prostoty geometryczny wzór wypełniający tafle przeszklenia, urozmaicony został rozmieszczonymi w trzech piono-



Rys. 7. Projekt oszklenia okna witrażem, Muzeum Narodowe w Krakowie [11]

Fig. 7. Design glazing stained glass windows, National Museum in Krakow

[11] Zygmunt Hendel, Rzeszów - Kościół przy klasztorze OO. Bernardynów - Projekt oszklenia okna witrażem, 1900 rok, 49.5 x 34 cm, tusz, papier, nr inw. MNK III-PL-818; inne projekty przeszkleń (prezentujące podobne rozwiązanie), Zbiory Muzeum Narodowego w Krakowie, Dział III, nr inw. MNK III-PL-818.

wych rzędach sześciokątami z wpisanymi weń monogramami maryjnymi naprzemian z motywem kwiatowym. Całości dopełnia dekoracyjna fitomorficza bordiura w kolorach żółcieni, złota, zieleni i fioletu (zapiski na projekcie). Główka cherubina umieszczona u góry na osi okna – to element stanowiący wspólny element wielu spośród projektów autorstwa Zygmunta Hendla, dotyczących wyposażenia wnętrza rzeszowskiej świątyni.

Zachowane projekty autorstwa Z. Hendla związane z restauracją zespołu OO. Bernardynów w Rzeszowie w większości przypadków są dowodem szacunku konserwatora do substancji zabytkowej. Stylowe uzupełnienia elementów wystroju wnętrza cechuje historyczne podejście i pokora w doborze repertuaru środków wynikająca z podporządkowania się dyktaturze restaurowanego zabytku. Stanowią one pokłosie i wypadkową ogromnej wiedzy, powściągliwości i pietyzmu charakterystycznego dla krakowskiej szkoły konserwatorskiej.

Literatura

[1] Bogdalski Cz.: Pamiętnik kościoła i klasztoru OO. Bernardynów w Leżajsku, Kraków 1929.

[2] Fischinger A., Krukowski P.: Kościół Bernardynów w Rzeszowie, [w:] Studia renesansowe, t. 3, 1963.

[3] Gosztyła M., Jagieła B.: Reprezentatywne zabytki kultury materialnej Podkarpacia, Jarosław 2004.

[4] Hendel Z., Kopera F.: Kościół św. Idziego, „Biblioteka Krakowska", Kraków 1905, 29.

[5] Hendel Z., Kopera F.: Resztki murów romańskich w kościele św. Jana w Krakowie, „Rocznik Krakowski", 1907, T. 9.

[6] Kronika Klasztoru OO. Bernardynów, 1862 r.

[7] Kurowska E., Tokarski W.P. OFM: Bazylika Ojców Bernardynów w Rzeszowie. Przewodnik, Rzeszów 2009.

[8] Laskowski A.: Pałac Klobassy w Skołyszynie - niespełniony sen naftowego magnata, [w:] Dwór polski. Zjawisko historyczne i kulturowe, Warszawa 2000.

[9] Łuszczkiewicz W.: Klasztor leżajski i jego dzieła sztuki. Wrażenia z podróży, Kraków 1895.

[10] Malczewski J.: Dzieje Rzeszowa do 1914 roku, Rzeszów 1985.

[11] Pierwsze Sprawozdanie CK Szkoły Przemysłowej we Lwowie za rok szkolny 1892/93 (z rysunkami gmachu szkolnego), Lwów 1893.

[12] Stępień P. M.: Hendel Zygmunt, [w:] Polski słownik biograficzny konserwatorów zabytków, red. Henryk Kondziela, Hanna Krzyżanowska, z. 2, Poznań, Wydaw. Poznańskie 2006.

[13] Wojewódzki Urząd Ochrony Zabytków w Rzeszowie: Karta Ewidencyjna Zabytków Architektury i Budownictwa, Kościół OO. Bernardynów w Rzeszowie, opr. J. Malczewski, 10.01.93, zał. nr 1.

[14] Zbiory Wojewódzkiego Urzędu Ochrony Zabytków w Rzeszowie: Dokumentacja Konserwatorska, Rzeszów – ołtarz główny kościoła OO. Bernardynów w Rzeszowie, opr. S. Juszczak, Rzeszów 1996.

[15] Zygmunt Hendel, [w:] Polski Słownik Biograficzny konserwatorów zabytków, red. Kondziela H., Krzyżanowska H., Poznań 2006.

CONSEVATION PROJECTS IN THE BERNARDINE CHURCH IN RZESZÓW BY ZYGMUNT HENDEL

S u m m a r y

The actions of Hendel preceding the restoration works at the complex of Friars Minor of the Observance in Rzeszów as well as his position of the restorer in the district of Tarnów and Rzeszów constituted the best legitimisation of an architect and constituted the reasons of hiring him as the manager of the works on the complex of Friars Minor of the Observance in Rzeszów.

Resulting from the retained projects, it was a challenging and huge scale undertaking. Hendel combined the studies and restoration of the monuments of architecture with architectural creativity in his professional activity. He mostly expressed himself in form of eclectics. Part of his numerous projects was not implemented due to various circumstances. In the works on historic objects, the direction of restoration was prevailing, along with a rather broad differentiation of the kind and level of intervention - from reserved, limited compliments of the historic substance (which underwent restoring works within the existing state of knowledge and technology development) to the profound reconstruction and expansion of the object.

Below, there are significant restoring and project works and their specificity described.

While describing the projects which constitute the concept of restoration at the complex of Friars Minor of Observance in Rzeszów, which were implemented and those which were not implemented, the authors discuss the example of Saint Cross altar, tabernacle in the chapel of Mother of God from Rzeszów, altar stone in the Chapel of Mother of God from Rzeszów, confessionals. The project of the stained glass window was also discussed. The aim of the article is an attempt of analysing the assumed concepts of restoring the complex of Friars Minors of Observance in Rzeszów by the architect of Cracow - Zygmunt Hendel. The in-depth characteristics of restoring projects from the first decade of the 19th century was performed on the basis of the project documentation coming from the resources of the National Museum in Cracow. It allows us to deepen knowledge of both the history of the discussed monument and its history and development of restoring monuments on the area of Galicia in the period of autonomy.

Keywords: architectural monument, church, monastery, architect, renovation of monuments, Galicia autonomy

Przesłano do redakcji: 19.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.43

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 137-144

Arkadiusz JAMROZIK[1]
Michał PYRC[2]
Maciej LIZIŃSKI[3]
Krzysztof MASAPUST[4]

MOŻLIWOŚCI POZYSKIWANIA PALIW GAZOWYCH W PROCESACH TERMICZNEGO PRZETWARZANIA ODPADÓW

Współczesne technologie termicznego przetwarzania odpadów są skutecznym sposobem neutralizacji różnego rodzaju odpadów, połączonym z wykorzystaniem ich do celów energetycznych. Spośród wielu metod termicznej neutralizacji odpadów najbardziej perspektywicznymi wydają się być piroliza i zgazowanie. Według niektórych właśnie proces zgazowania może być najlepszym rozwiązaniem spośród termicznych metod utylizacji osadu ściekowego. Zgazowanie jest procesem polegającym na termicznym rozkładzie materii organicznej przy niedoborze tlenu, w wyniku którego powstaje między innymi mieszanina gazów (H_2, CO, CO_2, CH_4) nazywana gazem generatorowym. Taki gaz, odpowiednio oczyszczony może być wykorzystany do zasilania silnika spalinowego napędzającego zespół prądotwórczy. W ramach pracy zaprezentowano prototypową instalację zgazowania osuszonego osadu ściekowego z systemem oczyszczania gazu, współpracującą z zespołem prądotwórczym 80 kW, napędzanym doładowanym silnikiem tłokowym, adaptowanym do zasilania dwupaliwowego gazem generatorowym i olejem napędowym. Wykorzystany w instalacji system oczyszczania gazu generatorowego zapewnił odseparowanie smół pogazowych uniemożliwiając ich kondensację układzie dolotowym silnika badawczego. W wyniku zgazowania z 1 tony osadu uzyskano około 1450 m^3 gazu generatorowego o wartości opałowej zawierającej się w granicach 2,5-3,5 MJ/m^3. W warunkach ciągłej całodobowej eksploatacji instalacja zgazowująca współpracująca z silnikiem badawczym była w stanie w ciągu doby zgazować około 1,8 ton osadu i wytworzyć w tym czasie około 0,9 MWh energii elektrycznej zużywając do tego celu około 50 kg oleju napędowego.

Słowa kluczowe: zgazowanie, piroliza, odpady, osad ściekowy, gaz generatorowy

[1] Autor do korespondencji: Arkadiusz Jamrozik, Instytut Maszyn Cieplnych, Politechnika Częstochowska, Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa, jamrozik@imc.pcz.czest.pl
[2] Michał Pyrc, Instytut Maszyn Cieplnych, Politechnika Częstochowska, Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa, pyrc@imc.pcz.czest.pl
[3] Maciej Liziński, Politechnika Częstochowska, mattias997@amorki.pl
[4] Krzysztof Masapust, Politechnika Częstochowska, k.masapust@gmail.com

1. Wstęp

Wiele krajów boryka się z problemem składowania i zagospodarowania odpadów komunalnych, zużytych opon i osadów ściekowych. Ponadto w krajach, w których dobrze rozwinięte jest rolnictwo, wiele odpadów biomasy takich jak słoma czy obornik jest często niezagospodarowanych. Wysypiska śmieci, które z roku na rok się powiększają, przez to, że odpady nie są wykorzystywane, mogą stać się potencjalnym surowcem do produkcji energii cieplnej czy elektrycznej. Najprostszym sposobem wykorzystania tych surowców jest ich utylizacja w spalarniach. Dzięki temu rozwiązaniu możemy odzyskać ciepło, które będzie wykorzystane na wiele sposobów między innymi w ciepłowni bądź w elektrowni do wytworzenia czy przegrzania pary w celu produkcji energii elektrycznej. Wadą tego rozwiązania jest duża emisja zanieczyszczeń tym bardziej, że Unia Europejska zobowiązuje nas do ograniczenia emisji poprzez pakiet 3x20. Bardziej efektywna jest obróbka termiczna tych surowców, dzięki której otrzymujemy wiele produktów takich jak: gaz, koksik, metale, paliwo płynne, pył. Metody termicznej obróbki, choć kosztowne, nie powodują tak dużej emisji zanieczyszczeń. W większości oparte są na technologii BAT (Best Available Technology), czyli technologii gwarantującej najwyższy dostępny poziom techniczny. Każda metoda ma swoje wady i zalety, wybór odpowiedniej determinowany jest przez rodzaj zastosowanego surowca. Dzięki tym nowoczesnym rozwiązaniom można wykorzystać odpady, które kilka lat wcześniej były składowane ze względu na brak możliwości ich przetworzenia. Jest wiele sposobów na zagospodarowanie odpadów, zaczynając od recyklingu, poprzez spalanie, aż po pirolizę i zgazowanie. Ostatnio wdrażane na świecie nowoczesne metody termicznego przetwarzania odpadów są zaawansowanymi procesami technologicznymi i w stosunku do tradycyjnego spalania są bardziej tolerancyjne dla naszego środowiska.

2. Procesy termicznego przekształcania odpadów na gaz

2.1. Proces pirolizy

Piroliza to proces transformacji termicznej bogatych w węgiel substancji organicznych, który odbywa się w podwyższonych temperaturach, w środowisku całkowicie pozbawionym tlenu bądź przy jego pomijalnie małej obecności. Proces ten jest z natury endotermiczny (wymaga dostarczenia ciepła z zewnątrz) i przebiega w temperaturach od 300 do 800°C. Skład i ilość produktów pirolizy zależy od rodzaju odpadów, ich właściwości fizykochemicznych oraz od temperatury procesu. Podczas procesu pirolizy masa odpadów zostaje przekształcona w gaz pirolityczny zawierający głownie wodór, metan, etan i ich homologi, tlenek i dwutlenek węgla, koks pirolityczny oraz fazę ciekłą zawierającą mieszaninę olejów, smół oraz wody. W przypadku termicznego przekształcania odpadów komunalnych wartość opałowa otrzymywanego gazu pirolitycznego

wynosi od 5 do 15 MJ/mn^3. Gaz ten może być spalany w kotle bez poddania go schładzaniu i oczyszczaniu. Z powodu dużego zanieczyszczania gazu pirolitycznego olejami i smołami, konieczne jest poddanie go kondensacji w celu wytrącenia zanieczyszczeń i oczyszczeniu, aby mógł być wykorzystany do spalania poza instalacją. Oczyszczony gaz może być wykorzystywany w turbinie gazowej lub spalany silniku tłokowym zespołu CHP.

2.2. Proces zgazowania

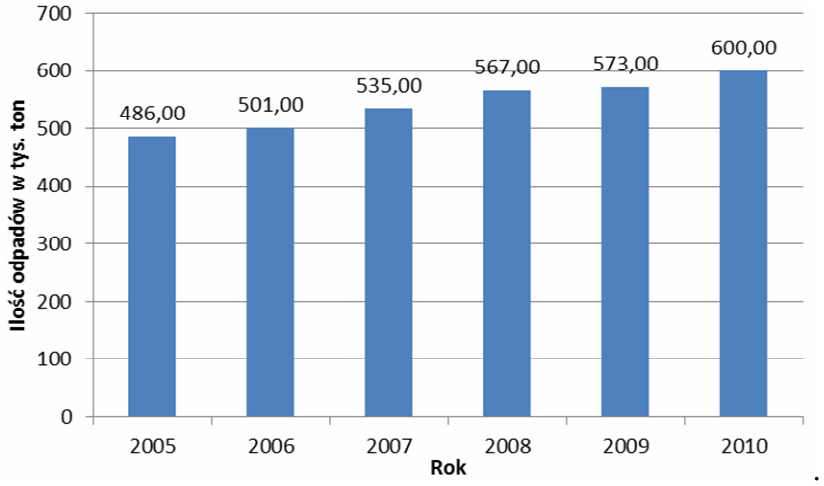
Proces zgazowania polega na termicznym rozkładzie materii organicznej przy niedoborze tlenu. W procesie zgazowania temperatury reakcji są znacznie wyższe niż w pirolizie i wynoszą od 500 nawet do 1600°C, pozwalając na zgazowanie mineralnego węgla znajdującego się w odpadach. Nowoczesne metody zgazowania pozwalają na otrzymanie praktycznie dwóch produktów, jakimi jest mieszanina gazów (H_2, CO, CO_2, CH_4) nazywana gazem generatorowym o wartości opałowej od 8 do 14 MJ/m^3 i pozostałość mineralna w postaci popiołu. Powstają również produkty uboczne takie jak kondensujące się lotne i ciekłe substancje smoliste [1]. Odpowiednio oczyszczony gaz może być wykorzystany bezpośrednio w silniku spalinowym zespołu prądotwórczego.

2.2.1. Zgazowanie biomasy odpadowej

Przebieg zgazowania biomasy składa się z kilku części. Pierwszy etap to suszenie substancji w temperaturze 100-200°C. W kolejnej fazie następuje piroliza. Z biomasy uwalniają się gazowe części lotne w podwyższonej temperaturze (ok 200-600°C) w atmosferze beztlenowej. Produktami pirolizy są frakcje stałe, produkty ciekłe oraz gaz palny:, CO, CH_4, H_2, H_2O, węglowodory aromatyczne. Faza pozostała po pirolizie podlega procesowi zgazowania, który składa się z endotermicznych i egzotermicznych reakcji chemicznych, których temperatura dochodzi do 800°C. W procesach tych dochodzi do wymiany masy i ciepła, dzięki czemu powstają gazowe składniki palne:, CO, H_2, CH_4, ciekłe, smoliste oraz stałe: koksik, żużel [1].

2.2.2. Zgazowanie osadu ściekowego

Osady ściekowe klasyfikowane, jako biomasa odpadowa, o zerowym współczynniku CO_2, pochodzą z procesu oczyszczania ścieków. W obecnym czasie możliwości przetwarzania tego odpadu są niewielkie przez to duża ilość zalega w magazynach oczyszczalni. Rysunek 1 przedstawia ilość produkowanych osadów ściekowych w Polsce w latach 2005-2010. Prognoza wzrostu ilości wytwarzanych osadów ściekowych powinna być zachętą do udoskonalania znanych i poszukiwania nowych technologii przetwarzania tego odpadu. Wg [2] proces zgazowania może być najlepszym rozwiązaniem spośród termicznych metod utylizacji osadu ściekowego.



Rys. 1. Ilość produkowanych komunalnych osadów ściekowych w Polsce w latach 2005-2010, tyś ton suchej masy, na podstawie [2]

Fig. 1. The amount of municipal sewage sludge produced in Poland in 2005-2010, thousand tonnes of dry matter, based on [2]

3. Instalacja zgazowująca osuszony osad ściekowy

Komunalny osad ściekowy jest odpadem powstającym w wyniku mechaniczno – biologicznego oczyszczania ścieków. Stosując się do obecnie obowiązujących przepisów dotyczących ograniczeń w składowaniu odpadów biodegradowalnych [3-5], w Instytucie Maszyn Cieplnych Politechniki Częstochowskiej opracowano technologię termicznego przetwarzania przefermentowanych, osuszonych, organicznych osadów ściekowych, będących ubocznym produktem procesu oczyszczania ścieków komunalnych w oczyszczalni, na energię elektryczną i ciepło. Zastosowany do badań osad ściekowy był już wysuszonym surowcem gotowym do zgazowania. Należy przy tym podkreślić, że termiczne suszenie osadów jest kosztowne i energochłonne - wymaga dostarczenia znacznej ilości energii. Energochłonność procesu zależy w największym stopniu od uwodnienia osadów. W przypadku prezentowanej technologii, pożądana wilgotność wysuszonego osadu ściekowego musiała być stosunkowo niska i nie mogła przekroczyć 10 %.

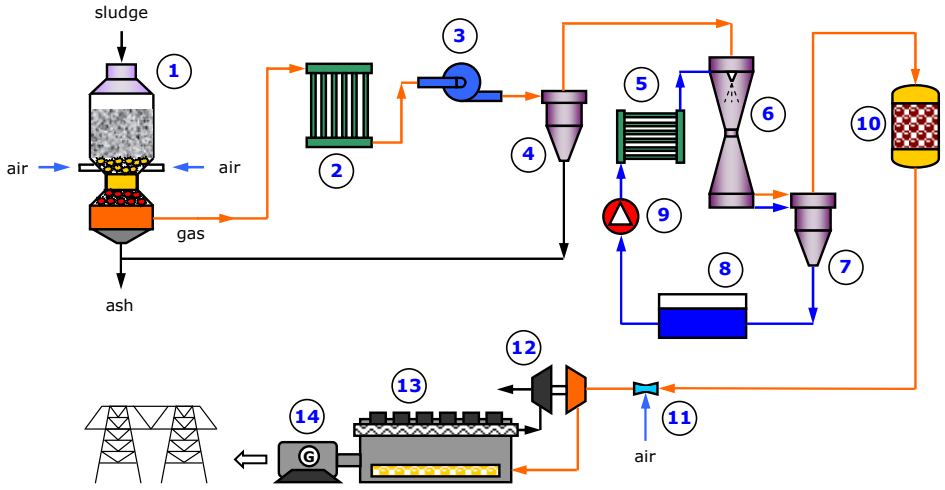
W obecnie dostępnych na rynku instalacjach przeznaczonych do zgazowania substancji organicznych, głównie drewna, dostarczających pozyskany gaz generatorowy do zasilania zespołów prądotwórczych, dominują instalacje wykorzystujące gazogeneratory współprądowe ze złożem stałym z czystym powietrzem, jako medium utleniającym. Osiągają one stosunkowo wysoką sprawność energetyczną przekraczającą 80% i wytwarzają bogaty w wodór gaz generatorowy o wartości opałowej od 4,0 do 5,5 MJ/m^3 [6]. Gaz generatorowy ze zgazowania odpadów organicznych jest paliwem silnie zanieczyszczonym, wyma-

gającym oczyszczania. W przypadku wykorzystania gazu generatorowego do zasilania silnika tłokowego należy mieć na uwadze stosunkowo ostre wymagania w zakresie jego czystości. Poza cząstkami stałymi i smołą, producenci silników określają dopuszczalne poziomy takich zanieczyszczeń jak: związki siarki, amoniak, związki krzemu, związki chloru i fluoru.

W ramach opracowanej w IMC technologii, wykonano, uruchomiono i zbadano prototypową instalację zgazowania osuszonego osadu ściekowego, instalację oczyszczalnia pozyskiwanego gazu generatorowego i zespół prądotwórczy o nominalnej wartości czynnej mocy elektrycznej 80 kW napędzany doładowanym silnikiem tłokowym adaptowanym do zasilania dwupaliwowego tym gazem i paliwem płynnym [7,8].

Proces zgazowania paliwa stałego lub biomasy realizuje się w gazogeneratorze nazywanym także zgazowarką. Koncepcję projektowanej instalacji zgazowującej oparto na zgazowarce współprądowej ze złożem stałym, w której jako medium zgazowujące wykorzystuje się czyste powietrze [9,10].

Podstawowym problemem, występującym w układach zgazowania są substancje smoliste, których głównym składnikiem są to wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne, należące do grupy najpowszechniej występujących, trwałych zanieczyszczeń organicznych. Ilość i skład substancji smolistych zależy



Rys. 2. Schemat instalacji zgazowującej osuszony osad ściekowy z systemem oczyszczania gazu generatorowego, współpracującej z zespołem prądotwórczym (silnik spalinowy i generator):
1–generator gazu, 2–chłodnica gazu, 3–wentylator, 4–wstępny cyklon, 5–chłodnica wody, 6–płuczki Venturiego, 7–cyklon, 8–zbiornik na wodę, 9–pompa wody, 10–filtr, 11–mikser gazu, 12–turbosprężarka, 13–silnik spalinowy, 14–generator

Fig. 2. Diagram of the installation dried sewage sludge gasifying and generator gas cleaning cooperating with generating set (combustion engine and generator):
1–gasifier, 2–gas cooler, 3–blower, 4–preliminary cyclone, 5–water cooler, 6–Venturi scrubber, 7–cyclone, 8–water tank, 9–water pomp, 10–filter, 11–gas mixer, 12–turbocharger, 13–combustion engine, 14–generator

od typu reaktora, parametrów procesu (ciśnienie, temperatura, czas), właściwości wsadu (rodzaj, wilgotność, rozdrobnienie wsadu). W przypadku wykorzystania gazu generatorowego do zasilania silnika tłokowego należy mieć na uwadze stosunkowo ostre wymagania w zakresie czystości gazu [8,11,12].

Zgodnie z założeniami projektu instalacji zgazowania osadu ściekowego do układu oczyszczania gazu użyto filtrów cyklonowych wraz z odpylaczami mokrymi nazywanymi skruberami Venturiego [8]. Instalacja oczyszczająca umożliwiła oddzielenie smół pogazowych zawartych w osadzie w stopniu eliminującym kondensację tych smół w układzie dolotowym doładowanego silnika tłokowego. Na rysunku 2 przedstawiono schemat zaprojektowanej i uruchomionej instalacji zgazowania osadu ściekowego wyposażonej w układ oczyszczania i spalania gazu generatorowego.

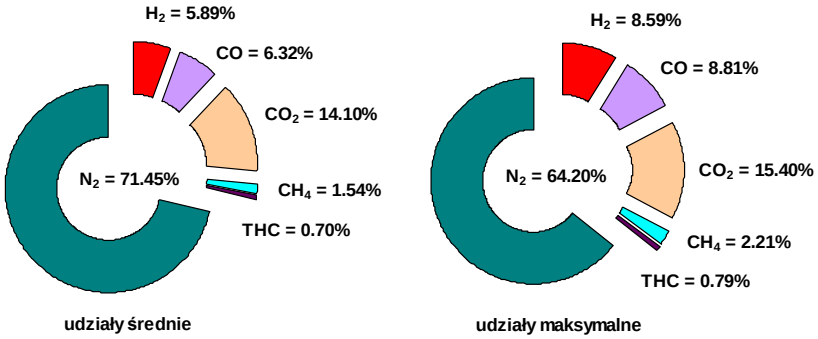
Badania działania i funkcjonalności instalacji zgazowującej oraz instalacji oczyszczającej gaz generatorowy obejmowały m.in.: analizę składu uzyskiwanego gazu generatorowego, szczelności zgazowarki, jakości oczyszczania gazu z substancji smolistych, zawartości popiołu. Stabilność procesu zgazowania uzyskiwano po czasie ok. 3h od chwili uruchomienia zgazowarki. W wyniku zgazowania z 1 tony osadu uzyskano 1450 m^3 gazu generatorowego o wartości opałowej zawierającej się w granicach 2,5-3,5 MJ/m^3. Gaz ten doprowadzano do badawczego silnika tłokowego zasilanego dwupaliwowo gazem generatorowym (udział energetyczny 75%) i olejem napędowym (udział energetyczny 25%). Silnik badawczy 6CT107 Andoria był doładowaną jednostką, wysokoprężną zainstalowaną na agregacie prądotwórczym o mocy 100kVA/80kW, adaptowaną do pracy dwupaliwowej na paliwie płynnym i gazowym.



Rys. 3. Widok układu zgazowującego wraz z agregatem prądotwórczym

Fig. 3. View of the gasifier and generating set

Na rysunku 4 przedstawiono między innymi średnie i maksymalne udziały składników palnych wchodzących w skład gazu generatorowego (H_2, CO, CH_4, THC) uzyskane w czasie serii pomiarów przeprowadzonych po ostatecznych modernizacjach instalacji zgazowującej osad ściekowy. Na podstawie składu gazu wyznaczono jego wartość opałową (W_g) oraz teoretyczne zapotrzebowanie powietrza (L_t). Średnie wartości tych wielkości wyniosły W_g = 2,62 MJ/m^3 i L_t = 0,67 m^3/m^3 a maksymalne W_g = 3,51 MJ/m^3 i L_t = 0,81 m^3/m^3.



Rys. 4. Skład gazu generatorowego uzyskany w próbie zgazowania osadu ściekowego

Fig. 4. The composition of generator gas obtained by gasification of sewage sludge

W warunkach ciągłej całodobowej eksploatacji instalacja zgazowująca współpracująca z silnikiem badawczym była w stanie w ciągu doby zgazować ok. 1,8 ton osadu i wytworzyć w tym czasie około 0,9 MWh energii elektrycznej zużywając do tego celu ok. 50 kg oleju napędowego.

4. Podsumowanie

Jedną z technologii umożliwiających termiczną neutralizację odpadów ściekowych połączoną z wykorzystaniem ich do celów energetycznych jest zgazowanie i wykorzystanie pozyskanego gazu generatorowego do zasilania silników tłokowych napędzających stacjonarne zespoły prądotwórcze. Badania instalacji zgazowującej osad ściekowy i oczyszczającej gaz generatorowy przeprowadzone w IMC PCz, wykazały, że w wyniku zgazowania z 1 tony osadu można otrzymać około 1450 m^3 gazu generatorowego o wartości opałowej zawierającej się w granicach 2,5-3,5 MJ/m^3. Zaprojektowana instalacja oczyszczająca zapewniła oddzielenie smół pogazowych zawartych w osadzie w stopniu eliminującym kondensację tych smół w układzie dolotowym badawczego silnika spalinowego. Badania pokazały, że technologia zgazowania osuszonych osadów ściekowych realizowana w instalacji wyposażonej w silnik dwupaliwowy o zmniejszonym udziale energetycznym paliwa płynnego może być uzasadniona technicznie i opłacalna ekonomicznie.

Literatura

[1] Głodek E., Trembacz J.: Efekty wykorzystania gazu uzyskanego ze zgazowania biomasy i odpadów do wypalania klinkieru, Prace Instytutu Ceramiki i Materiałów Budowlanych, nr 7, 2011, s. 97-107.
[2] Werle S., Wilk R.: Otrzymywanie paliwa gazowego na drodze zgazowania osadów ściekowych, Rynek Energii, nr 4, 2012, s. 94-97.
[3] Ustawa o odpadach. Dz. U nr 62 z 20.06.2001, poz. 629 i Dz. U. nr 7 2003, poz.78.
[4] Krajowy plan gospodarki odpadami 2010. MP nr 90 z 29.12.2006, poz. 946.
[5] Dyrektywa Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 w sprawie składowania odpadów Dz. Urz. WE L 182 z 16.07.1999.
[6] Dalimier Frédéric: The NOTAR® reactor for biomass gasification CHP or fossil fuels replacement in industrial processes, Agoria Renewable Energy Club 03 May 2011 Bio Base Europe Pilot Plant. XYLOWATT SA 2011.
[7] Tutak W., Jamrozik A.: Generator gas as a fuel to power a diesel engine, Thermal Science, Vol. 18, No. 1, 2014, s. 206-216.
[8] Cupiał K., Pyrc M., Jamrozik A., Tutak W., Kociszewski A.: Problemy oczyszczania gazu generatorowego o dużej zawartości pyłów i smół pogazowych, Silniki Gazowe 2010, serie monografie nr 183, 2010, s. 189-198.
[9] Reed B., Das A.: Handbook of Biomass Downdraft Gasifier Engine Systems. SERI/SP-271-302,. Solar Energy Research Institute, Golden Co. March 1988, s 1-140.
[10] Bhavanam A., Sastry R.C.: Biomass Gasification Processes in Downdraft Fixed Bed Reactors: A Review, International Journal of Chemical Engineering and Applications, Vol. 2, No. 6, 2011, s. 425-433.
[11] http://www.deutz.de/ {dostęp 10.10.2014 r.}.
[12] http://information.jenbacher.com/ {dostęp 10.10.2014 r.}.

THE POSSIBILITY OF OBTAINING GASEOUS FUELS BY THERMAL WASTE TREATMENT PROCESSES

S u m m a r y

Modern technologies of thermal processing of waste are an effective way to neutralize the different types of waste, combined with their use for energy purposes. Pyrolysis and gasification seem to be the most perspective of all methods of thermal neutralization of waste. According to some, just gasification process may be the best solution of thermal sludge disposal methods. Gasification is a process of thermal decomposition of organic matter using oxygen deficit, which arises as a result of, inter alia, a mixture of gases (H_2, CO, CO_2, CH_4) is called a gas generator. Such gas, properly cleaned can be used to power an internal combustion engine driving a generator. As part of the paper presents a prototype installation of gasification of dried sludge from the gas cleaning system, works with a team of 80 kW generator driven turbocharged piston engine, adapted to power the dual fuel gas and diesel generator. The generator gas cleaning system allowed the separation of gas pitch in the sludge and prevented the condensation of tars in the intake test supercharged piston engine. As a result of gasification of the precipitate, a one tone of about 1450 m^3 of gas with a calorific value generator is in the range 2.5-3.5 MJ/m^3. Under continuous operating hour installation gasifying cooperating with the test engine was able to gasify about 1.8 t of sludge per day and prepared at the time of about 0,9 MWh of electrical energy for this purpose while consuming about 50 kg of diesel fuel.

Keywords: gasification, pyrolysis, waste, sludge, gas generator

Przesłano do redakcji: 18.11.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.44

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 145-156

Arkadiusz JAMROZIK[1]
Michał PYRC[2]
Marta ŚWIĄCIK[3]
Magdalena SCHAB[4]

OCZYSZCZANIE I PRZETWARZANIE GAZU GENERATOROWEGO ZE ZGAZOWANIA ODPADÓW

Energia uzyskiwana z odpadów jest nie tylko cennym źródłem energii odnawialnej, ale także niezwykle przydatną i opłacalną metodą redukcji ilości odpadów składowanych na wysypiskach śmieci. Jedną z metod neutralizacji i energetycznego wykorzystania odpadów jest technologia zgazowania i wykorzystania pozyskanego gazu generatorowego do zasilania silników spalinowych w zespołach prądotwórczych. W przypadku wykorzystania gazu generatorowego do zasilania silnika tłokowego należy mieć na uwadze stosunkowo ostre wymagania w zakresie czystości gazu. Podstawowym problemem, występującym w układach zgazowania są substancje smoliste, które kondensując, osiadają na powierzchniach wewnętrznych kanału dolotowego silnika, blokując przepływ oraz na elementach układu rozrządu uniemożliwiając poprawną pracę silnika. Ponadto smoła pogazowa i zawarte w niej związki chemiczne mogą powodować korozję i erozję ścian cylindra silnika. W artykule scharakteryzowano proces zgazowania jako przykład termicznej neutralizacji odpadów oraz proces oczyszczania gaz generatorowego ze zgazowania. Zaprezentowano uruchomioną w Instytucie Maszyn Cieplnych Politechniki Częstochowskiej instalację oczyszczania gazu generatorowego uzyskanego ze zgazowania osadu ściekowego będącego ubocznym produktem procesu oczyszczania ścieków komunalnych w oczyszczalni. W instalacji zgazowania osadu ściekowego do układu oczyszczania gazu użyto filtrów cyklonowych wraz z odpylaczami mokrymi nazywanymi skruberami Venturiego. Instalacja oczyszczająca zapewniła oddzielenie smół pogazowych zawartych w osadzie w stopniu eliminującym kondensację tych smół w układzie dolotowym badawczego doładowanego silnika tłokowego napędzającego generator prądotwórczy.

Słowa kluczowe: zgazowanie, gaz generatorowy, osad ściekowy, instalacja oczyszczania gazu, silnik spalinowy

[1] Autor do korespondencji: Arkadiusz Jamrozik, Instytut Maszyn Cieplnych, Politechnika Częstochowska, Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa, jamrozik@imc.pcz.czest.pl
[2] Michał Pyrc, Instytut Maszyn Cieplnych, Politechnika Częstochowska, Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa, pyrc@imc.pcz.czest.pl
[3] Marta Świącik, Politechnika Częstochowska, martus1a92@o2.pl
[4] Magdalena Schab, Politechnika Częstochowska, graschab@wp.pl

1. Wstęp

Światowe zapotrzebowanie na energię ciągle rośnie. Jest to szczególnie widoczne w regionach rozwijających się, w których obserwuje się szybko postępującą urbanizację oraz ciągłe bogacenie się społeczeństwa. Aktualnie większość energii na świecie pochodzi z paliw kopalnych tj. węgiel, ropa naftowa czy gazu ziemny. Jednak według Dyrektywy Unijnej nr 2009/28/WE, do 2020 roku, udział energii odnawialnej w całkowitym zużyciu energii powinien wynieść 20% (tzw. Pakiet 3x20). Dla każdego państwa członkowskiego ustanowione są cele strategiczne w tym zakresie (projekt Dyrektywy UE 2008/0016), dla Polski udział ten wynosi 15% [1-3].

Za źródło o największym potencjale technicznym na podstawie danych pochodzących ze Strategii Rozwoju Energetyki Odnawialnej opracowanej przez Ministerstwo Środowiska uznaje się biomasę. Najnowsza definicja biomasy została zawarta w Dyrektywie Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z 23 kwietnia 2009 roku [4]. Pod pojęciem biomasy (art. 2 pkt. e) określono ulegające biodegradacji frakcje produktów, odpadów i pozostałości pochodzenia biologicznego z rolnictwa (łącznie z substancjami roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i związanych z nimi działów przemysłu, w tym rybołówstwa lub akwakultury, a także ulegające biodegradacji frakcje odpadów przemysłowych i miejskich. Spośród odpadow miejskich coraz częściej do energetycznego przetwarzania wykorzystuje się organiczne osady ściekowe, będące ubocznym produktem procesu oczyszczania ścieków komunalnych w oczyszczalni [5].

1.1. Biomasa oraz potencjał energetyczny procesu jej zgazowania

Zalety zgazowania biomasy, w odniesieniu do innych metod jej energetycznego wykorzystania, to:

- możliwość różnorodnego wykorzystania powstałego gazu: produkcja energii cieplnej i elektrycznej, jako surowiec w produkcji paliw w katalitycznych procesach syntezy oraz wytwarzanie SNG (Substitute Natural Gas) – zastępczego gazu ziemnego;
- niska emisja szkodliwych związków;
- większa sprawność wytwarzania energii;
- możliwość stosowania surowej biomasy o dużym stopniu zawilgocenia.

Do głównych surowców wykorzystywanych podczas procesu zgazowania biomasy należą: słoma; drewno z odpadów z procesów technologicznych; odpady z produkcji rolnej i leśnej; rośliny z upraw energetycznych; odpady z hodowli zwierząt oraz frakcja biomasy pochodząca z odpadów komunalnych, np. osady ściekowe.

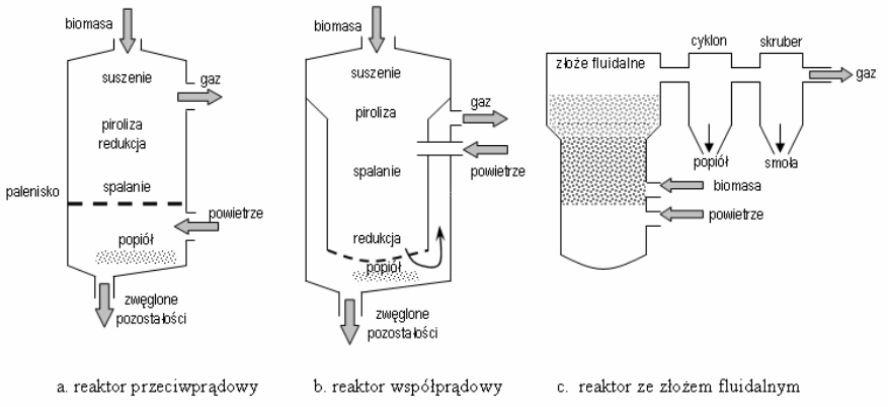
Podstawowe, charakterystyczne cechy biomasy stanowiącej surowiec do zgazowania to: skład elementarny, wartość opałowa, gęstość (ciężar nasypowy), wilgotność i zawartość popiołu [6].

1.2. Technologia zgazowania biomasy

Proces zgazowania składa się z poszczególnych procesów cząstkowych. Pierwszym etapem jest suszenie mokrej biomasy, aż uzyska poziom wilgoci nie przekraczający 10-15%. Następnie zachodzi reakcja pirolizy, podczas której wyodrębniają się substancje lotne, a przy zwiększeniu temperatury utleniają się frakcje lotne. Dzięki temu powstaje CO, CO_2 i para wodna. Przejście uzyskanych frakcji lotnych przez warstwę rozżarzonego surowca powoduje zajście procesów redukcji, podczas których otrzymujemy CO, H_2 i CH_4.
Podstawowe parametry procesu zgazowania to: temperatura, ciśnienie, szybkość podawania reagentów, warunki powierzchniowe, szybkość przepływu gazu oraz obecność katalizatora. Wpływ temperatury i ciśnienia na przebieg poszczególnych reakcji procesu zgazowania biomasy, czyli na skład wytworzonego gazu możemy przewidzieć przez analizę produktów reakcji.
Najważniejszym elementem zgazowarki jest gazogenerator, nazywany też komorą bądź reaktorem zgazowania. To w nim właśnie zachodzi szereg reakcji fizyko-chemicznych, w wyniku których powstaje gaz. Gazogeneratory dzielimy według następujących kryteriów:

- czynniki zgazowujące: tlen, powietrze, para wodna, dwutlenek węgla oraz ich mieszaniny;
- sposób dostarczenia ciepła do procesu: allotermiczne, autotermiczne, ogrzewane pośrednio i bezpośrednio;
- parametry procesu: ciśnienie i temperatura;
- konstrukcje reaktorów: ze złożem stałym, fluidalnym oraz strumieniowe.

Od tego, w jaki sposób będzie wykorzystany gaz zależy wybór technologii zgazowania. Spalając bezpośrednio gaz w kotłach i w instalacjach technologicznych można pozwolić na zastosowanie najtańszej technologii o niskich wy-



Rys. 1. Wybrane typy reaktorów zgazowania biomasy, na podstawie [7]

Fig. 1. Selected types of biomass gasification reactors, based on [7]

maganiach jakości biomasy, zazwyczaj z zastosowaniem reaktorów ze złożem stałym, przeciwprądowym, gdyż wtedy wymagania wobec gazu oraz sposobu pracy generatora są najmniej restrykcyjne. Kiedy chcemy przeprowadzić zgazowanie dla uzyskania gazu syntezowego, należy zastosować reaktory ze złożem fluidalnym, zapewniając odpowiednie moce, dyspozycyjność układu i czystość gazu. Jeżeli otrzymanym gazem mają być zasilane turbiny gazowe, stosowane są reaktory ze złożem fluidalnym bądź reaktory strumieniowe. Podczas zasilania silników tłokowych stosuje się zazwyczaj układy ze złożem stałym, głównie dolno-ciągowe.

1.3. Skład surowego gazu generatorowego oraz możliwości jego wykorzystania

Gaz uzyskany ze zgazowania odpadów może być spalany bezpośrednio w kotle parowym. Otrzymana w ten sposób para może służyć do napędu turbiny w elektrociepłowni. Gaz generatorowy może także znaleźć zastosowanie w turbinie gazowej bądź w układach kogeneracyjnych z silnikami tłokowymi. Gaz ten można również zamieniać w ogniwach paliwowych na energię elektryczną.

Na skład surowego gazu generatorowego wpływ ma wiele czynników tj. czynnik zgazowujący, parametry procesu zgazowania odpadów, konstrukcja gazogeneratora oraz skład surowców.

Można zauważyć, że w przypadku zgazowania powietrzem w uzyskanym gazie znajdują się duże ilości azotu, co obniża wartość jego ciepła spalania. W przypadku gdy czynnikiem zgazowującym jest para wodna, następuje zwiększenie stężenia wodoru w gazie, co ma dalsze znaczenie w procesie metanizacji. Poza czynnikiem zgazowującym, na skład gazu wpływ ma także temperatura procesu. Wraz z jej wzrostem dochodzi do spadku zawartości metanu w gazie.

Tabela. 1. Przykładowy skład gazu z procesu gazyfikacji na złożu stałym, na podstawie [8]

Table. 1. Composition of producer gas taken from fixed bed gasifier, based on [8]

Składnik	Wymiar	Gazogenerator przeciwprądowy	Gazogenerator współprądowy
CO	%	15-20	10-22
H_2	%	10-14	15-21
CO_2	%	8-10	11-13
CH_4	%	2-3	1-5
N_2	%	pozostałość	pozostałość
H_2O	%	10-20	10-20
W_d	MJ/m_n^3	3.7-5.1	4.0-5.6
cząstki stałe	mg/m_n^3	100-3000	20-8000
substancje smoliste	mg/m_n^3	10000-150000	1-6000

W gazie ze zgazowania odpadów niebezpiecznymi zanieczyszczeniami są: smoły, amoniak i związki siarki, które należy oczyścić do bardzo niskiego poziomu. Równocześnie procesy oczyszczania gazu syntezowego nie mogą zmierzać do przekształcenia lub usunięcia obecnego w nim metanu.

W przypadku wykorzystania gazu generatorowego do zasilania silnika tłokowego należy mieć na uwadze stosunkowo ostre wymagania w zakresie czystości gazu. Poza cząstkami stałymi i smołą, producenci silników [9,10] określają dopuszczalne poziomy takich zanieczyszczeń jak [11]:

- związki siarki: mniej niż 2000 – 2200 mg/m_n^3 (w przeliczeniu na H_2S),
- amoniak: mniej niż 50 – 100 mg/m_n^3,
- związki krzemu (siloxany): mniej niż 10 – 50 mg/m_n^3 (odpowiedzialne za formowanie się depozytów w układzie przepływowym silnika),
- związki chloru i fluoru (halogenki): mniej niż 100 – 400 mg/m_n^3 (wpływają na zmniejszenie właściwości smarnych oleju silnikowego).

Tabela. 2. Pożądany skład gazu generatorowego do silników Deutz Energy, na podstawie [9]
Table. 2. Desirable composition of producer gas for Deutz Energy engines, based on [9]

Wielkość	**Symbol**	**Jednostka**	**Wartość**
Wartość opałowa	Wg	MJ/m_n^3	≥14.4
Dwutlenek węgla	CO_2/Hu	Vol%/kWh/m_n^3	<10
Siarka	S	mg/m_n^3 CH_4	<2200
Siarkowodór	H_2S	Vol%/m_n^3 CH_4	<0.15
Chlor	Cl	mg/m_n^3 CH_4	<100
Fluor	F	mg/m_n^3 CH_4	<50
Sum. chlor i fluor	(Cl+F)	mg/m_n^3 CH_4	<100
Amoniak	NH_3	mg/m_n^3 CH_4	<30
Pył		mg/m_n^3 CH_4	<10
Ziarnistość		μm	3 - 10
Smoły oleiste (>C5<C10)		mg/m_n^3 CH_4	<3000
Smoły oleiste(>C10)		mg/m_n^3 CH_4	<250
Krzem	Si	mg/m_n^3 CH_4	<10
Wilgotność	φ	%	<80

1.4. Metody oczyszczania gazu powstałego ze zgazowania odpadów

Wśród zanieczyszczeń dużym problemem są smoły, które kondensując, blokują rurociągi i powodują uszkodzenie silników oraz turbin. Związki azotu, siarki i chloru są źródłem emisji związków regulowanych przepisami, takich jak NO_x i SO_2 i mają także działanie korozyjne. Przebieg oczyszczania gazu generatorowego obejmuje następujące metody: chemiczne (np. katalityczne, selek-

tywne utlenianie lub katalityczna konwersja smoły) oraz oczyszczanie mechaniczne (skrubery, filtry) i fizyczne (kolumny natryskowe).

Metody chemiczne pozwalają na przemianę niepożądanych składników gazu, takich jak smoły i amoniak, w składniki podnoszące jego wartość energetyczną i chemiczną. W przypadku neutralizacji tych zanieczyszczeń wykorzystuje się katalizatory aktywne stosowane w samym generatorze oraz w pomocniczych reaktorach katalitycznych, w których reakcje związków smołowych przebiegają w temperaturach zbliżonych do tych, jakie panują w reaktorze zgazowania. Niekiedy też wprowadza się do nich dodatkowy czynnik utleniający (O_2 lub H_2O). W procesie krakingu lub hydrokrakingu związki smołowe rozpadają się na lekkie węglowodory lub konwertują do CO i H_2. Ze względu na powstający w reakcji metan, hydrokraking może być bardzo pożądaną lub niepożądaną reakcją, w zależności od dalszego kierunku przetwarzania gazu syntezowego. Katalizatorami stosowanymi do krakingu są kwaśne związki w postaci stałej, np. tlenek glinu, oraz zeolity, heteropolikwasy i siarczanowane tlenki metalu. Innymi metodami usuwania smoły są: kraking termiczny, kraking smół w obecności plazmy lub wymywanie w odpowiednio dobranych rozpuszczalnikach [6]. Stosowane są również metody wykorzystujące wyładowania elektryczne. Są to badania z wyładowaniem koronowym impulsowym, barierowym, wstecznym koronowym, RF i mikrofalowym.

Podczas zgazowania większa część azotu znajdującego sie w odpadach zostaje przekształcona do postaci amoniaku i N_2. Istnienie w gazie związków azotu jest niewskazane, ze względu na tworzenie się podczas spalania NO_x. Stosowane się dwie metody usuwania amoniaku: rozkład oraz selektywne utlenianie. Podczas rozkładu amoniaku do N_2 i H_2 nie wytwarzają się żadne zanieczyszczenia. Katalizatorami w tej reakcji są: ruten, azotki, tlenoazotki oraz węgliki. Selektywne utlenianie polega na dodawaniu do gazu ze zgazowania, czynnika utleniającego jak np.: O_2, NO lub mieszanina NO/O_2.

Kolejnym zanieczyszczeniem gazu ze zgazowania odpadów jest siarka. Obecność związków siarki w gazie ma działanie korozyjne na eksploatowane urządzenia, poprzez niszczące działanie kwasu siarkowego powstałego w reakcji z tlenem i para wodną. Dla oczyszczania gazu z siarki wykorzystywane są złoża z tlenkiem metalu. Mieszaniny tlenków manganu z miedzią i wanadem oraz MnO charakteryzują się wysoką zdolnością eliminowania siarki w temperaturze powyżej 600ºC. W przypadku konieczności głębokiego odsiarczania gazu generatorowego wykorzystuje sie metodę redox z zastosowaniem chelatów żelaza. Pozostałymi metodami usuwania związków siarki są metody aminowe, wykorzystujące absorpcję chemiczną lub procesy Rectisol i Selexol, oparte na absorpcji fizycznej.

Najbardziej powszechną metodę oczyszczania gazu ze zgazowania jest oczyszczanie mechaniczno-fizyczne, które pomimo stosunkowo wysokich kosztów daje dobre rezultaty.

W artykule przedstawiono instalację oczyszczania gazu generatorowego powstałego ze zgazowania osadu ściekowego, którą zaprojektowano, wykonano i uruchomiono w Instytucie Maszyn Cieplnych Politechniki Częstochowskiej.

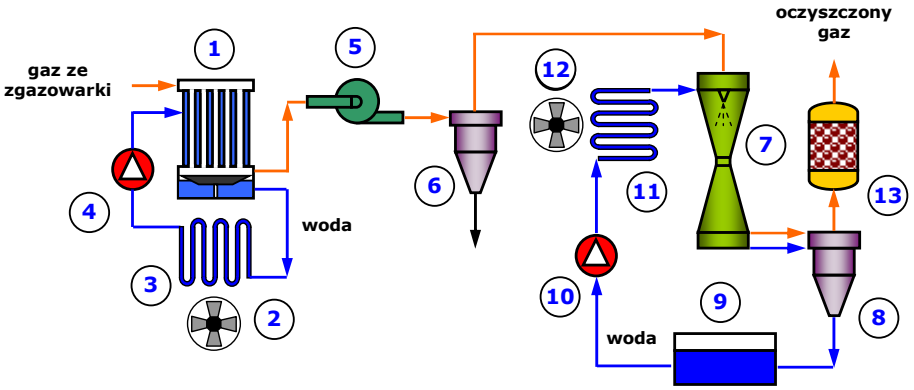
2. Instalacja oczyszczania gazu generatorowego

Stosując się do obowiązujących ograniczeń w składowaniu odpadów biodegradowalnych, w Instytucie Maszyn Cieplnych Politechniki Częstochowskiej opracowano technologię termicznego przetwarzania przefermentowanych, podsuszonych, organicznych osadów ściekowych, będących ubocznym produktem procesu oczyszczania ścieków komunalnych w oczyszczalni, na energię elektryczną i ciepło. W ramach opracowanej w technologii, wykonano, uruchomiono i zbadano prototypową instalację zgazowania osuszonego osadu ściekowego, instalację oczyszczalnia pozyskiwanego gazu generatorowego i zespół prądotwórczy o nominalnej wartości czynnej mocy elektrycznej 80 kW napędzany doładowanym silnikiem tłokowym adaptowanym do zasilania dwupaliwowego tym gazem i paliwem płynnym [12,13].
Zastosowany gazogenerator współprądowy ze złożem stałym wytwarzał bogaty w wodór gaz generatorowy o wartości opałowej od 2,42 do 3,19 MJ/m^3 zawierający stosunkowo małą ilość pyłu (100 – 1000 mg/m^3) i niskowrzących smół (100-500 mg/m^3). Ilość tych zanieczyszczeń okazała się jednak znacząco większa od górnych granic wartości dopuszczalnych dla silnika tłokowego (do 50 mg/m^3 pyłu i do 100 mg/m^3 smoły), dlatego surowy gaz generatorowy nie mógł być doprowadzany do silnika bezpośrednio z gazogeneratora. Przed doprowadzeniem do silnika gaz musiał być schłodzony oraz dokładnie oczyszczony w dodatkowej, dość skomplikowanej, instalacji zawierającej układ filtrów cyklonowych, chłodnic, zraszaczy, osuszaczy i filtrów porowatych [14].

Zbudowana w IMC zgazowarka wytwarza ok. 3,5 m^3/min gorącego gazu generatorowego o temperaturze do ok. 500°C. Gaz ten zawiera tlenek węgla, wodór, dwutlenek węgla, metan oraz azot i jest zanieczyszczony następującymi substancjami: pył, smoły pogazowe i para wodna.
Gaz wychodzący ze zgazowarki jest chłodzony w chłodnicy wodno-rurkowej do temperatury poniżej 90°C i oczyszczony z zanieczyszczeń. Proces oczyszczania jest realizowany w instalacji oczyszczającej, w skład której wchodzi (rys.2):

- separator cyklonowy,
- chłodnica gazu,
- chłodnica cieczy obiegowej chłodnicy gazu z wentylatorem nadmuchowym,
- skruber systemu Venturi,
- chłodnica cieczy obiegowej skrubera z wentylatorem nadmuchowym,
- filtr z wymiennym wkładem porowatym,
- zbiorniki kondensatu wody,
- pompa cieczy,
- dmuchawa o wydajności 0,06 m^3/s i sprężu min. 0,5 kPa.

Ze względu na agresywny charakter gazu instalacja oczyszczająca wykonana jest ze stali odpornej na korozję, a wszystkie elementy zostały zainstalowane na wspólnej ramie (rys. 3).



Rys. 2. Schemat instalacji oczyszczającej gaz generatorowy
1 - chłodnica wodno-rurkowa typu U schładzająca gorący gaz generatorowy, 2 - wentylator nadmuchujący powietrze na chłodnicę wody, 3 - chłodnica schładzająca gorącą wodę wypływającą z chłodnicy gazu, 4 - pompa tłocząca chłodną wodę z chłodnicy wody do chłodnicy gazu, 5 - dmuchawa Rootsa, 6 - cyklonowy separator pyłu, 7 - skruber z nastawną dyszą Venturiego, 8 - cyklon separujący krople wody, 9 - zamknięty zbiornik wody rozpylonej w skruberze, 10 - pompa obiegowa tłocząca wodę do chłodnicy skrubera, 11 - chłodnica wody skroplonej w zbiorniku skrubera, 12 - wentylator nadmuchujący powietrze na chłodnicę wody, 13 - zbiornik filtra z porowatym wkładem

Fig. 2. Diagram of the generator gas cleaning system
1 - tubular water-cooler type U, cooling hot gas generator, 2 - fan blowing air at the water cooler, 3 - radiator cooling hot water flowing from the gas cooler, 4 - pump pumping cold water from the water cooler to the gas cooler, 5 - Roots blower, 6 - cyclone dust separator, 7 - scrubber with adjustable Venturi nozzle, 8 - cyclone separating water drops, 9 - closed container of water sprayed in the scrubber, 10 - circulating pump pumping the water to the scrubber cooler, 11 - cooler water condensation in the tank scrubber, 12 - fan blowing air at the water cooler, 13 - reservoir with a porous filter cartridge

Podstawowym elementem oczyszczającym gaz generatorowy z zanieczyszczeń stałych jest cyklon, w którym wykorzystuje się działanie sił odśrodkowych na cząstki stałe i aerozolowe. Cyklon składa się z następujących części:
– cylindrycznej, w której zabudowane są: przewód wlotowy oraz wylotowy;
– stożkowej, zakończonej zbiornikiem pyłu.

Między częścią stożkową, a zbiornikiem pyłu zabudowany jest odwrócony stożek, którego zadaniem jest zabezpieczenie pyłu zgromadzonego w zbiorniku przed porwaniem przez strugę gazu.

W klasycznym cyklonie gaz zapylony wprowadzany jest stycznie do obudowy cylindrycznej. Jej kształt powoduje zawirowanie strugi gazu, która ruchem spiralnym przesuwa się w dół urządzenia. Powstająca na skutek ruchu wirowego siła odśrodkowa odrzuca ziarna pyłu zawarte w gazie na ścianki zewnętrzne urządzenia, po których zsuwają się one do zbiornika pyłu. Struga gazu w dole cyklonu zmienia kierunek o 180° i ruchem spiralnym poprzez przewód wylotowy wychodzi z urządzenia



Rys. 3. Widok elementów instalacji oczyszczania gazu

Fig. 3. View of gas cleaning system components

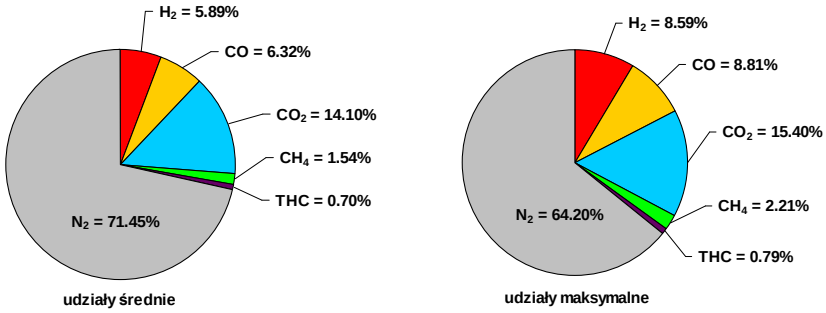
Proces wydzielania cząstek w cyklonie zależy głównie od przyspieszenia dośrodkowego, czas przebywania gazu w cyklonie zależy od założonego profilu przepływu i może zmieniać się od bardzo krótkiego (odpowiadającego wlotowi i wylotowi) do długiego. Podstawową zaletą tego elementu jest prosta i zwarta budowa pozbawiona części ruchomych oraz możliwość pracy w wysokich temperaturach i dużym ciśnieniu. Podstawową wadą jest znaczący spadek ciśnienia gazu niezbędny do skutecznego oczyszczenia. W rozwiązaniu klasycznym, jakie zastosowano w układzie oczyszczania gazu generatorowego, strumień gazu jest wprowadzany stycznie do cylindrycznej części cyklonu.

Kolejnym elementem na drodze oczyszczania gazu generatorowego jest odpylacz mokry czyli skruber. Strumień zasysanego gazu jest oczyszczany wskutek kontaktu z rozpyloną cieczą. W procesie oczyszczania mokrego najczęściej stosowana cieczą jest woda. Stosowane są także płynne węglowodory np. olej napędowy dobrze rozpuszczający smołę. Skruber także bierze udział w procesie schładzania gazu. Strumień gazu jest doprowadzany do skrubera, gdzie zanieczyszczenia z gazu są przenoszone do cieczy. W wyniku burzliwego kontaktu gazu z cieczą tworzą się krople, które są unoszone z gazem oczyszczonym. W celu pozbycia się tego niekorzystnego zjawiska stosuje się odkraplacz. Ciecz z zabsorbowanymi cząstkami zanieczyszczeń w postaci zawiesiny odprowadzana jest ze skrubera i odkraplacza i odprowadzana do separatora. W celu ograniczenia zużycia wody stosuje się układ zamknięty.

W układzie oczyszczania gazu zastosowano skruber Venturiego z nastawną gardzielą. W tego typu skruberze duża burzliwość i duże prędkości względne gazu i kropel wody decydują o sprawności oczyszczania gazu. Bardzo istotnym parametrem skrubera Venturiego jest długość gardzieli. Ciecz doprowadzana jest za pomocą dysz, które rozpraszają wodę na krople, które są unoszone z gazem do gardzieli. Istotnym parametrem wpływającym na sprawność skrubera jest stosunek objętości cieczy do objętości gazu. Ze wzrostem prędkości gazu maleją rozmiary kropel a wzrasta ich liczba, co zwiększa sprawność oczyszczania. W procesie oczyszczania ciecz odbiera ciepło od jeszcze gorącego gazu, dlatego występuje tu konieczność schładzania cieczy podawanej do dysz skrubera. Układ chłodzenia chłodnicy rurowej jest zamknięty. W przypadku układu chłodzenia skrubera zastosowano układ zamknięty z odprowadzeniem kondensujących zanieczyszczeń.

3. Wyniki procesu oczyszczania gazu generatorowego

Badania funkcjonalności instalacji oczyszczającej gaz generatorowy obejmowały m.in.: pomiary składu gazu generatorowego przed i za instalacją oczyszczania oraz pomiary kondensatu (smoła pogazowa i pył) pozyskanego w poszczególnych separatorach instalacji oczyszczającej w czasie ustalonej pracy instalacji zgazowującej. Stabilność procesu zgazowania uzyskiwano po czasie ok. 3h od chwili uruchomienia zgazowarki.



Rys. 4. Skład gazu generatorowego uzyskany w próbie zgazowania osadu ściekowego

Fig. 4. The composition of generator gas obtained by gasification of sewage sludge

Na rysunku 4 przedstawiono między innymi średnie i maksymalne udziały składników palnych wchodzących w skład gazu generatorowego (H_2, CO, CH_4, THC) uzyskane w czasie serii pomiarów przeprowadzonych po ostatecznych modernizacjach instalacji zgazowującej osad ściekowy. Na podstawie składu gazu wyznaczono jego wartość opałową (W_g) oraz teoretyczne zapotrzebowanie powietrza (L_t). Średnie wartości tych wielkości wyniosły W_g = 2,62 MJ/m^3 i L_t = 0,67 m^3/m^3 a maksymalne W_g = 3,51 MJ/m^3 i L_t = 0,81 m^3/m^3.

Instalacja oczyszczająca zapewniła oddzielenie smół pogazowych zawartych w osadzie w stopniu eliminującym kondensację tych smół w układzie dolotowym

doładowanego silnika tłokowego z chłodnicą sprężonej mieszanki gazu generatorowego z powietrzem. W czasie jednej z przeprowadzonych prób zgazowania osadu trwającej 5,5 godziny ustalonej pracy instalacji zgazowującej z rzeczywistym strumieniem gazu w granicach 3,0 m^3/min uzyskano gaz o pożądanym składzie (tabela 3) oraz około 24 dm^3 kondensatu.

Po osiągnięciu stabilnej pracy zgazowarki oraz zadowalającego składu gazu generatorowego przeprowadzono badania silnika spalinowego zasilanego gazem generatorowym oraz olejem napędowym. Badania te są tematem kolejnych publikacji.

4. Podsumowanie

Zgazowanie może być skuteczną technologią termicznego przetwarzania przefermentowanych, podsuszonych, organicznych osadów ściekowych, będących ubocznym produktem procesu oczyszczania ścieków komunalnych w oczyszczalni, na energię elektryczną i ciepło. Uzyskany w procesie zgazowania gaz generatorowy, może być z powodzeniem wykorzystany do zasilania silnika tłokowego napędzającego zespół prądotwórczy. Gaz generatorowy oprócz odpowiedniej wartości opałowej, powinien być czysty, pozbawiony pyłu i smoły pogazowej, aby nie wpływać negatywnie na żywotność silnika. Przed doprowadzeniem gazu do silnika musi być on zatem oczyszczony. Doświadczenia eksploatacyjne wielu producentów instalacji zgazowujących pokazują, że systemy oczyszczania gazu nie pracują bezproblemowo i szczególnie w instalacjach małej mocy nie są w stanie zapewnić odpowiedniej czystości gazu.

Zaprezentowana w pracy instalacja oczyszczania gazu generatorowego pozyskanego ze zgazowania osadu ściekowego zapewniła oddzielenie smół pogazowych zawartych w osadzie. Badania kontrolne części układu dolotowego badawczego silnika tłokowego przeprowadzone po ok. 10 godzinach eksploatacji zespołu prądotwórczego zasilanego gazem generatorowym oczyszczonym w zbudowanej instalacji wykazały, że niepożądane zjawisko kondensacji smół pogazowych zostało wyeliminowane w stopniu umożliwiającym wprowadzenie tego gazu do silnika tłokowego.

Literatura

[1] Ustawa o odpadach. Dz. U nr 62 z 20.06.2001, poz. 629 i Dz. U. nr 7 2003, poz.78.

[2] Krajowy plan gospodarki odpadami 2010. MP nr 90 z 29.12.2006, poz. 946.

[3] Dyrektywa Rady 1999/31/WE z dnia 26 kwietnia 1999 w sprawie składowania odpadów Dz. Urz. WE L 182 z 16.07.1999.

[4] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23.04.2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniającej i w następstwie uchylającej Dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE.

[5] Cupiał K., Jamrozik A., Kociszewski A., Pyrc M., Tutak W., Grab-Rogaliński K.: Instalacja zgazowująca osuszony osad ściekowy, Motrol 2011, Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa, tom 13, 2011, s. 80-13.

[6] Piskowska-Wasiak J.: Oczyszczanie i przetwarzanie gazu ze zgazowania biomasy w celu wytworzenia SNG (Substitute Natural Gas, NAFTA-GAZ, nr 5, 2011, s. 346-360.
[7] Warowny W.: Zgazowanie biomasy. Technologia, Poleko, Poznań, 22 listopada 2007.
[8] Pogoreutz M.: Economical and technological comparision of small-scale CHP on the basis of biomass. 1st World Conference on Biomass for Energy and Industry. Seville 2000.
[9] http://www.deutz.de/ [dostęp 15.10.2014 r.]
[10] http://information.jenbacher.com/ [dostęp 15.10.2014 r.]
[11] Kalina J.: Wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej w skojarzeniu w układach rozproszonych małej mocy, zintegrowanych ze zgazowaniem biomasy, Gospodarka Paliwami i Energią, nr 11-12, 2004, s. 15-22.
[12] Tutak W., Jamrozik A.: Generator gas as a fuel to power a diesel engine. Thermal Science, vol. 18, no. 1, 2014, s. 206-216.
[13] Jamrozik A., Tutak W.: Co-firing of generator gas in the generating set with the supercharged diesel engine. Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects, przyjęty do druku, 2014
[14] Cupiał K., Pyrc M., Jamrozik A., Tutak W., Kociszewski A.: Problemy oczyszczania gazu generatorowego o dużej zawartości pyłów i smół pogazowych, Silniki Gazowe 2010, nr 183, 2010, s. 189-198.

CLEANING AND PROCESSING OF GENERATOR GAS FROM GASFICATION WASTE

S u m m a r y

Energy from waste is not only a valuable source of renewable energy, but also extremely useful and cost-effective method of reducing the amount of waste deposited in landfills. One of methods of neutralization and energetic utilization of waste is technology of gasification and the use of acquired generator gas to power internal combustion engines in power generating sets. When using generator gas to power a piston engine you should remember about the relatively stringent requirements for gas purity. The main problem which occurs in gasification systems are tar products which condense and settle on the inner surfaces of the intake manifold of the engine. They block the flow and timing system components preventing proper operation of the engine. Furthermore, the gas pitch containing chemical compounds can cause corrosion and erosion of the engine cylinder wall. The study characterized the selected technologies of gasification of waste and gas rectification as well as generator gas cleaning set obtained from gasification of sewage sludge that is a by-product of the process in municipal wastewater treatment plant. Cleaning system assured separation of after-gas tars contained in the sediment to the extent eliminating the condensation of these tars in the intake system of supercharged piston engine. The article characterizes the process of gasification which is an example of thermal neutralization of waste and cleaning process gas from gasification generator. Presented running at the Institute of Thermal Machinery Czestochowa University of Technology purification plant generator gas obtained from gasification of sewage sludge that is a byproduct of the process of wastewater treatment in sewage. In the gasification unit of sewage sludge to the gas cleaning system used cyclone filters and Venturi scrubbers. The generator gas cleaning system allowed the separation of gas pitch in the sludge and prevented the condensation of tars in the intake test supercharged piston engine.

Keywords: gasification, gas generator, sewage sludge, cleaning system, internal combustion engine

Przesłano do redakcji: 13.11.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.45

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 157-165

Justyna KOBYLARCZYK[1]

MODEL OCENY JAKOŚCI ŚRODOWISKA ZAMIESZKANIA. ANALIZA WYBRANYCH OBSZARÓW WOJEWÓDZTWA PODKARPACKIEGO

Problem jakości środowiska zamieszkania jest zagadnieniem aktualnym, którego znaczenie dostrzegane będzie także w przyszłości. Wynika to po części z narastających zagrożeń jakie towarzyszą miastom podążającym za postępem. Rozwój niesie ze sobą nowe możliwości, nadzieje na lepsze i wygodniejsze życie, ale z drugiej strony jest poważnym zagrożeniem dla nieodnawialnych zasobów przyrodniczych. Dziś jesteśmy świadkami ocieplającego się klimatu, coraz większego skażenia powietrza i wody. Rośnie także zachorowalność wywołana przeobrażeniami cywilizacyjnymi. W tej sytuacji prowadzenie badań nad oceną jakości środowiska mieszkaniowego współczesnego człowieka jest niezwykle ważne.
W pracy zaprezentowana zostanie metoda oceny obszarów mieszkaniowych na terenie Podkarpacia – regionu, którego atutem jest bogactwo zasobów przyrody, niskie skażenie powietrza i wody. Model oceny ma charakter interdyscyplinarny i wielokryterialny, przez co stwarza możliwość szerokiego spojrzenia na problematykę jakości środowiska mieszkaniowego, która wymaga kompleksowych analiz z pogranicza wielu dyscyplin naukowych. Do badań wykorzystano analizę urbanistyczną, analizy środowiskowe oraz analizy charakterystyczne dla geografii przestrzennej.

Słowa kluczowe: Rozwój zrównoważony, analiza urbanistyczna, badania socjologiczne, geografia przestrzenna, czynniki mikro, czynniki makro

1. Wstęp

Współczesne oczekiwania względem środowiska zamieszkania na miarę XXI wieku są coraz większe. Rośnie przy tym także świadomość społeczeństwa, które w większym stopniu niż dotychczas kieruje swoje potrzeby w stronę uwarunkowań wspierających zdrowe środowisko zamieszkania. I choć XXI wiek stwarza szereg możliwości nie tylko w tym zakresie co związane jest

[1] Justyna Kobylarczyk, Politechnika Krakowska, Wydział Architektury, Instytut Projektowania Urbanistycznego, Katedra Kształtowania Środowiska Mieszkaniowego, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, Tel. 602-524-529, e-mail: j.kobylarczyk@op.pl

z postępem to z drugiej strony stwarza również wiele zagrożeń. Wynikają one między innymi z niekontrolowanego rozwoju miast oraz z degradacji środowiska przyrodniczego, skażenia powietrza, itd. Problemy te wyzwalają konieczność stworzenia kierunków działań naprawczych w zakresie architektury i urbanistyki, a także innych dyscyplin naukowych w oparciu o zasady harmonii oraz dbałości o dobra przyrody uwzględniające potrzeby przyszłych pokoleń. „Zachowanie równowagi pomiędzy środowiskiem przyrodniczym a zainwestowanym przez człowieka jest warunkiem koniecznym do stworzenia zdrowego, przyjaznego środowiska mieszkaniowego, w harmonii z zielonym otoczeniem, krajobrazem, w symbiozie architektury i przyrody”[2].

Destrukcyjnym procesom sprzeciwia się rozwój zrównoważony – a więc rozwój, któremu towarzyszy dbałość o: zdrowie mieszkańców, dobro wspólne, świat przyrody, a także dbałość o kulturę i tradycję miejsca, jego piękno.

Zarówno postęp jak i rozwój miast powinien następować w sposób kontrolowany, przy ciągłej edukacji społecznej podnoszącej świadomość możliwych skutków pozytywnych jak i negatywnych jakie niesie ze sobą. „Rozwój miast XX wieku, procesy urbanizacyjne przebiegające w różny sposób i w różnym zakresie – ale na całym świecie, spowodowały, że miasto stało się jednym z najważniejszych problemów również w początku XXI wieku”[3], a waz z nim jakość środowiska zamieszkania współczesnego człowieka. Człowieka dynamicznego, często zagubionego, osaczonego przez narastające tempo życia. Człowieka zagrożonego cywilizacyjnymi dysfunkcjami wywołanymi skażeniem powietrza i wody, ale także postępem doby informacyjnej.

Między innymi Europejska Rada Urbanistów w Nowej Karcie Ateńskiej (2003) zwróciła uwagę na szereg procesów i zjawisk, które mogą mieć szczególne znaczenie dla miast podążających za postępem i rozwojem. Zaprezentowana w dokumencie wizja miasta przyszłości opiera się w dużej mierze na dostrzeżeniu roli: przestrzeni publicznych zespalających miasto, działań naprawczych odnoszących się do stanu zdegradowanych terenów.

Miasto XXI wieku powinno być miejscem bezpiecznym, odznaczającym się indywidualnym charakterem, tożsamością i kulturą. Powinno być także miejscem o wysokich walorach estetycznych, w którym podejmuje się działania zmierzające do ochrony przyrody i dziedzictwa kulturowego, w którym dąży się do zachowania harmonii między zurbanizowanym środowiskiem, a środowiskiem przyrodniczym.

Osobnym i bardzo trudnym zagadnieniem ważnym z punktu widzenia trwałego i zrównoważonego rozwoju miast jest zaangażowanie społeczne w kształtowaniu zdrowego środowiska zamieszkania, środowiska wysokiej jakości promującego zdrowy i bezpieczny styl życia blisko przyrody. Niestety

[2] W. Seruga, *Zrównoważone środowisko mieszkaniowe w dydaktyce Katedry Kształtowania Środowiska Mieszkaniowego,* Czasopismo Techniczne z.3-A, 2007, s.266

[3] G. Schneider-Skalska, *Zrównoważone środowisko mieszkaniowe. Społeczne – oszczędne – piękne*, Politechnika Krakowska, Kraków 2012, str.11.

w wielu krajach społeczeństwo nie jest jeszcze na tyle dojrzałe by dostrzegać wartość dóbr wspólnych. Dla podnoszenia świadomości społecznej w zakresie kształtowania środowiska zamieszkania wysokiej jakości konieczna jest ciągła edukacja, na której efekty zmuszeni będziemy długo czekać.

Problematyka jakości środowiska zamieszkania ze względu na przeobrażenia cywilizacyjne jest i będzie w przyszłości ważnym zagadnieniem. Wiąże się bowiem z potrzebami mieszkańców, z ich stylem życia, ambicjami. Każdy z nas marzy o bezpiecznym i komfortowym środowisku, w którym ma szansę znaleźć pracę, założyć rodzinę, zawiązywać przyjaźnie.

2. Czym jest współczesne środowisko zamieszkania?

„Dom jest miejscem bardzo bliskim każdemu człowiekowi, do niego powraca się, jak do utraconego raju dzieciństwa, choćby tylko myślami.
Najpełniejszą, a zarazem najprawdziwszą postać prezentuje dom jako zjawisko kulturowe, posiadające oprócz postaci materialnej również duchową, oddającą cała złożoność tradycji narodowej,
Również z jej romantycznym pojęciem domu – ojczyzny”[4].

Środowisko mieszkaniowe może być rozumiane na wiele sposobów. Czasem jest ono miastem, innym razem dzielnicą, czy też osiedlem, a nawet najbliższym sąsiedztwem.
Ponieważ struktura przestrzenna, wielkość jak i charakter obszarów mieszkaniowych jest różna trudno jest jednoznacznie zdefiniować pojęcie środowiska mieszkaniowego. Z pojęciem tym związane są nasze osobiste emocje – a więc odczucia, których nie da się zmierzyć i ocenić. Odpowiadają one za sferę niematerialną i niezwykle indywidualną. Zróżnicowania wynikają także z typologii zabudowy, sposobu zagospodarowania obszarów mieszkaniowych i ich skali, a także kontekstu miejsca, otoczenia.

Współczesne środowisko zamieszkania to „środowisko, w którym żyje i rozwija się człowiek, w którym spełnia swoje potrzeby i ambicje. Środowisko mieszkaniowe powinno między innymi spełniać wymagania jednostki w zakresie: bezpieczeństwa, identyfikacji, komfortu fizycznego i psychicznego, intymności i izolacji, komfortu bioklimatycznego, warunków do wypoczynku psychicznego i fizycznego… Na jakość środowiska mieszkaniowego składa się zarówno ogół warunków przyrodniczych, jak i korzystnych rozwiązań przestrzennych sprzyjających zdrowiu i samopoczuciu mieszkańców”[5].

Dzisiejsze miasto chcielibyśmy postrzegać jako środowisko zrównoważone, a więc charakteryzujące się wysoką jakością. Pozostające w harmonii z elementami przyrodniczymi, zapewniające łatwą dostępność do przestrzeni inte-

[4] A. Bujak, J. L. Dobesz, *Polska dom tysiącletniego narodu,* Biały Kruk, Kraków 2003r., str. 7.
[5] G. Schneider- Skalska, *Kształtowanie zdrowego środowiska mieszkaniowego. Wybrane zagadnienia,* Politechnika Krakowska, Kraków 2004, s.19-20.

gracyjnych, rekreacyjnych, czy też usług. Jako miejsce symbiozy tradycji i nowoczesności kreujące piękno i niepowtarzalność przestrzeni, które traktować możemy jako nasz dom – nasze miejsce do życia. Niestety współczesny obraz ośrodków miejskich i zawierających się w nich osiedli mieszkaniowych często odbiega od tych idealistycznych wizji. Charakteryzowany jest wówczas przy użyciu takich zjawisk jak: gettonizacja, wyludnienie, noclegownia, czy betonowe pustynie. Świadczy to o słabym przystosowaniu obszarów zamieszkania do potrzeb mieszkańców i postępującej degradacji przestrzeni zielonych, których często w naszym środowisku jest jeszcze zbyt mało.

3. Wielokryterialny model oceny jakości środowiska mieszkaniowego na terenie województwa podkarpackiego

Problematyka oceny jakości środowiska mieszkaniowego ma szczególne znaczenie dla województwa podkarpackiego, postrzeganego jako obszar pomału się rozwijający.

Do analizy małych miast Podkarpacia wykorzystano wielopłaszczyznowy oraz interdyscyplinarny model oceny stwarzający możliwość dokonania diagnozy przestrzenno – funkcjonalnej zastanego środowiska oraz sporządzenia obiektywnych wniosków przydatnych w planowaniu przestrzennym.

Podstawową metodą badawczą mającą zastosowanie w terenowych badaniach architektoniczno – urbanistycznych były analizy urbanistyczne wykorzystujące pomiary inwentaryzacyjne oraz dokumentację fotograficzną. Bardzo ważne do oceny jakości środowiska mieszkaniowego okazały się także badania ankietowe głównie stosowane w badaniach socjologicznych Trzecią wykorzystaną metodą badań były analizy studialne z pogranicza geografii przestrzennej zrealizowane na podstawie zebranych informacji oraz danych statystycznych upublicznianych przez Urzędy Miast oraz Urzędy Statystyczne.

Badania dotyczyły dwóch grup zagadnień. Oceny czynników makro oraz oceny czynników mikro. Czynniki makro odnoszące się do szerszego kontekstu – nie najbliższego obszaru mieszkaniowego tzw. sąsiedztwa, a całego regionu – województwa podkarpackiego ocenione zostały na podstawie dostępnej literatury i dokumentacji prowadzonej między innymi przez Urzędy Miast i Urzędy Statystyczne. Zebrane informacje (badania gabinetowe) prezentowały ogólne uwarunkowania regionu. W ramach analizy czynników o zasięgu makro Podkarpacie scharakteryzowano zostało pod względem: lokalizacji, czystości powietrza, czystości wód, stanu środowiska naturalnego, ekologii, warunków zdrowotnych, walorów rekreacyjnych, konfiguracji terenu, itd., a także uwarunkowań gospodarczych, takich jak: rozwój turystyki, edukacji, rolnictwa agroturystycznego, uwarunkowań komunikacyjnych, przemysłu, itd.

Badania w terenie (analiza urbanistyczna) jak i badania środowiskowe (wywiad) posłużyły do oceny czynników o zasięgu mikro. Odnosiły się one do konkretnych obszarów mieszkaniowych prezentujących różną typologię zabu-

dowy i różny jej charakter. Pierwszy obszar (rys. 1) ograniczał się do rynku z historyczną, zwartą zabudową mieszkaniową w formie kamienic ze zróżnicowanymi usługami znajdującymi się w ich wysokich parterach. Obszar drugi (rys. 2) badań dotyczył zabudowy blokowej z przestrzeniami wspólnymi. W obszarze trzecim (rys. 3) dominowała jednorodzinna zabudowa mieszkaniowa z prywatnymi ogród-kami przydomowymi.

Na podstawie analizy urbanistycznej dokonano diagnozy przestrzenno – usługowej zastanych obszarów zamieszkania, z określeniem ich wielkości, intensywności zabudowy oraz dostępności do usług. Ocenione zostały także warunki sprzyjające kondycji psychofizycznej mieszkańców - zdrowiu fizycznemu, samopoczuciu psychicznemu i mentalnemu oraz poczuciu spójności społecznej.

Warunki prozdrowotne wspierające zdrowie fizyczne mieszkańców zapewniają bliskość terenów zielonych – rekreacyjnych, wypoczynkowych i sportowych. Znaczenie ma także ich sposób zagospodarowania oraz wielkość, która powinna być dostosowana do liczby użytkowników. Istotne znaczenie mają także obiekty sportowe – ich lokalizacja, stan techniczny i przystosowanie do współczesnych potrzeb użytkowników.



Rys. 1. Obszar I – zabudowa mieszkaniowa w rynku w Błażowej (fot. własna)

Fig. 1. Area I – housing development in the central square of Błażowa (own photo)



Rys. 2. Obszar II – zabudowa wielorodzinna blokowa w Boguchwale (fot. własna)

Fig. 2. Area II – apartment housing (own photo)



Rys. 3. Obszar III – zabudowa jednorodzinna w Sokołowie Małopolskim (fot. własna)

Fig. 3. Area III – single-family housing in Sokołów Małopolski (own photo)

Na samopoczucie psychiczne i mentalne mieszkańców wpływ ma: wielkość przestrzeni wspólnych, odległość między obiektami o różnym charakterze i przeznaczeniu, skala obiektów, ich charakter oraz intensywność zabudowy mieszkaniowej, dostępność do usług podstawowych i ponadpodstawowych. Analizowane warunki są uznawane za jedne z najistotniejszych w świetle zasad rozwoju zrównoważonego.

Na podstawie analizy urbanistycznej oceniono warunki wspierające spójność społeczną. Ocena dotyczyła struktury mieszkań pod względem: wielkości i formy własności, wielofunkcyjności integracyjnych przestrzeni wspólnych, programu funkcjonalnego i jakości przestrzeni społecznych.

Za pomocą analizy urbanistycznej oceniono także walory kompozycyjne i estetyczne zdefiniowane przez Sherwin Green i odpowiadające za: funkcję, wygodę i komfort, ład przestrzenny i porządek, tożsamość, wizerunek miejsca oraz jego urok. Analizowano przy tym między innymi czytelność przestrzeni oraz atrakcyjność jej poszczególnych elementów (akcenty i dominanty).

Osobnym sposobem oceny czynników mikro stanowiły badania socjologiczne - badania ankietowe, w których udział brali sami mieszkańcy. Wywiad podzielony został na dwie części. W pierwszej części respondenci dokonywali oceny: stabilności miejsca zamieszkania, stanu technicznego mieszkania, elementów środowiska zamieszkania kształtujących komfortowe warunki. Oceniona została także: dostępność do usług podstawowych i ponadpodstawowych związanych między innymi z bliskością obiektów kultury, sportu i rekreacji.

W drugiej części wywiadu respondenci oceniali znaczenie 28 czynników. Wpływ poszczególnego czynnika na zamieszkiwane środowisko oceniano posługując się następującą skalą ocen: wpływ bardzo duży, duży, średni, mały, bardzo mały, żaden. Odpowiedniej ocenie przypisano także odpowiednią liczbę punktów (bardzo duży wpływ – 5, duży – 4, średni – 3, mały – 2, bardzo mały – 1, żaden – 0).

Do badań wybrano:
(1) - kompozycję układu urbanistycznego, (2) – estetykę, (3) – rodzaj, różnorodność i ilość zieleni, (4) – widok z okna, (5) – zagospodarowanie przestrzeni wspólnej, (6) – mezoklimat, (7) – doświetlenie wnętrz urbanistycznych, (8) – higiena przewietrzania, (9) – dostęp do usług podstawowych, (10) – dostęp do placówek oświatowych, (11) – dostęp do ośrodków kultury, (12) – dostęp do ośrodków zdrowia i apteki, (13) – dostęp do ośrodków sportowych i rekreacyjnych, (14) – dostęp do usług komunikacyjnych, (15) – obecność placów zabaw dla dzieci, (16) – program użytkowy placów zabaw dla dzieci, (17) – obecność terenów zielonych, (18) – program użytkowy terenów zielonych, (19) – intymność i spokój, (20) – bezpieczeństwo, (21) – obecność założeń (obiektów) wodnych, (22) –obecność i wielkość podwórka, (23) – bliskość przestrzeni integralnych, (24) – obecność elementów natury, (25) – widok z ona na elementy natury, (26) – obecność zabytków lub innych cennych i unikalnych obiektów, (27) – możliwość społecznego współdziałania w kształtowaniu wspólnej przestrzeni, (28) – możliwość wspólnego zarządzania środowiskiem miejsca zamieszkania.

Oceniane elementy i czynniki wpływają w różnym stopniu na jakość środowiska zamieszkania. Osoby biorące udział w badaniu same określały intensywność ich wpływu

Zaprezentowane powyżej metody badawcze uzupełniały się wzajemnie dając szerokie spojrzenie na problem jakości środowiska mieszkaniowego. Uwzględniona została ocena własna w konfrontacji z opinią samych mieszkańców.

4. Najważniejsze efekty pracy

Na podstawie analiz zrealizowanych przy wykorzystaniu różnych metod badawczych o charakterze interdyscyplinarnym ocenione zostały zarówno czynniki o zasięgu makro jak i mikro. Różnią się one charakterem, zakresem terytorialnego oddziaływania, sposobem badania i możliwością ludzkiej ingerencji. Obydwie grupy oceny wspierały podstawową metodą badawczą – analizę urbanistyczną. Pozwoliły one na sporządzenie wniosków jakie mogą w przyszłości zostać wykorzystane w działaniach zmierzających do poprawy jakości środowiska zamieszkania na terenie małych miast Podkarpacia. Wyznaczono przy pomocy analizy urbanistycznej i wywiadu szczególnie ważne czynniki, elementy i zjawiska wpływające na jakość środowiska. Oceny dokonano na podstawie badań własnych oraz analizy dotyczącej preferencji mieszkańców. Oceniono przy tym także warunki wspierające prozdrowotny charakter obszarów mieszkaniowych, co wydaje się szczególnie ważne w dobie rozwijających się chorób cywilizacyjnych, coraz większego skażenie powietrza i wody.

Na ich podstawie można wnioskować, ze Podkarpacie pomimo tego iż zalicza się do regionów stagnacji jest obszarem, który może spełniać wymagania wysokiej jakości środowiska mieszkaniowego. Po części decydują o tym badane czynniki makro – a więc warunki przyrodnicze, niskie skażenie powietrza, a także warunki prozdrowotne wynikające z lokalizacji na terenie Podkarpacia uzdrowisk. Znajdują się one w: Iwoniczu Zdroju, Rymanowie Zdroju i na terenie Horyńca Zdrój.

Na podstawie badań można wyłonić także podstawowe problemy miast Podkarpacia wynikające między innymi z niekorzystnych rozwiązań komunikacyjnych - przebieg dróg krajowych przez ścisłe centrum niektórych miast. Nie tylko wpływa to destrukcyjnie na zabytki, na kompozycję przestrzenną podzielonego na dwie niezależne części centrum, ale także stanowi zagrożenie bezpieczeństwa.

Jednym z najpoważniejszych problemów jest brak chęci mieszkańców w zaangażowanie się we wspólne zarządzanie środowiskiem zamieszkania. Powodem jest najprawdopodobniej brak merytorycznego przygotowania mieszkańców w podejmowaniu ważnych decyzji w zakresie kształtowania obszarów mieszkaniowych wysokiej jakości, a także brak wiary w skuteczność ich działania. Konieczna w tym zakresie wydaje się edukacja społeczeństwa.

Niezwykle budujące są natomiast wyniki obrazujące pozytywny stosunek mieszkańców do zamieszkiwanego środowiska. Mieszkańcy chcą pozostać

w swoich miastach, z którymi się utożsamiają, które traktują jako docelowe, bezpieczne zapewniające intymność i spokój środowisko mieszkaniowe.

Na podstawie wyników badań można stwierdzić, że środowisko zamieszkania wybranych miast spełnia wymagania w zakresie czynników mikro. To duża zaleta tych małych ośrodków miejskich, a także pozytywny przykład dla innych regionów. Potwierdzeniem tego jest wysoka ocena nie tylko poszczególnych czynników, ale także stabilność miejsca zamieszkania oraz preferencji środowiska zamieszkania w przypadku zmiany mieszkańców.

Obecne miejsce zamieszkania preferuje ponad 80% badanych. W przypadku konieczności zmiany mieszkania większość respondentów wybrałoby nowe miejsca zamieszkania w obrębie tego samego miasta. Świadczy to o ogólnym zadowoleniu mieszkańców z warunków mieszkaniowych jakie oferują małe miasta Podkarpacia lub braku możliwości dokonania porównania obecnego miejsca zamieszkania z innym na przykład znajdującym się w innym regionie kraju. Zdecydowana większość osób biorących udział w wywiadzie miała możliwość wyboru miejsca zamieszkania, które traktuje jako stabilne i docelowe. Można wiec przypuszczać, że mieszkańcy doceniając swoje środowisko zamieszkania będą o nie dbali i będą chcieli się z nim utożsamiać.

Podtrzymuje to wiarygodność stwierdzenia, że „małe miasta województwa podkarpackiego po najbardziej intensywnym etapie transformacji są w stanie spełnić wymagania wysokiej jakości środowiska zamieszkania, a tym samym stworzyć przyjazne warunki zamieszkania dla swoich mieszkańców”[6].

Literatura

[1] Bujak A., Dobesz J.L., *Polska dom tysiącletniego narodu*, Biały Kruk, Kraków 2003.

[2] Kobylarczyk J., *Ocena jakości środowiska zamieszkania w wybranych miastach województwa podkarpackiego po okresie „transformacji” w pierwszej dekadzie XXI wieku*, Politechnika Krakowska, Kraków 2013.

[3] Schneider- Skalska G., *Kształtowanie zdrowego środowiska mieszkaniowego. Wybrane zagadnienia*, Politechnika Krakowska, Kraków 2004.

[4] Schneider-Skalska G., *Zrównoważone środowisko mieszkaniowe. Społeczne – oszczędne – piękne*, Politechnika Krakowska, Kraków 2012.

[5] Seruga W., *Zrównoważone środowisko mieszkaniowe w dydaktyce Katedry Kształtowania Środowiska Mieszkaniowego*, Czasopismo Techniczne z.3-A, 2007.

[6] J. Kobylarczyk, *Ocena jakości środowiska zamieszkania w wybranych miastach województwa podkarpackiego po okresie „transformacji” w pierwszej dekadzie XXI wieku*, Politechnika Krakowska, Kraków 2013, str.12

ENVIRONMENTAL QUALITY ASSESSMENT MODEL OF RESIDENCE. ANALYSIS OF SOME PODKARPACKI AREAS

S u m m a r y

The problem of the quality of the living environment is a current issue, the significance of which will be also perceived in the future. It is partially due to the increasing dangers that accompany the cities following progress. The development brings new opportunities, hopes for a better and more comfortable life, but on the other hand, it is a serious threat to the non-renewable natural resources. Today we are witnessing a warming climate, as well as air, soil and water pollution. The pace of life has increased along with the number of stressful situations. There is a growing incidence of diseases induced by civilizational transformations. In this context, research concerning evaluation of the quality of the residential environment is extremely important.

This work presents method implemented for the evaluation of the residential areas in the region of Podkarpacie – region rich in natural resources, as well as low air and water pollution.

Keywords: sustainable development, urban analysis, sociological researches, area, space geographic, macro factor, micro factor

Przesłano do redakcji: 01.12.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.46

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 167-176

Piotr KOPEĆ[1]

OBLICZENIA I DOBÓR GRUNTOWEGO WYMIENNIKA CIEPŁA DLA POMPY CIEPŁA

W artykule przedstawiono rozwój rynku pomp ciepła w Polsce w latach 2010-2013. Dokonano analizy gruntu jako dolnego źródła ciepła dla pomp ciepła. Przedstawiono sposób doboru długości rur wymiennika ciepła stanowiącego ujęcie dolnego źródła ciepła dla pomp ciepła, wykorzystując wytyczne przedstawione przez Polską Organizację Rozwoju i Technologii Pomp Ciepła. Następnie przedstawiono algorytm wyznaczania gęstości strumienia ciepła i doboru długości rur wymiennika oraz porównano otrzymane wyniki obliczeń. Wyznaczanie ilości energii jaką można pozyskać z gruntu jest trudnym zagadnieniem. Aby otrzymać dokładne wyniki należy dla każdego przypadku sprawdzić rodzaj podłoża, w którym jest układany wymiennik ciepła. Rodzaj gruntu, z którego czerpana jest energia ma ogromne znaczenie dla doboru oraz projektowania dolnego źródła ciepła. Zawartość wilgoci w gruncie wpływa na współczynnik przewodzenia ciepła gruntu oraz ilość pobieranej energii. Wytyczne dotyczące wyznaczania długości rur poziomego wymiennika ciepła, opublikowane przez PORT PC mogą służyć do wstępnego oraz szybkiego doboru długości rur. Otrzymany wynik obarczony jest pewnym błędem, ze względu na zakładaną wartość gęstości strumienia ciepła. Określenie rodzaju gruntu jest zasadne. Pozwala dokładnie obliczyć jednostkową gęstość strumienia ciepła pobieraną z gruntu oraz dobrać odpowiednią długość rur wymiennika niezależnie od zastosowanej metody.

Słowa kluczowe: dolne źródło pompy ciepła, pompa ciepła glikol/woda, poziomy, gruntowy wymiennik ciepła,

1. Wstęp

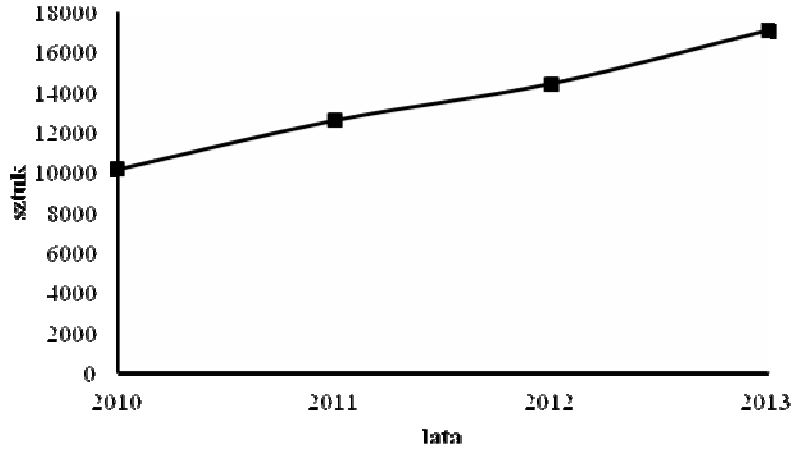
Na całym świecie można zauważyć stały rozwój cywilizacyjny. Niektóre kraje rozwijają się w szybszym tempie, inne wolniej. W każdym razie postęp gospodarczy i wzrost liczby ludności wiąże się ze wzrostem zapotrzebowania na energię potrzebną do zapewnienia komfortu ludzi. Podobnie dzieje się w Polsce. Wzrost cen naturalnych surowców, które wykorzystuje się do wytwarzania energii elektrycznej i cieplnej powoduje wzrost kosztów ogrzewania budynków. Surowce naturalne kiedyś ulegną wyczerpaniu, dlatego też zaleca

[1] Autor do korespondencji/coresponding author: Piotr Kopeć, Politechnika Krakowska, 31-864 Kraków, al. Jana Pawła II 37, tel. (12) 628 34 69, pkopec@mech.pk.edu.pl

się wykorzystywać wszelkiego rodzaju energię odnawialną. Dodatkowo spełnianie coraz to większych wymogów formalnych, mających na celu ochronę środowiska powoduje, że coraz częściej zwraca się uwagę na korzystanie ze źródeł odnawialnych. Budownictwo energooszczędne oraz pasywne zarówno dla budynków jednorodzinnych, jak i wielorodzinnych również wymaga wykorzystania odnawialnych źródeł energii na pokrycie zapotrzebowania budynku na ciepło i ciepłą wodę użytkową. Pewnego rodzaju zachętą do stosowania odnawialnych źródeł energii w budownictwie są dopłaty z ministerstwa środowiska lub kredyty inwestycyjne na preferencyjnych warunkach.

Pompa ciepła jest jednym z urządzeń, które korzysta z energii odnawialnej. Jej głównym zadaniem jest wykorzystanie niskotemperaturowej energii cieplnej z odnawialnych źródeł energii i przetransportowanie jej na wyższy poziom energetyczny, do wytworzenia ciepła o wyższej temperaturze, przy wykorzystaniu zewnętrznej energii: mechanicznej, cieplnej lub elektrycznej [5]. Pompa ciepła może pobierać energię z różnych rodzajów źródeł niskotemperaturowych. Z tego też względu klasyfikuje się je na pompy ciepła: powietrzne, gruntowe (poziome, pionowe) i wodne.

Rynek pomp ciepła w Polsce systematycznie rośnie. Średnio około 20% rocznie. Opierając się na badaniach i danych Polskiej Organizacji Rozwoju Technologii Pomp Ciepła (PORT PC) na rysunku 1 przedstawiono sprzedaż pomp ciepła w Polsce w latach 2010-2013 [2].



Rys. 1. Sprzedaż pomp ciepła w Polsce w latach 2010-2013, na podstawie [2]

Fig. 1. Sales of heat pumps in Poland in years 2010-2013, based on [2]

Udział gruntowych pomp ciepła (solanka/woda) wynosi średnio 32% ogólnego rynku i jest największy spośród pomp ciepła przeznaczonych do zaspoko-

jenia wymaganego zapotrzebowania na energię dla budynku. Większą sprzedaż mają jedynie pompy ciepła powietrze/woda, ale są one przeznaczone tylko i wyłącznie do podgrzewania C.W.U, natomiast do pokrycia strat cieplnych budynku wykorzystywane jest inne źródło energii.

2. Grunt jako dolne źródło ciepła

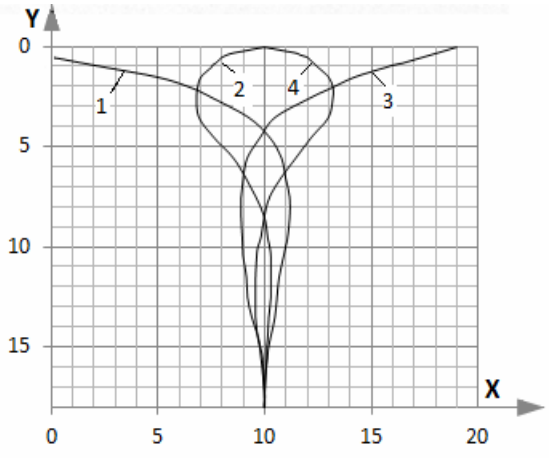
2.1. Charakterystyka gruntu

Gruntowe dolne źródło dla pompy ciepła jest w pewnym sensie zbiornikiem zakumulowanej energii słonecznej i geotermalnej, wykorzystywanej do odparowania ciekłego czynnika krążącego w instalacji pompy ciepła. Aby odpowiednio dobrać dolne źródło ciepła należy sprawdzić, czy charakteryzuje się kilkoma ważnymi cechami. Do właściwości, jakie powinno posiadać dolne źródło ciepła należą [5]:

- łatwa dostępność,
- duża pojemność cieplna,
- wysoka i stała temperatura,
- niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne,
- mała korozyjność,
- dobra koherentność.

Temperatura dolnego źródła ciepła ma duży wpływ na efektywność pracy pompy ciepła. Im ta temperatura jest wyższa, a dokładniej im mniejsza różnica temperatur pomiędzy dolnym i górnym źródłem ciepła, tym większa jest efektywność pracy pompy ciepła. Wzrasta wówczas wartość współczynnika COP pompy ciepła.

Grunt posiada większość cech, jakie powinno mieć dolne źródło ciepła. Jest ogólnodostępny, ma dużą pojemność cieplną, posiada stosunkowo wysoką i stałą temperaturę w głębszych warstwach gruntu, cechuje się niskimi kosztami eksploatacyjnymi. Korozyjność nie ma większego znaczenia, gdyż wymienniki najczęściej wykonane są z rur polietylenowych. W górnych warstwach do około, 10 m głębokości, zakumulowana energia pochodzi głównie z promieniowania słonecznego oraz wymiany ciepła i masy z atmosferą. Wartość temperatury na tej głębokości gruntu jest stała i zbliżona jest do średniej rocznej temperatury powietrza. W niższych warstwach, a więc poniżej 10 m, akumulowane jest ciepło, które pochodzi zarówno z promieniowania słonecznego, jak i z przewodzenia ciepła z wnętrza Ziemi [4]. Na rysunku 2 przedstawiono wykres obrazujący zmianę temperatury gruntu w strefie klimatu umiarkowanego.



Rys. 2. Rozkład temperatury gruntu w strefie klimatu umiarkowanego, na podstawie [4]
X - temperatura [°C], Y - głębokość [m], 1- 1 lutego, 2 – 1 maja, 3 – 1 sierpnia, 4 – 1 listopada

Fig. 2. Ground temperature profile in temperate climate, based on [4]
X - temperature [°C], Y – depth [m], 1- 1 February , 2 – 1 May, 3 – 1 August, 4 – 1 November

Na rozkład temperatury w gruncie wpływa kilka czynników. Jednym z nich jest oddziaływanie klimatu, a więc: opadów, temperatury powietrza, wiatru i promieniowania słonecznego. Kolejny element, który wpływa na temperaturę gruntu to rodzaj wierzchniego pokrycia [3]. Następny element to struktura i wilgotność. Im więcej wilgoci zawiera grunt, tym jest bardziej przydatny jako źródło ciepła. W zależności od zawartości wilgoci i rodzaju gruntu przyjmuje się, że z 1 m^2 powierzchni można uzyskać strumień energii o wartości 10÷50 W, natomiast dla wymienników pionowych z 1 mb rury można uzyskać strumień energii od 25 do 70 W [5].

2.2. Obliczenia i dobór poziomego wymiennika ciepła

W związku z rozwojem oraz coraz większą liczbą montowanych pomp ciepła w naszym kraju, Polska Organizacja Rozwoju i Technologii Pomp Ciepła wydała w październiku 2013 „Wytyczne projektowania, wykonania i odbioru instalacji z pompami ciepła cz.1". Głównym celem publikacji było zebranie oraz uporządkowanie informacji dotyczących pomp ciepła współpracujących z gruntowymi wymiennikami ciepła, aby poprawnie zaprojektować, wykonać oraz dokonać odbioru wykonanej instalacji. Opierając się na informacjach zawartych w wytycznych opublikowanych przez PORT PC, przy doborze pompy ciepła, której moc nie przekracza 30 kW oraz przy braku informacji co do rodzaju gruntu, należy przyjmować jednostkową wydajność cieplną $\dot{q}_H$, jaką można pozyskać z gruntu, nie większą jednak niż 20 W/m^2. Na tej podstawie można wyznaczyć długość rur poziomego wymiennika [1].

Do obliczeń założono następujące dane i parametry zawarte w tabeli 1.

Tabela 1. Dane do obliczeń

Table 1. Calculation data

$\dot{Q}_c$ - zapotrzebowanie na moc cieplną PC	10 kW	t_{gz} - temperatura zasilania ogrzewania	35 °C
COP (B0/W35)	4	t_{gp} - temperatura powrotu ogrzewania	30 °C
$\dot{q}_H$ - jednostkowa wydajność cieplna	20 W/m^2	e_p – podziałka układu rur wymiennika	0,8 m

Aby wyznaczyć moc, jaką powinno dysponować dolne źródło ciepła $\dot{Q}_o$ należy skorzystać z wzoru (1).

$$\dot{Q}_O = \dot{Q}_C \frac{COP-1}{COP} \tag{1}$$

gdzie: $\dot{Q}_C$ – zapotrzebowanie na moc cieplną pompy ciepła, straty cieplne budynku [kW],
COP – współczynnik efektywności pompy ciepła [-],

Łączną obliczeniową powierzchnię poziomego wymiennika ciepła A_O wyliczono zgodnie z wytycznymi [1] ze wzoru (2).

$$A_o = \frac{\dot{Q}_O}{\dot{q}_H} \tag{2}$$

gdzie: $\dot{q}_H$ - jednostkowa wydajność cieplna [W/m^2]

Łączną długość rur poziomego wymiennika ciepła L_p wyliczono ze wzoru (3)

$$L_p = \frac{A_o}{e_p} \tag{3}$$

gdzie: e_p – rozstawienie rur wymiennika [m]

Otrzymane wyniki z obliczeń przedstawia tabela 2

Tabela 2. Wyniki obliczeń

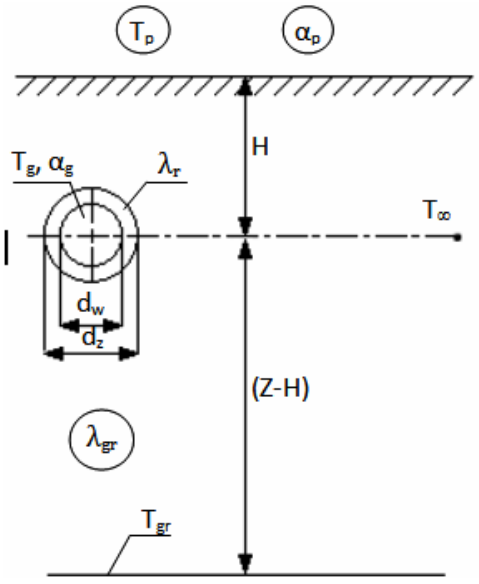
Table 2. Calculation results

$\dot{Q}_O$ [W]	A_O [m^2]	L_p [m]
7500	375	468,75

Wymiennik poziomy należy wykonać w minimum dwóch pętlach [1]. Natomiast długość jednej pętli powinna zawierać się w przedziale 100÷150 m [5]. Odnośnie otrzymanego wyniku z przykładu obliczeniowego można wykonać wymiennik w postaci 4 pętli, z których każda będzie miała długość l=120 m.

Taki sposób obliczania niesie ze sobą pewne niebezpieczeństwo. Długość poziomego wymiennika jest wyznaczona tylko przy założonej wartości $\dot{q}_H$ i jest to wynik przybliżony. Zmiana jednostkowej wydajności cieplnej gruntu będzie powodowała zmianę długości wymiennika. Z tego też względu zaleca się wykonanie badań gruntu, aby móc określić wydajność dolnego źródła ciepła. Poniżej przedstawiono przykład obliczeniowy, w którym wyznaczono długość poziomego wymiennika, przy wyznaczeniu jednostkowej wydajności cieplnej $\dot{q}_H$, wykorzystując dostępne wzory obliczeniowe, przedstawione w pracy [5].

Gęstość strumienia ciepła odniesiona do 1 mb rury obliczono korzystając z wzorów (4)-(8). Sposób umiejscowienia rury wymiennika w gruncie oraz schemat układu przyjętego do obliczeń przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Przykład rozmieszczenia rury wymiennika w gruncie, na podstawie [5]

Fig. 3. Sample arrangement of the heat exchanger pipe in the ground, based on [5]

$$\dot{q}_L = \lambda_{gr} \Delta T \frac{2\pi}{\ln\left(K + \sqrt{K^2 - 1}\right)} \tag{4}$$

$$\Delta T = T_p - T_{gm} + B\left(T_{gr} - T_p\right) \tag{5}$$

$$B = \frac{H}{Z} \tag{6}$$

$$K = \frac{1}{\pi} \exp\left[C + \frac{\pi^2}{4} \exp(-2C)\right] \sin(\pi B) \tag{7}$$

$$C = \frac{2\lambda_{gr}}{\alpha_g d_w} + \frac{\lambda_{gr}}{\lambda_r} \ln\left(\frac{d_z}{d_w}\right) + \ln\left[\frac{2\lambda_{gr}}{d_z}\left(\frac{1}{\alpha_p} + \frac{Z}{\lambda_{gr}}\right)\right] \tag{8}$$

gdzie: $\dot{q}_L$ – jednostkowy strumień ciepła [W/m],
α_g – współczynnik przejmowania ciepła od strony glikolu [W/(m^{2}K)],
α_p – współczynnik przejmowania ciepła od strony powietrza [W/(m^{2}K)],
λ_{gr} – współczynnik przewodzenia ciepła gruntu [W/(mK)],
λ_r – współczynnik przewodzenia ciepła rury [W/(mK)],
d_w – średnica wewnętrzna rury [m]
d_z – średnica zewnętrzna rury [m]
T_{gr} – temperatura gruntu [°C]
T_{gm} – temperatura średnia 33% roztworu wody i glikolu [°C]
T_p – temperatura powietrza przy gruncie [°C]
H – głębokość umieszczenia wymiennika gruntowego [m]
Z – głębokość, na której temperatura gruntu jest stała [m]

Do poprawnego przeprowadzenia obliczeń należy wprowadzić dodatkowe dane, przedstawione w tabeli 3.

Tabela 3. Dodatkowe dane do obliczeń

Table 3. Additional calculation data

α_g [W/(m^{2}K)]	α_p [W/(m^{2}K)]	λ_{gr} [W/(mK)]	λ_r [W/(mK)]	d_w [m]	d_z [m]
3605	15	2,25	0,5	0,04	0,0326
T_{gr} [°C]	T_{gm} [°C]	T_p [°C]	H [m]	Z[m]	
8	-3	-5	1,5	3	

Na podstawie otrzymanej wartości jednostkowego strumienia ciepła wyznaczonej z wzoru (4) oraz podziałki rozstawienia rur można wyliczyć gęstość strumienia ciepła $\dot{q}_H$ odniesioną do powierzchni, korzystając z wzoru (9). Następnie, zgodnie z wzorami (2) i (3) oblicza się powierzchnię oraz łączną długość rur poziomego gruntowego wymiennika ciepła. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

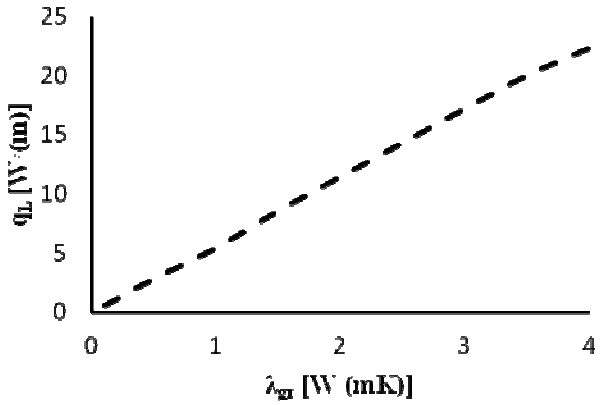
$$\dot{q}_H = \frac{\dot{q}_L}{e_p} \tag{9}$$

Tabela 4. Wyniki obliczeń wg wzorów (4)-(9)

Table 4. Calculation results for formulas (4)-(9)

ΔT [K]	B	K	C	$\dot{q}_L$ [W/m]	$\dot{q}_H$ [W/m^2]	A_o [m^2]	L_P [m]
5	0,5	117,71	5,91	12,45	15,56	482,0	602,5

Pomiędzy wynikami otrzymanymi z wytycznych oraz wzorów obliczeniowych są duże rozbieżności. Różnica wynosi około 130 m. Długość wymiennika wyliczona na podstawie dokładnych wzorów jest o około 28% większa. Wartość gęstości strumienia ciepła otrzymana z wzoru (9) wynosi około 16 [W/m^2] i jest niższa od zalecanych przez PORT PC. Należy zaznaczyć, że w pierwszym przypadku do obliczeń długości wymiennika, wartość gęstości strumienia ciepła jest przyjmowana i nie powinna przekroczyć 20 W/m^2. Natomiast w drugim otrzymujemy dokładną wartość ze wzoru (9) i na tej podstawie wyliczamy długość rur. W związku z tym, nie można w sposób jednoznaczny porównywać wyników. Po podstawieniu otrzymanej dokładnej wartości gęstości strumienia ciepła do wzorów (2)-(3), łączna długość rur poziomego wymiennika ciepła L_P według wytycznych PORT PC wynosi 586 m. Różnica pomiędzy otrzymanymi wynikami nie przekracza 3%. Znając rodzaj gruntu, wytyczne PORT PC pozwalają szybko i dość dokładnie dobrać długość rur wymiennika. Wartość gęstości ściśle zależy od rodzaju gruntu, w którym będzie umieszczany wymiennik. Im większa zawartość wilgoci w gruncie tym większy współczynnik przewodzenia ciepła gruntu λ_{gr} [W/(mK)]. Na rysunku 4 przedstawiono wpływ wartości współczynnika przewodzenia ciepła gruntu na wartość gęstości strumienia ciepła jaki można uzyskać korzystając z wzoru (4).



Rys. 4. Wpływ wartość współczynnika przewodzenia ciepła gruntu na gęstość strumienia ciepła

Fig. 4. Influence of ground thermal conductivity value on heat flux rate

3. Podsumowanie

Dobór oraz obliczenia gruntowego poziomego wymiennika ciepła dla pomp ciepła nie jest zagadnieniem łatwym. Każdy przypadek doboru należy potraktować indywidualnie. Ilość energii, jaką można uzyskać z 1 m^2 gruntu lub 1 mb rury jest wartością zmienną i zależną od kilku współczynników. Największy wpływ ma wartość współczynnika przewodzenia ciepła. Z kolei wartość współczynnika przewodzenia ciepła zależy od rodzaju gruntu oraz zawartej w nim wilgoci. Kolejne parametry, od których zależy ilość pozyskanej energii to głębokość, na której umieszczony jest wymiennik oraz temperatura gruntu na tej głębokości. Wiadomo również, że wraz z użytkowaniem pompy ciepła w okresie grzewczym grunt ulega wychłodzeniu. Jego regeneracja następuje w okresie letnim i jest zależna od promieniowania słonecznego oraz opadów atmosferycznych. Wytyczne, według których można obliczyć oraz dobrać wielkość wymiennika, podane przez PORT PC, mogą posłużyć do dość dobrego oraz szybkiego doboru wymiennika w celu dokonania wstępnej wyceny. Zgodnie z zaleceniami należy pamiętać, aby zakładana gęstość strumienia ciepła była nie większa niż 20 W/m^2. Aby wykonać dokładne wyliczenia długości rur należy określić rodzaj i wilgotność gruntu oraz wyznaczyć jednostkową wartość gęstości strumienia ciepła. Takie rozpoznanie gruntu również jest zalecane przez PORT PC, a w szczególności dla pomp ciepła, których moc $\geq$ 30 kW. Posiadając dokładne informację na temat rodzaju gruntu błąd przy wyznaczaniu długości rur wymiennika przy stosowaniu zaprezentowanych metod nie przekracza 3%. Brak dokładnych obliczeń może doprowadzić do doboru wymiennika ciepła o niewystarczających parametrach, a w konsekwencji do przechłodzenia gruntu oraz nie zapewnienia wystarczającej mocy grzewczej do pokrycia strat cieplnych budynku.

Literatura

[1] Wytyczne projektowania, wykonania i odbioru instalacji z pompami ciepła, cz. 1, Dolne źródła do pomp ciepła, Polska Organizacja Rozwoju i Technologii Pomp Ciepła, wydanie I, Kraków 2013.

[2] Polski rynek pomp ciepła wzrósł o 20% w 2013 r., Chłodnictwo & Klimatyzacja, nr 4 (184), 2014, s. 34.

[3] Rubik M.: Pompy ciepła - poradnik, Ośrodek Informacji „Technika Instalacyjna w budownictwie", Warszawa 1999.

[4] Rubik M.: Pompy ciepła w systemie geotermii niskotemperaturowej, MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2011.

[5] Zalewski W.: Pompy ciepła sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne, IPPU Masta, Gdańsk 2001.

CALCULATION AND SELECTION OF GROUND HEAT EXCHANGER FOR A HEAT PUMP

S u m m a r y

The paper present the expansion of heat pump market in Poland in years 2010-2013. The author carried out an analysis of the ground as the source of heat for heat pumps. The paper includes the presentation and comparison of different methods of selecting the pipe lengths for the heat exchanger which, according to the guidelines of PORT PC (Polish Organization Development and Technology of Heat Pump), is the ground heat source for heat pumps. It is followed by an algorithm for accurate calculation of heat flux rate and pipe length selection. The results are then compared with the previous ones. Estimating the amount of energy which could be gained from the ground is a complicated issue. In order to receive precise results, each type of ground the heat exchanger was placed in had to be examined. The kind of ground, which provides energy, is very important for design and selection of the ground heat source. The moisture content influences the ground thermal conductivity and the amount of absorbed energy. Guidelines about selecting the pipe lengths for vertical ground heat exchanger, published by PORT PC, can be used for initial and fast selection the pipe lengths. The obtained result has got some error in regard of presupposed value of heat flux. Recognition the kind of ground is important. Allows to carry out an accurate calculation of heat flux value gained from the ground, and select appropriate the pipe lengths regardless of implement method.

Keywords: ground heat source, heat pump brine/water, vertical ground heat exchanger

Przesłano do redakcji: 18.02.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.47

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 177-187

Justyna KOT[1]

ODZYSK CIEPŁA W OBIEKTACH UŻYTECZNOŚCI PUBLICZNEJ – WSTĘPNA ANALIZA EKONOMICZNA

W pracy przedstawiono analizę finansową systemów klimatyzacji z wykorzystaniem różnych systemów do odzysku ciepła w obiekcie użyteczności publicznej. Pozyskiwanie energii powstającej w układzie może być realizowane poprzez systemy takie jak rekuperacja, regeneracja czy pompa ciepła, które znajdują powszechne zastosowanie we wspomnianych obiektach użyteczności publicznej czy w budynkach mieszkalnych, wielo i jednorodzinnych. Do przeprowadzania analizy posłużyła sala wykładowa Wydziału Fizyki Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie. Analizę poprzedza projekt instalacji klimatyzacyjnej w trzech wersjach. Wariant pierwszy, będący punktem odniesienia, stanowi centrala bez odzysku ciepła. Z wariantem bazowym porównano dwie centrale z systemami rekuperacyjnym oraz regeneracyjnym. W analizie wzięto pod uwagę koszty inwestycyjne, na które składają się koszty zakupu centrali wraz z niezbędną automatyką oraz koszty eksploatacyjne, w których ujęto koszty związane z użytkowaniem owych central tj. koszt pracy wentylatorów, wymiany filtrów, dostarczenia mediów zasilających urządzenia. Przeprowadzona analiza dowodzi, iż poniesione wyższe nakłady inwestycyjne zakupu centrali klimatyzacyjnej skutkują niższymi kosztami jej użytkowania. Koszty użytkowania centrali z najbardziej popularnym w zastosowaniu wymiennikiem rekuperacyjnym są niewiele wyższe od kosztów centrali z wymiennikiem regeneracyjnym, a oba rozwiązania pociągają za sobą około czterdziesto procentowe oszczędności w stosunku do systemu bez odzysku ciepła.

Słowa kluczowe: systemy odzysku ciepła, rekuperacja, regeneracja, pompa ciepła, koszty eksploatacyjne klimatyzacji

1. Wstęp

Przystępując do projektowania i wyboru najkorzystniejszego rozwiązania systemu klimatyzacji bierze się pod uwagę kilka kryteriów, jak parametry powietrza, które centrala ma za zadanie uzdatnić, gabaryty centrali czy zastosowane rozwiązania techniczne. Projektant zwraca uwagę na parametry powietrza nawiewanego, natomiast dla inwestora dodatkowo ważne są zagadnienia kosz-

[1] Autor do korespondencji/corresponding author: Justyna Kot, Politechnika Krakowska, al. Jana Pawła II 37, tel. (12) 628 35 89, e-mail: jkot@pk.edu.pl

tów urządzeń i ich późniejszej eksploatacji. Centrale klimatyzacyjne zawierają dużo prostych i pewnych w działaniu urządzeń. Za przygotowanie powietrza o odpowiedniej temperaturze odpowiedzialne są chłodnice i nagrzewnice. Ponadto centrale klimatyzacyjne posiadają nawilżacz, wielostopniowe filtrowanie, a czasem i dodatkową nagrzewnicę. Do procesu uzdatniania powietrza dostarczana jest energia, która zostaje usuwana wraz z powietrzem wywiewanym. W systemach wentylacyjnych jest to energia, którą można odzyskać i ponownie wykorzystać.

2. Odzysk ciepła

Wykorzystanie odzyskanej energii może być realizowane na kilka sposobów. Najprostszym jest recyrkulacja powietrza wywiewanego. Polega ona na mieszaniu się części strugi powietrza powracającego z pomieszczenia ze strugą powietrza zewnętrznego. Metoda prosta, ale wymaga spełnienia ważnego kryterium: powietrze recyrkulowane musi być czyste i wolne od zapachów.

Inne formy odzysku ciepła podzielono, wg zastosowanych urządzeń, na trzy podstawowe grupy [2]:
– rekuperatory,
– regeneratory,
– pompy ciepła.

W pierwszej grupie najpopularniejsze w zastosowaniu są płytowe wymienniki przeponowe. Przez wymiennik przepływają strugi powietrza zewnętrznego oraz powracającego z pomieszczenia. W skutek wymiany ciepła wykorzystywana jest odzyskana energia do przygotowania powietrza do nawiewania czy dalszego uzdatniania.

Kolejna grupę tworzą urządzenia regeneracyjne, wykorzystujące masę lub roztwór akumulujący ciepło jawne lub całkowite jednego ze strumieni powietrza. Pobrane przez masę/roztwór ciepło jest następnie oddawane drugiemu strumieniowi powietrza.

Do trzeciej grupy należą pompy ciepła, czyli urządzenia realizujące lewobieżny obieg termodynamiczny. Krążący w obiegu czynnik chłodniczy pobiera ciepło ze źródła o niższym potencjale (tzw. dolne źródło) i przekazuje do odbiornika o wyższym potencjale (tzw. źródło górne)

Najważniejsze cechy systemów do odzysku ciepła przedstawia tabela 1.

Tabela 1. Wady i zalety podstawowych urządzeń do odzysku ciepła

Table 1. The pros and cons of Basic heat recovery equipment

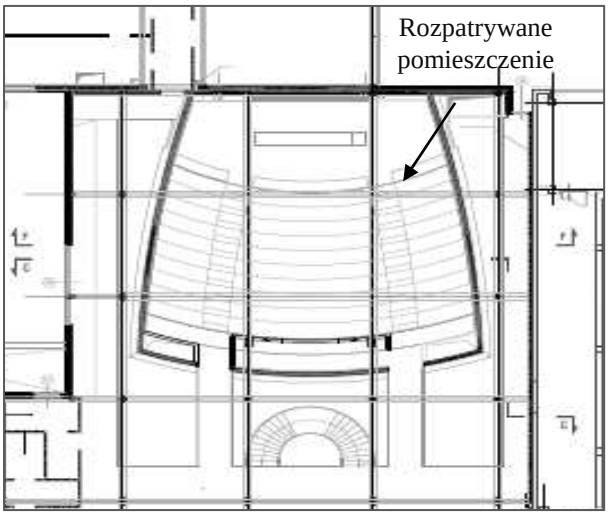
	Zalety	Wady
Rekuperacja	– prostota konstrukcji – brak konieczności doprowadzenia energii spoza układu – stabilność działania – możliwość regulacji wydajności wymiennika – zastosowanie by – pass	– możliwość występowania szronienia już w temperaturze -5°C – duże gabaryty centrali z wymiennikiem krzyżowym – możliwość pojawienia się nieszczelności wymienników z czasem eksploatacji.
Regeneracja	– wysokie sprawności odzyskiwania ciepła – możliwość odzyskiwania „chłodu" w okresie letnim, z powietrza wywiewanego – możliwość płynnej lub skokowej regulacji wydajności wymiennika w zależności od konstrukcji – prostota konstrukcji	– wymagane doprowadzenie energii z zewnątrz – układ nie jest szczelny (istnieje możliwość przecieku powietrza w zależności od aktualnej różnicy ciśnień) – możliwość występowania zjawiska przenikania zapachów – możliwość wystąpienia awarii ze względu na obecność części ruchomych
Pompa ciepła	– szczelny układ – uniwersalność pracy (chłodzenie latem, grzanie zimą) – możliwość regulacji wydajności przez zmianę wydajności sprężarki	– wymagane doprowadzenie energii z zewnątrz – wysoki koszt urządzenia

3. Projekt klimatyzacji

3.1. Założenia projektowe

Analiza ekonomiczna kosztów inwestycyjnych i klimatyzacyjnych została poprzedzona projektem instalacji klimatyzacji w obiekcie użyteczności publicznej. System klimatyzacji zaprojektowano dla sali wykładowej Wydziału Fizyki Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie. Rysunek 1 przedstawia zarys audytorium. Omawiana sala ma następujące parametry konstrukcyjno – budowlane:

– budowa amfiteatralna,
– powierzchnia 206,6 m^2,
– kubatura 1150 m^3,
– 240 miejsc siedzących,
– brak przeszklenia,
– sztuczne naświetlenie.



Rys. 1. Schemat rozpatrywanego pomieszczenia

Fig. 1. Diagram of the room

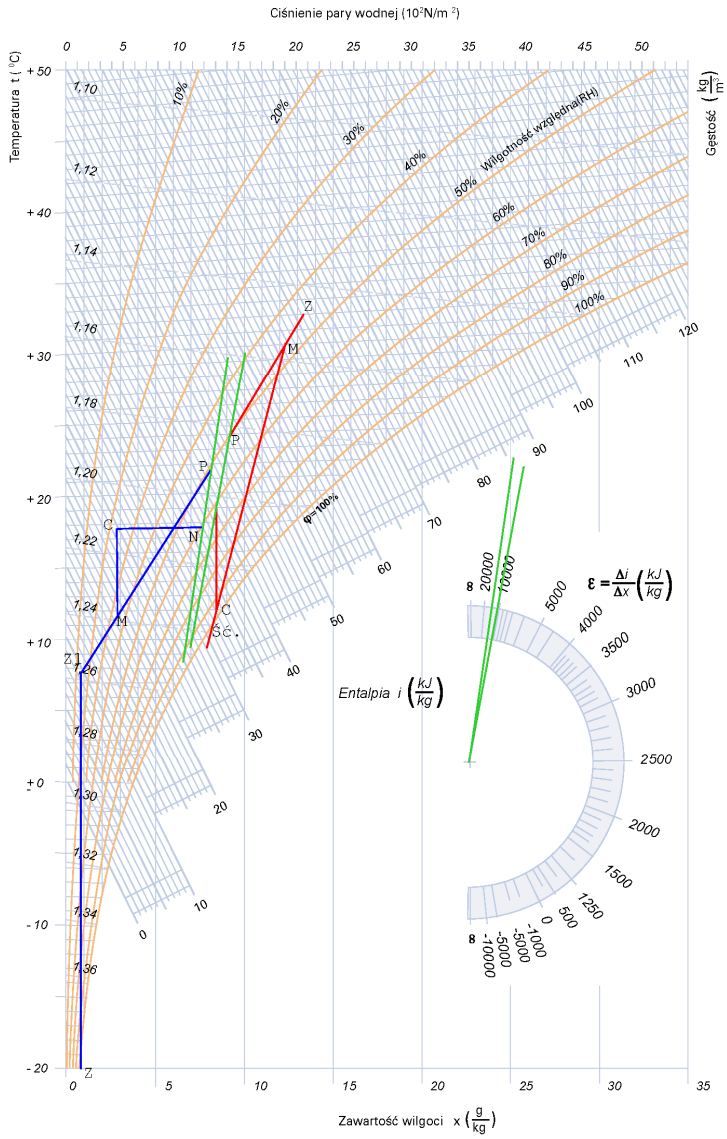
Projektując centralę klimatyzacyjną zostały przyjęte następujące założenia: parametry powietrza zewnętrznego i wewnętrznego w okresie letnim i zimowym oraz czas użytkowania obiektu wynoszący 5 dni w tygodniu po 10 godzin łącznie przez 8 miesięcy. Parametry projektowe powietrza przedstawiono w tabeli 2. Przyjęto również, iż sala będzie wyposażona w sprzęt multimedialny niezbędny do prowadzenia zajęć.

W pierwszym etapie projektowania obliczono zyski ciepła powstałe w pomieszczeniu. W bilansie uwzględnione zostały zyski powstające wskutek przebywania ludzi (współczynnik jednoczesności przebywania ludzi w pomieszczeniu ψ=0,6), przenikania ciepła przez przegrody, używania sztucznego oświetlenia zastosowania sprzętów elektrycznych wydzielających ciepło. W zbilansowanym pomieszczeniu uzyskano maksymalną wartość obciążenia chłodniczego ok. 21 kW. Na takie zapotrzebowanie chłodu zostały dobrane 3 centrale klimatyzacyjne.

Tabela 2. Założone parametry projektowe powietrza wewnętrznego i zewnętrznego centrali klimatyzacyjnej

Table 2. Design parameters of internal and external air AHU

	Powietrze w pomieszczeniu		***Powietrze zewnętrzne****	
LATO	T_P [°C]	φ_P [%]	T_Z [°C]	φ_Z [%]
	24	50	32	45
ZIMA	T_P [°C]	φ_P [%]	T_Z [°C]	φ_Z [%]
	22	50	-20	100



Rys. 2. Projekt centrali klimatyzacyjnej bez odzysku ciepła na wykresie Moliera

Fig. 2. AHU project without heat recovery on the chart od Moliere.

Jako punkt odniesienia do przeprowadzenia analizy kosztów, dobrano centralę bez urządzenia do odzysku ciepła. Porównywane z nią zostały centrale z wymiennikiem krzyżowym oraz obrotowym, reprezentującymi dwie grupy urządzeń do odzysku ciepła, a jednocześnie najbardziej popularnymi w zastosowaniu na rynku klimatyzacyjnym. W tabeli 3 zestawiono sprawność oraz wydajności urządzeń w centralach klimatyzacyjnych, na podstawie kart doborowych central [10].

Tabela 3. Sprawność oraz wydajności poszczególnych urządzeń w centralach klimatyzacyjnych, na podstawie [10]

Table 3. The efficiency and performance of each device in the AHU, based on [10]

	Wariant 1 - bez odzysku	**Wariant 2 - wymiennik krzyżowy**	**Wariant 3 - wymiennik obrotowy**
Sprawność odzysku [%]	0	53,3	79,2
Moc nagrzewnicy wstępnej [kW]	104,5	-	-
Moc chłodnicy [kW]	84	62,8	62,8
Moc nagrzewnicy wtórnej [kW]	19,9	27	18,1
Moc wentylatorów, naw./wyw. [kW]	5,5/3	5,5/4	5,5/3

3.2. Analiza ekonomiczna

Analizę kosztów przeprowadzono pod względem kosztów inwestycyjnych oraz eksploatacyjnych. W porównaniu kosztów inwestycyjnych zostały wzięte pod uwagę koszt zakupu centrali oraz pełna automatyka do jej obsługi. Ze względu na różnorodność cen proponowanych przez firmy wykonawcze w analizie zostały pominięte koszty związane z zakupem materiału, a porównano tylko ceny central. W tabeli 4 zestawiono koszty inwestycyjne różnych rozwiązań na podstawie wyceny firmy Klimor.

Rozpatrując koszty eksploatacyjne wzięto pod uwagę koszty związane z doprowadzeniem energii cieplnej do nagrzewnicy, energii do chłodnicy, energii potrzebnej do napędu wentylatorów oraz koszty serwisowania i wymiany filtrów. Parametry pracy urządzeń centrali zostały zebrane w tabeli 5. Dla celów porównawczych, do obliczeń kosztów eksploatacyjnych, przyjęto założenie pracy urządzeń z pełną mocą w przyjętym czasie pracy (tabela 5).

Tabela 4. Koszty inwestycyjne centrali wraz z automatyką

Table 4. Investment costs AHU with Automation.

	Wariant 1 - bez odzysku	**Wariant 2 - wymiennik krzyżowy**	**Wariant 3 - wymiennik obrotowy**
Koszt centrali [zł]	55 000,00	59 000,00	64 500,00
Koszt automatyki [zł]	17 800,00	17 300,00	15 600,00
Całkowite koszty inwestycyjne [zł]	72 800,00	76 300,00	80 100,00

Do analizy zostały przyjęte następujące ceny energii elektrycznej P_{el}=**0,57** zł/kWh [11] oraz cieplnej P_s=**2637,78** zł/MW/mc (stała) i P_z=18,16 zł/GJ=**0,065** zł/kWh (zmienna) wg taryf dla miasta Krakowa.

Tabela 5. Parametry pracy urządzeń centrali

Table 5. Performance of AHU

	Lato	**Zima**
Czas pracy urządzeń	4 miesięcy 5 dni w tygodniu po 10 godzin (22 dni w miesiącu)	
Temperatura nawiewu °C	19	18
Spręż dyspozycyjny [Pa]	590	
Klasa filtrowania	EU4	
Medium grzewcze °C	Woda 80/60	
Medium chłodzące °C	Woda 8/14	

Obliczenia kosztów eksploatacyjnych zostały przeprowadzone na podstawie wzorów (1) – (9).

Przykład obliczeniowy dla centrali bez odzysku ciepła.

Koszty energii cieplnej dla nagrzewnicy

Roczny koszt energii dla nagrzewnicy wstępnej:

$$Q_a = Q_{nagrz} \cdot 10^{-3} \cdot D_r \left[\frac{MWh}{rok}\right] \tag{1}$$

gdzie: Q_a – roczne zużycie energii nagrzewnicy,
Q_{nagrz} – moc cieplna nagrzewnicy,
D_r – czas pracy wymiennika w ciągu roku.

$$D_r = D_m \cdot D_d \cdot D_g \left[\frac{h}{rok}\right] \tag{2}$$

gdzie: D_m – liczba miesięcy pracy wymiennika w roku,
D_d – liczba dni pracy wymiennika w miesiącu,
D_g – liczba godzin pracy wymiennika w ciągu dnia.

Koszt eksploatacji nagrzewnicy składa się z opłaty stałej (3) i zmiennej (4). Stała część zależna jest od mocy zainstalowanej oraz ilości miesięcy pracy nagrzewnicy, natomiast zmienna część od rzeczywistej zużytej energii.

Opłata stała:

$$K_{nagrz,s} = Q_{nagrz} \cdot P_s \cdot D_m \left[\frac{zł}{rok}\right] \tag{3}$$

Opłata zmienna:

$$K_{nagrz,z} = Q_a \cdot P_z \cdot 10^3 \left[\frac{zł}{rok}\right] \tag{4}$$

Tabela 6. Koszty pracy nagrzewnic

Table 6. Heater running costs

	$\mathbf{Q_{nagrz}}$ [kW]	$\mathbf{D_r}$ [h/rok]	$\mathbf{Q_a}$ [MWh/rok]	$\mathbf{K_{nagrz,s}}$ [zł/rok]	$\mathbf{K_{nagrz,z}}$ [zł/rok]	$\mathbf{K_{nagrz}}$ [zł/ rok]
Nagrzewnica wstępna	104,5	880	91,96	1102,59	5977,4	7079,99
Nagrzewnica wtórna	19,9	1760	35,024	209,98	2276,56	2486,53

Koszty użytkowania nagrzewnic wstępnej i wtórnej zostały zebrane w tabeli 6. Czas pracy urządzeń D_r obliczono na podstawie danych w tabeli 5.

Koszt energii chłodnicy

Chłodnica centrali jest zasilana zewnętrznym agregatem. Należy wówczas również wziąć pod uwagę koszty z wiązane z pracą tego agregatu. Na dodatkowe zużycie energii składają się praca wentylatora oraz sprężarki w agregacie zewnętrznym. Ilość energii pobranej w ciągu roku przez te urządzenia obliczono ze wzoru (5), natomiast moc potrzebna do napędu sprężarki obliczana jest ze wzoru (6). Zgodnie z wyznaczonymi parametrami pracy centrali (tabela 5), chłodnica pracuje tylko w okresie letnim.

$$Q_{ch} = \left(N_{went} + N_{spr}\right) \cdot 10^{-3} \cdot D_r \left[\frac{MWh}{rok}\right] \tag{5}$$

gdzie: Q_{ch} – ilość energii zużytej w ciągu roku na potrzeby chłodzenia,
N_{went} – moc silnika wentylatora agregatu zasilającego chłodnicę.

$$EER = \frac{Q_{chł}}{N_{spr}} \rightarrow N_{spr} = \frac{Q_{chł}}{EER} \tag{6}$$

Założono, że agregat zasilający chłodnicę należy do klasy efektywności energetycznej B oraz że współczynnik EER=3,0.

Roczny koszt chłodzenia wody obliczany jest z zależności (7), a wyniki kosztów przedstawia tabela 7.

$$EER = \frac{Q_{chł}}{N_{spr}} \rightarrow N_{spr} = \frac{Q_{chł}}{EER} \tag{7}$$

Tabela 7. Koszty pracy chłodnicy

Table 7. Cooler running costs

	N_{spr} [kW]	N_{went} [kW]	D_r [h/rok]	Q_{ch} [MWh/rok]	K_{ch} [zł/rok]
Chłodnica	28	3,68	880	27,88	15891,60

Koszt energii elektrycznej zużytej przez wentylatory w centrali

$$K_{went} = \left(N_{went,naw} + N_{went,wyw}\right) \cdot P_{el} \cdot D_r \left[\frac{zł}{rok}\right] \tag{8}$$

Gdzie: $N_{went,naw}$ – moc silnika wentylatora nawiewnego,

$N_{went,wyw}$ – moc silnika wentylatora wywiewnego.

Wentylatory pracują przez cały rok, $D_r = 1760 \left[\frac{h}{rok}\right]$

$$K_{went} = 8527{,}20 \left[\frac{zł}{rok}\right]$$

Powyższe koszty eksploatacyjne zostały powiększone o koszty wymiany filtrów. Koszt wymiany filtrów wynosi ok. 100 zł/szt. Filtry wystarczy wymieniać raz do roku, zaś każda centrala jest wyposażona w 4 filtry powietrza. W związku z tym dodatkowy roczny koszt wymiany filtrów oblicza się wg zależności (9):

$$K_{filtrów} = n \cdot P_f \left[\frac{zł}{rok}\right] \tag{9}$$

Gdzie: n = 4 [szt.] – liczba filtrów potrzebnych do wymiany,

$P_f = 100 \left[\frac{zł}{szt}\right]$ – cena filtra.

Koszty eksploatacyjne obejmują ponadto koszty serwisowania instalacji klimatyzacji, w tym wymianę uszkodzonych lub zużytych elementów. Instalację należy serwisować z częstotliwością uwarunkowaną wymaganiami gwarancyjnymi i producenckimi. Całkowite koszty eksploatacyjne przedstawia tabela 6.

Tabela 8. Koszty eksploatacyjne centrali

Table 8. Operating costs AHU

	Wariant 1	***Wariant 2***	***Wariant 3***
Nagrzewnica wstępna	7 079,99	-	-
Nagrzewnica wtórna	2 486,53	3 373,68	2 261,62
Chłodnica	15 891,60	12 259,03	12 213,86
Wentylator centrali	8 527,20	8 694,37	8 530,83
Wymiana filtrów	400,00	400,00	400,00
Razem	34 385,32	24 727,08	23 406,31

4. Podsumowanie

Z przeprowadzonej analizy zaprezentowanych trzech typów rozwiązań wynika, że centrala odzyskująca ciepło z powietrza jest najkorzystniejszym rozwiązaniem pod względem kosztów eksploatacyjnych.

Centrala bez odzysku ciepła jest najtańsza i najmniejsza spośród rozpatrywanych wariantów. Niestety takie rozwiązanie powoduje bardzo wysokie koszty zużycia energii cieplnej i elektrycznej niezbędnej do pracy urządzeń. Urządzenia pracują z wysoką wydajnością w celu uzdatnienia powietrza do założonych parametrów.

Centrale odzyskujące ciepło są niewiele droższe od tych bez odzysku ciepła, lecz tańsze w utrzymaniu. Zastosowanie rekuperacji (wymiennik krzyżowy) lub regeneracji (wymiennik obrotowy) pozwala na zmniejszenie wydajności pracy pozostałych urządzeń, a z tym się wiąże mniejsze zużycie energii i niższe koszty eksploatacji urządzeń. Oszczędzić można ok. 40 % kosztów poniesionych w porównaniu do centrali bez odzysku ciepła. Pomimo wysokich nakładów inwestycja szybko się zwraca, oszczędzając właśnie na wydatkach za energię. Wadą tych rozwiązań jest wzrost wymiarów centrali o wielkość wymiennika. Szczególnie powiększa się centrala z wymiennikiem krzyżowym.

Przedstawiona w pracy analiza miała za zadanie udowodnić, że odzyskiwanie energii z powietrza uzdatnianego do klimatyzowania jest rozwiązaniem korzystnym i bardzo opłacalnym. Przeprowadzona analiza udowadnia, że centrala odzyskująca ciepło jest bardzo dobrą inwestycją, która w bardzo krótkim czasie się zwróci. Jest to możliwe dzięki oszczędnościom energii. Pozostaje jedynie zdecydować o rodzaju odzysku ciepła i wymienniku, w którym proces ten będzie realizowany.

Literatura

[1] CERIM. Klimatyzacja - wentylacja. (2010). Pobrano z lokalizacji Wskaźnik efektywności chłodniczej http://www.cerim.pl/index.php?page=content/poradnik/18_1.php.

[2] Lewandowski W.M.: Proekologiczne źródła energii odnawialnej, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.

[3] Gutkowski, K. M., & Butrymowicz, D. J. (1999). Chłodnictwo i klimatyzacja. Warszawa: Wydwnictwa Naukowo-Techniczne.

[4] Klimor. (2010). Pobrano z lokalizacji www.klimor.pl.

[5] Ogrzewanie-pompy ciepła. (2010). Pobrano z lokalizacji Zasada działania pompy ciepła.:5.http://www.heizung-waermepumpe.de/pl/tak-funkcjonuje-pompaciepla/zasada-dzialania-pompy-ciepla.html.

[6] Pawiłojć, A., Targański, W., & Bonca, Z. (1999). Odzysk ciepła w systemach wentylacyjnych i klimatyzacyjnych. Gdańsk: IPPU MASTA.

[7] Pełech, A. (2009). Wntylacja i klimatyzacja. Podstawy. Wyd. II. Wrocław: Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej.

[8] Recknagel, Sprenger, & Schramek. (2008). Kompendium wiedzy. Ogrzewnictwo. Klimatyzacja. Ciepła woda. Chłodnictwo. Wrocław: Omni Scala.

[9] Ullrich, H.-J. (2001). Technika klimatyzacyjna. Poradnik. Gdańsk: IPPU Masta

[10] Klimor, karty doborowe central klimatyzacyjnych.

[11] www.zaklad.energetyczny.w.interia.pl - cennik energii elektrycznej.

HEAT RECOVERY IN UTILITY – PRELIMINARY ECONOMIC ANALYSIS

S u m m a r y

This article presents the financial analysis of air conditioning systems using various heat recovery systems at public service. It moves also the issue of recovery systems of heat – energy in air conditioning systems and ventilation. Acquisition of energy arising in the system can be implemented by systems such as for secondary recuperation, regeneration or the heat pump, which are common in the use of public facilities or residential, multi and single family houses. To carry out the analysis of the Lecture Hall had served the Faculty of Physics of AGH University of Science and Technology. The analysis of the project precedes the installation unit in three versions. The firs variant, which is the point of reference is the AHU without heat recovery. It been compared with two AHU: with recuperation and regenerative systems. In the analysis of investment costs and operating costs were taken into account.

Analysis carried out shows that incurred higher investment purchase AHU will result in lower operating costs. Cost of ownership of most popular in application recuperative exchanger are not much higher than the cost of the AHU of the regenerative heat exchanger. And both solution involve a nearly forty percent savings in relation to the system without heat recovery.

Keywords: heat recovery systems, recuperation, regeneration, heat pump, air conditioning operating costs

Przesłano do redakcji: 27.01.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.48

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 189-196

Zbigniew KOWAL[1]
Rafał PIOTROWSKI[2]

ENERGOAKTYWNE SEGMENTY HAL PRZEKRYTE REGULARNĄ STRUKTURĄ KOSZOWĄ

W pracy pokazano koncepcję hali przekrytej regularną strukturą koszową, charakteryzującą się znaczącą powierzchnią przekrycia, nadającą się do zagospodarowania absorberami, do pozyskiwania energii cieplnej oraz elektrycznej z promieniowania słonecznego. Dodatkowym atutem przekrycia koszowego jest ułatwione samooczyszczanie powierzchni pokrycia ze śniegu zwiększające nasłonecznienie absorberów w okresie zimowym. Rozmieszczenie i ilość absorberów zależą od bilansu energetycznego hali. W hali wydzielono energoaktywne segmenty dylatacyjne w celu zredukowania wpływów termicznych na konstrukcję. Podzielono halę na segmenty konwencjonalne oraz segmenty energoaktywne (SE). Segmenty energoaktywne zbudowano z geometrycznie niezmiennych segmentów montażowych, umożliwiających sprawny i bezpieczny montaż. Szerokość minimalnego segmentu energoaktywnego dobrano z warunku minimum wpływów termicznych przy zachowaniu niezawodności o wskaźniku $t_2 \geq 3{,}8$ [9]. W przypadku konieczności dalszego zmniejszenia szerokości segmentów energoaktywnych należy dostroić niezawodność do zaleceń normy [9]. Wydzielone minimalne segmenty energoaktywne przekryte strukturą regularną charakteryzują się znaczącą redukcją wpływu temperatury na wytężenie prętów poprzez zastosowanie przegubu w kluczu. Zastosowano asekurację niesymetrycznych przemieszczeń za pomocą zdwojonych przekrojów prętów skrajnych pasów górnych. Zastosowano równoległe sprzężenia elementów sprawczych w kinematycznie dopuszczalnych mechanizmach zniszczenia (KDMZ) segmentów zwiększając niezawodność powyżej zalecanej w klasie RC2 [9]. W konstrukcjach hal przekrytych strukturami udało się korzystnie wydzielić energoaktywne segmenty dylatacyjne, w których dostateczna liczba elementów sprawczych daje się sprzęgać w KDMZ zwiększając nośność i niezawodność konstrukcji powyżej oczekiwań [9] normowych.

Słowa kluczowe: energoaktywne segmenty hal, struktury metalowe, przekrycia koszowe, niezawodność konstrukcji

---

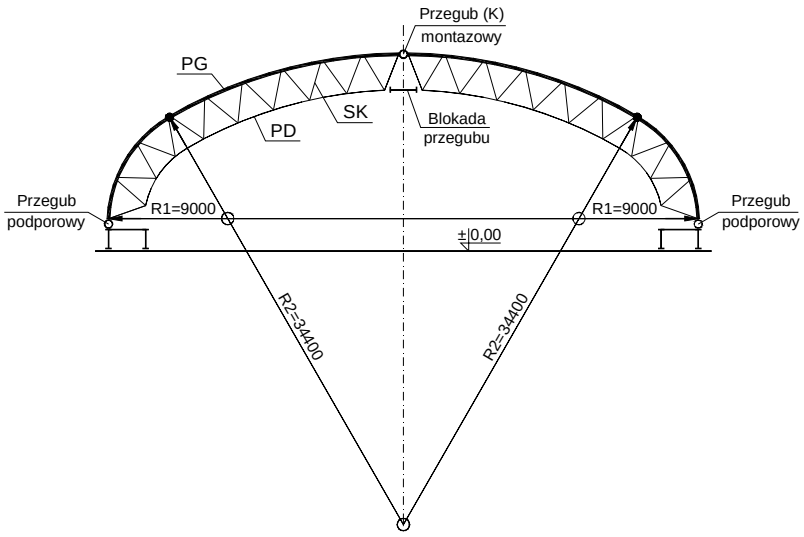
[1] Autor do korespondencji: Rafał Piotrowski, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, (41) 34 24 802, rafalp@tu.kielce.pl
[2] Zbigniew Kowal; Politechnika Świętokrzyska, Wydział Budownictwa i Architektury, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, (41) 34 24 576, zbigko@tu.kielce.pl

1. Wprowadzenie

W pracy [8] pokazano pilaste energoaktywne przekrycie łukowe w postaci energoaktywnych dźwigarów trójpasowych. Podano koncepcję konstrukcji przekrycia oraz technologię pozyskiwania, transportu i magazynowania energii cieplnej otrzymywanej z promieniowania słonecznego.

W niniejszej pracy przedstawiono koncepcję konstrukcji energoaktywnych segmentów dylatacyjnych [4,5,6,7], przekrytych regularną trójprzegubową strukturą koszową. Przewidziano również alternatywne rozwiązanie dwuprzegubowe w drodze zablokowania przegubu w kluczu. Takie rozwiązanie umożliwia również wariantowanie montażu. Zaletą trójprzegubowego przekrycia cylindrycznego jest redukcja wpływów termicznych działających poprzecznie do osi hali bez naruszania idei minimalnego segmentu energoaktywnego zawierającego dostateczną liczbę elementów równolegle połączonych z punktu widzenia niezawodności nie wymagającego dostrajania nośności elementów do niezawodności zalecanej w normie [9].

Przyjęte rozwiązanie spełnia postulat najkrótszej drogi sprowadzenia obciążeń do fundamentów. Zasadnicze obciążenie ściskające przenoszone jest przez łukowe pasy górne oznaczone grubą linią (PG) (rys. 1), które dochodzą do węzłów podporowych (fundamentów). Pozostałe elementy konstrukcji (tzn. pasy dolne (PD) oraz skratowanie (SK)) przenoszą resztkowe siły poprzeczne i zginanie. W przypadku zastosowania przegubu w kluczu w przyjętym schemacie konstrukcji występuje zasadnicza redukcja sił termicznych w konstrukcji hali.



Rys. 1. Energoaktywny segment hali przekrytej regularną strukturą koszową

Fig. 1. Energy-active segment of steel hall covered by regular arc structure

W koncepcji podziału hali na segmenty dylatacyjne wzięto pod uwagę swobodne wydłużenie termiczne Δ_T po szerokości L_d energoaktywnego segmentu dylatacyjnego hali, spowodowane temperaturą. Zastosowano automatyczne włączanie transportu ogrzanego powietrza do odbiorników lub magazynów EC za pomocą wentylatorów ssąco - tłoczących przy osiągnięciu umownej temperatury nagrzewanego powietrza np. powyżej +20°C.

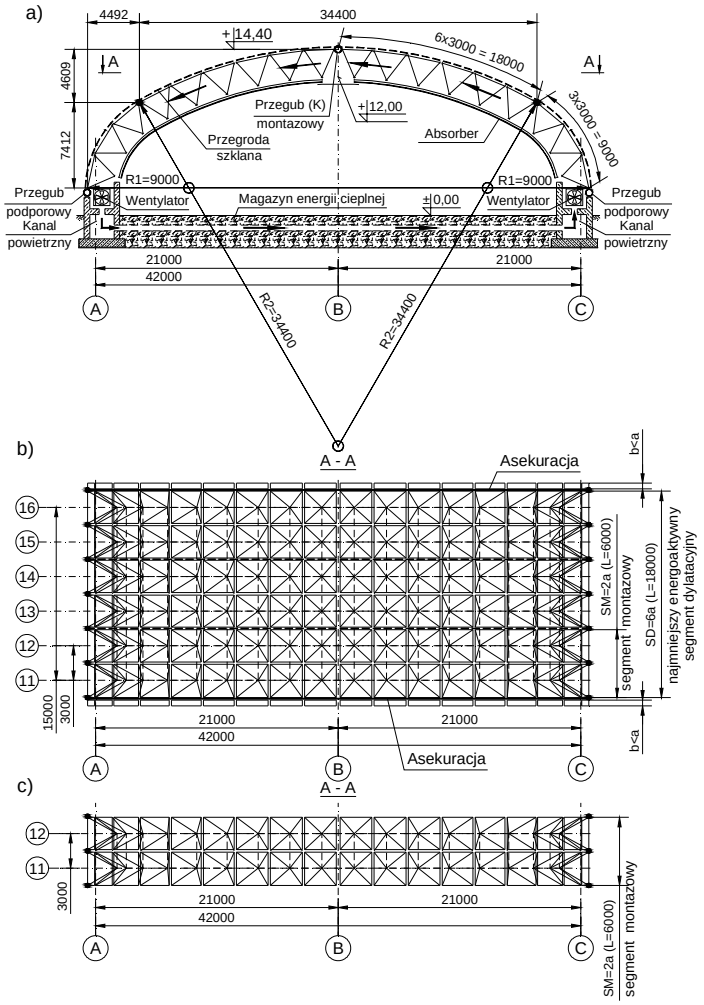
Geometrycznie niezmienną konstrukcję energoaktywnego segmentu dylatacyjnego hali złożono z geometrycznie niezmiennych segmentów montażowych umożliwiających swobodny montaż oraz optymalizację czasu i kosztów montażu konstrukcji hali [4].

2. Koncepcja energoaktywnych segmentów hal przekrytych regularną strukturą koszową

Na rysunku 2a pokazano przykładową koncepcję konstrukcji hali przekrytej regularną strukturą koszową, o górnych oczkach kwadratowych (a = 3m) oraz rozpiętości L = 42m. Geometrię przekrycia (promienie R_1 = 9m oraz R_2 = 34,4m) dobrano tak, aby wysokość użytkowa hali (od posadzki do pasa dolnego) wynosiła H = 12m (rys. 2a). Zwiększenie wysokości lub rozpiętości najlepiej uzyskać w drodze symetrycznego dołożenia dwóch oczek. Całkowitą długość hali (rys. 3) L = 78m + 2b (gdzie: b – odstęp między segmentami), podzielono na typowe (L_d = 10a = 30m) oraz energoaktywne (L_d = 6a = 18m) segmenty dylatacyjne. Liczba oraz rozmieszczenie segmentów energoaktywnych zależy od bilansu zagospodarowania energetycznego hali. Na rysunku 4 pokazano wariantowe rozmieszczenie segmentów konwencjonalnych oraz energoaktywnych.

Na rysunku 3b pokazano przykład minimalnego energoaktywnego segmentu dylatacyjnego (L_d = 3x2a = 6a = 18m) złożonego z 3 geometrycznie niezmiennych segmentów montażowych szerokości 2 oczek (2a = 6m) każdy. Przedstawiony segment spełnia warunek niezawodności o wskaźniku $t_2 \geq 3{,}8$. W przypadku zmniejszenia szerokości segmentu energoaktywnego np. do dwóch oczek należy oszacować współczynnik dostrojenia niezawodności do zaleceń normy [9] na podstawie pracy [2].

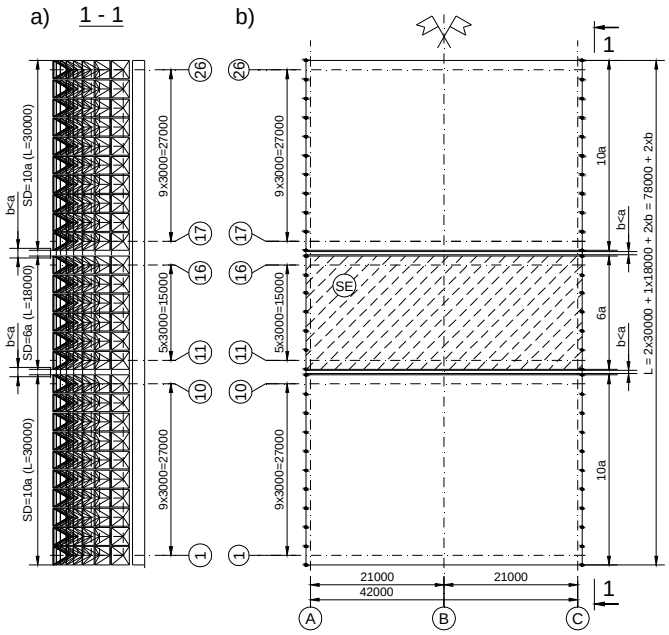
Pomiędzy segmentami dylatacyjnymi zastosowano odstęp b < a, dający odciążenie skrajnych pasów górnych i dolnych struktury (rys. 2b,3). Zmniejszenie odstępu (b < a) asekuruje symetryczne przemieszczenie węzłów wirtualnych kinematycznie dopuszczalnych mechanizmów zniszczenia (KDMZ) w stanie granicznym pasów. Asekurację można zastosować również w skrajnych pasmach segmentów w postaci niezredukowanych przekroi prętów (rys. 2b oraz rys 5).



Rys. 2. Minimalny segment dylatacyjny hali przekrytej regularną strukturą koszową: a) przekrój poprzeczny hali, b) podział segmentu dylatacyjnego na segmenty montażowe, c) segment montażowy

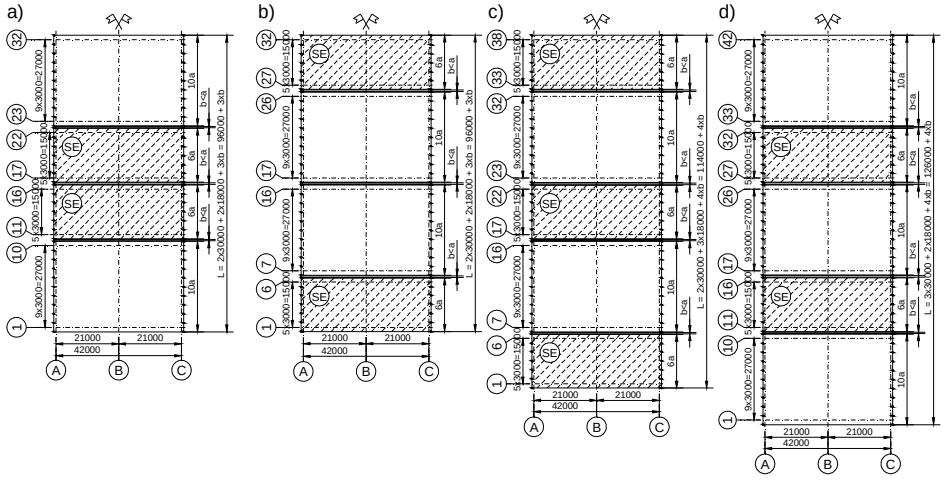
Fig. 2. Minimal expansion segment of steel hall covered by regular arc structure: a) cross-section, b) division expansion segment into assemblies segment, c) assembly segment

Segmenty montażowe składane są na poziomie terenu (począwszy od łożysk) z elementów wysyłkowych postaci odwróconych piramid prętowych, w piramidowo bocznym systemie montażowym. Po wstępnym montażu możemy zablokować przeguby w kluczu. Kolejne segmenty montażowe montowane są stycznie do wcześniej osadzonych. Sąsiadujące pasy górne elementów montażowych łączone są śrubami. Sąsiadujące węzły dolne segmentów montażowych łączone są prętami dolnymi również na śruby.



Rys. 3. Przykład wydzielenia segmentów energoaktywnych: a) widok z boku, b) wydzielenie konwencjonalnych oraz energoaktywnych (SE) segmentów

Fig. 3. Example of separate energy-active segments: a) side view, b) separate traditional and energy-active (SE) segments

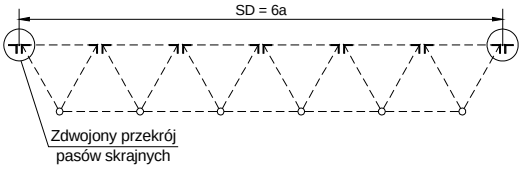


Rys.4. Przykłady rozmieszczenia typowych oraz energoaktywnych (SE) segmentów hali

Fig. 4. Examples of location typical and energy-active (SE) segments

3. Oszacowanie nośności i niezawodności minimalnego segmentu energoaktywnego

Minimalne segmenty energoaktywne przekryte strukturą regularną charakteryzują się silnie zredukowanym wpływem temperatury na wytężenie prętów zwłaszcza w przypadku zastosowania przegubów w zwornikach. Pasy górne energoaktywnych segmentów asekurowano zdwojonymi przekrojami prętów skrajnych (rys. 5).



Rys.5. Dodatkowa asekuracja pasów górnych energoaktywnego segmentu dylatacyjnego

Fig. 5. Additional secures of upper chords energy-active segments

Liczbę sprzężonych w KDMZ pasów górnych i w KDMZ pasów dolnych w oszacowaniu nośności i niezawodności pasów, zmniejszono wg wzoru:

$$n = n_0 - 2 \tag{1}$$

gdzie: n – liczba sprzężonych pasów, n_0 – zmniejszona liczba elementów sprawczych z uwagi na asekurację.

W przypadku pasów górnych przyjęto do oszacowania $n = n_0 - 2 = 5$ pasów. W przypadku pasów dolnych przyjęto $n = n_0 - 2 = 4$ pasy.

Nośność minimalnych geometrycznie niezmiennych segmentów montażowych o szerokości $2a$ (rys. 2c) oszacowano na obciążenie montażowe metodami konwencjonalnymi. Pręty ściskane pod obciążeniem montażowym, sprawdzono na wyboczenie między węzłami. Dotyczy to prętów rozciąganych w procesie eksploatacji, które zmieniają znak obciążenia w procesie montażu.

Przykład oszacowania nośności i niezawodności w procesie eksploatacji. W przykładzie występuje 9x2 = 18 przedziałów pasów górnych oraz 17 przedziałów pasów dolnych, łącznie 35 KDMZ. Każdy z 18 KDMZ pasów górnych zawiera 7 sprzężonych pasów górnych. Każdy z 17 KDMZ pasów dolnych zawiera 6 pasów dolnych. Potencjalna awaryjność q_K układu wynosi (2):

$$q_K = 35 \cdot q_1 \tag{2}$$

gdzie: q_1 – awaryjność pojedynczego elementu.

Zalecany wskaźnik niezawodności elementów sprawczych klasy RC2 wynosi $t_2 = 3{,}8$. Niezawodność pojedynczego elementu sprawczego wynosi [10] $p_1 = 0{,}999927652$, natomiast awaryjność $q_1 = 1 - p_1 = 0{,}000072348$.

Awaryjność niesprzężonych 35 elementów sprawczych wynosiłaby $q_k = 35 \cdot q_1 = 35 \cdot 0{,}000072348 = 0{,}00253218$, co daje niezawodność $p_1 = 1 - q_k = 1 - 0{,}00253218 = 0{,}99746782$ oraz wskaźnik niezawodności rzędu $t_k = 2{,}809$ [10]. Zmniejszenie s_1 nośności układu w stosunku do nośności elementów w przypadku współczynnika zmienności nośności $v_1 = 0{,}1$, wynosiłoby 0,8622 (3) [1]:

$$s_1 = (1 - t_2 v_1) / (1 - t_k v_1) = (1 - 3{,}8 v_1) / (1 - 2{,}809 v_1) = 0{,}8622 \tag{3}$$

W segmencie dylatacyjnym występuje asekuracja w postaci równoległego sprzężenia 7 pasów górnych i sprzężenia 6 pasów dolnych. Zwiększenie nośności wskutek sprzężenia w KDMZ pasów górnych oraz KDMZ pasów dolnych (s_2) oszacowano z wzoru (4) [2]:

$$s_2 = [1 - t_2 v_1 / n^{0.5}]/[1 - t_2 v_1] = [1 - 3{,}8 v_1 / 4^{0.5}]/[1 - 3{,}8 v_1] = 1{,}3065 \tag{4}$$

Nadwyżka nośności wynosi $s_1 \cdot s_2 = 0{,}8622 \cdot 1{,}3065 = 1{,}1265$. Nadwyżka rekompensuje [2] wpływ pozostałych połączeń szeregowych.

4. Podsumowanie, uwagi, wnioski

Wydzielone segmenty energoaktywne charakteryzują się znaczną powierzchnią dachu, nadającą się do zagospodarowania, w celu pozyskiwania energii cieplnej oraz elektrycznej z promieniowania słonecznego. Wiąże się z tym zwiększenie obciążeń konstrukcji hali wyposażeniem oraz temperaturą. Wydzielenie segmentów energoaktywnych zmniejsza obciążenia termiczne [3] a sprzęganie elementów sprawczych konstrukcji w KDMZ-tach, pozwala na probabilistyczną optymalizację [1] i zwiększanie nośności oraz niezawodności konstrukcji.

W konstrukcjach hal przekrytych strukturami daje się korzystnie wydzielić energoaktywne segmenty dylatacyjne, w których dostateczna liczba elementów sprawczych daje się sprzęgać w KDMZ zwiększając nośność i niezawodność konstrukcji powyżej oczekiwań [9] normowych.

Literatura

[1] Kowal Z.: On Adjusting the Load Bearing Capacity of Decisive Members to Reliability Classes of Statically Determinate Complex Structures, Archives of Civil Engineering, LIX, 1, 2013, s. 132 – 142.

[2] Kowal Z.: Instruments of Probabilistic Optimisation of Load Bearing Capacity and Reliability of Statically Indeterminate Complex Structures, Archives of Civil Engineering, LX, 1, 2014, s. 77 – 90.

[3] Kowal Z., Brzezińska K.: Wpływ temperatury na kinematycznie dopuszczalne mechanizmy zniszczenia energoaktywnych segmentów hali, Praca przyjęta na konferencję ZK2014 – Suchedniów 2014.

[4] Kowal Z., Piotrowski R.: Energoaktywne segmenty dylatacyjne hal z przekryciem strukturalnym, BiA PL Vol. 12(2) 2013, s. 221 – 228.

[5] Kowal Z., Piotrowski R., Szychowski A.: Przystosowanie hal przekrytych strukturą do pozyskiwania energii z promieniowania słonecznego, ZNPR nr 283, Z. 59 (2/2012/II), s. 431 – 438.

[6] Kowal Z., Piotrowski R.: Energoaktywne segmenty dylatacyjne hal przekryte strukturą regularną ze ściągiem, Praca przyjęta na konferencję Lublin – Krynica 2014.

[7] Kowal Z., Piotrowski R., Siedlecka M.: Asekurowany segment energoaktywny hali przekryty strukturą zredukowaną ze ściągiem, Praca przyjęta na konferencję ZK2014 – Suchedniów 2014.

[8] Kowal Z., Szychowski A.: Energoaktywne przekrycia łukowe, IiB nr 6/94, s. 251 – 254.

[9] PN-EN 1990:2004, Eurokod: Podstawy projektowania konstrukcji.

[10] Tablice statystyczne rozkładu normalnego.

ENERGY-ACTIVE SEGMENTS OF HALLS COVERED BY REGULAR ARC STRUCTURE

S u m m a r y

The paper presents a concept of hall covered by regular arc structure with significant surface of the roof, which is suitable for deploy a absorbers, to obtain thermal and electricity energy from solar radiation. An additional advantage of arc covering is the increasing insolation of absorbers in winter, what is a result of self-cleaning roof surface. Arrangement and number of absorbers depend on the energy balance of the building. To reduce the thermal influence on structure, typical and energy-active segments were separated in hall. Energy-active segments were composed of geometric invariable assembly segments which enables efficient and secure assembly process. The minimal width of energy-active segment were chosen from condition of minimal thermal influences while maintaining the reliability of the index $t_2 \geq 3{,}8$ [9]. It should be adjust the reliability according to the code [9] if it is necessary to reduce the width of the segments. As a result of combination articulated in the ridge achieved the reduction of thermal influence in minimal energy-active segments. Applied the dual cross of upper chords which give the secured antisymmetric movements. Additionaly parallel coupling elements were used in kinematically admissible failure mechanism, what increasing the reliability above recommended for RC2 class [9]. In hall covered by regular arc structure were preferably separated energy-active expansion segments, which a sufficient number of causative elements can be coupled in a KDMZ what increasing capacity and reliability above expectations of code [9].

Keywords: energy-active segments of steel halls, metal structures, arc covers, structure reliability

Praca w ramach Projektu pt. „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju", temat 7.4: KONSTRUKCYJNE ROZWIĄZANIA ENERGOAKTYWNYCH PRZEKRYĆ BUDOWLANYCH PRZYSTOSOWANYCH DO POZYSKIWANIA ENERGII CIEPLNEJ. Umowa nr: POIG.01.01.02-10-106.

Przesłano do redakcji: 02.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.49

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 197-206

Marcin KRÓLIKOWSKI[1]
Justyna MAZURKIEWICZ[2]
Anna WACHOWICZ[3]

POJAZDY HYBRYDOWE A SYSTEMY FOTOWOLTAICZNE - MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA (PROJEKT OZI)

Artykuł podejmuje tematykę pojazdów hybrydowych wykorzystujących systemy fotowoltaiczne jako jedno ze źródeł energii elektrycznej niezbędnej do pracy tego typu urządzeń. Opisano podstawowe rozwiązania stosowane w/w pojazdach oraz zasadę działania poszczególnych podzespołów. Głównym, poruszanym tematem jest projekt pojazdu hybrydowego OZI który został wykonany przez studentów Akademii Górniczo – Hutniczej w Krakowie. Przedstawiono metodykę obliczeniową wykorzystaną w celu doboru elementów pojazdu. Obliczono wielkość oporów toczenia, oporów powietrza oraz moc silnika niezbędną do pokonania wymienionych oporów. Ponadto dobrano akumulatory o niezbędnej pojemności oraz panele fotowoltaiczne o odpowiedniej mocy, pozwalającej na poprawne działanie sytemu. Tekst artykułu przedstawia najczęściej stosowane rozwiązanie konstrukcyjne w pojazdach hybrydowych z wykorzystaniem systemów fotowoltaicznych oraz rozwiązanie zastosowane w projekcie OZI. Przeprowadzono badania nad pojazdem OZI które obejmowały wartości mocy prądu elektrycznego przepływającego pomiędzy akumulatorami a kontrolerem ładowania akumulatorów, kontrolerem ładowania akumulatorów a silnikiem. Badania prowadzono bez udziału fotoprądu oraz podczas generacji prądu elektrycznego powstającego w wyniku efektu fotowoltaicznego. Do badań wykorzystano multimetry elektronicznie z których dokonywano odczytu pomiarów natężenia i napięcia prądu w interwale 15 sekund. Dodatkowo wyznaczono maksymalny czas ciągłej pracy pojazdu w celu oszacowania jego praktycznego wykorzystania. W celu oszacowania praktycznych korzyści oraz podania docelowej grupy użytkowników powołano się na wyniki badań organizacji *Transport Statistics Great Britain* z roku 2007.

Słowa kluczowe: energia słoneczna, opory toczenia, opory powietrza, transport

---

[1] Autor do korespondencji: Marcin Królikowski, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, WGGiOŚ, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, 12 6172360, mkr@agh.edu.pl.
[2] Justyna Mazurkiewicz, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, WGGiOŚ, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, 12 6172404, mazurkiewicz@geol.agh.edu.pl
[3] Anna Wachowicz, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, WGGiOŚ, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, 12 6172360, amwachow@gmail.com

Wykaz skrótów:

A – amperomierz
AC – akumulator
GGiOŚ – Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie
HEV – elektryczne pojazdy hybrydowe
K – kontroler ładowania akumulatorów
MPPT – punkt mocy maksymalnej (ang. *Maximum Power Point*)
OZI – nazwa projektu
PV – fotowoltaika
SE – silnik elektryczny
V – woltomierz
ZE – zewnętrzne źródło zasilania

1. Wprowadzenia

Na przełomie ostatnich lat zauważalny jest znaczny wzrost zainteresowania elektrycznymi oraz hybrydowymi (HEV) pojazdami cywilnymi wykorzystującymi promieniowanie słoneczne jako jedno ze źródeł energii. Wielu naukowców z całego świata z powodzeniem testuje prototypy takich pojazdów.

Za wzrostem zainteresowania przemawia przede wszystkim wszechobecne oraz praktycznie niewyczerpywalne źródło energii jakim jest promieniowanie słońca. Mimo znacznych problemów technologicznych przy stosowaniu fotowoltaiki (PV) nie zauważa się spadku zainteresowania tą technologią wśród konstruktorów pojazdów elektrycznych. Systemy te znajdują zastosowanie w rozwiązywaniu istotnych problemów dotyczących redukcji emisji gazów cieplarnianych.

Wykorzystanie energii słońca do zasilania pojazdów elektrycznych znajduje również wielu sceptyków w środowisku naukowym oraz wśród inżynierów. Takie podejście podyktowane jest sprawnością (uzysk energetyczny) tych rozwiązań biorąc pod uwagę zapotrzebowanie na energię elektryczną w pojazdach z napędem elektrycznym.

Zgodnie z *Transport Statistics Great Britain* z roku 2007, znacząca ilość użytkowników miejskich pojazdów wykorzystuje osobisty transport samochodowy na małych odległościach i przejazdach nie dłuższych niż 20 minut [7]. Ponad to najczęściej stosowane rozwiązania w pojazdach (HEV) to konstrukcje jedno osobowe lub dwuosobowe [5]. Takie warunki podróżowania pozwalają na skuteczne zastosowanie instalacji PV.

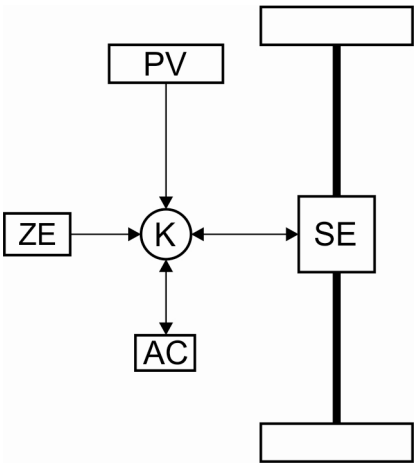
Rozwiązania konstrukcyjne dla pojazdów konwencjonalnych nie znajdują bezpośredniego odzwierciedlenia w pojazdach hybrydowych z technologią PV. Dlatego podczas projektowania należy uwzględnić głównie takie parametry jak waga pojazdu, aerodynamika, strategia w zarządzaniu energią [3]. Uwzględnić należy również strategią pozyskiwania oraz gromadzenia energii produkowanej z PV[4].

Obecnie powstało wiele projektów pojazdów pozyskujących energię z PV między innymi w Japonii, Western Washington University, Queensland University oraz wiele innych [1][2]. Za przykłady posłużyć mogą pojazdy o nazwie „Promyk słońca", „Manta GTX", „Maize blaize", „NED" oraz wiele innych [4]. Jednym z projektów stworzonych w Polsce jest projekt OZI. Projekt ten powstał na Wydziale GGiOŚ Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Twórcami byli studenci zrzeszeni w kole naukowym odnawialnych źródeł energii GRZAŁA. Przedsięwzięcie to miało na celu stworzenie instrumentu badawczego pozwalającego studentom kierunku Inżynieria Środowiska na rozwijanie umiejętności praktycznych w systemach PV. Projekt OZI w niniejszym artykule został dogłębniej przestawiony jako przykład

2. Model pojazdu solarno-hybrydowego

Obecnie stosowanych jest kilka rozwiązań napędu w pojazdach hybrydowych wykorzystujących systemy PV. Najczęstsze rozwiązanie zbudowane jest z paneli fotowoltaicznych połączonych szeregowo lub szeregowo / równolegle (PV), systemu akumulatorów (AC), silnika elektrycznego (SE), dodatkowego źródła energii elektrycznej (ZE) oraz kontrolera (K).

W modelu pojazdu przedstawionego na rysunku nr 1 silnik elektryczny oprócz elementu napędowego pełni funkcję generatora prądu elektrycznego. W trakcie hamowania pojazdu energia kinetyczna zamieniana jest na energię elektryczną, która po zmagazynowaniu w akumulatorze może zostać wykorzystana podczas przemieszczania się pojazdem. Działanie pozostałych elementów bazowych pojazdu opisano w punkcie 2.2. Tego typu rozwiązania stosowane są w pojazdach produkowanych seryjnie takich jak Toyota Prius oraz Honda Civic. Należy zauważyć, że PV w w/w pojazdach stosowany jest w celu zapewnienia energii elektrycznej wykorzystywanej do poprawnej pracy klimatyzacji oraz urządzeń pokładowych [6].



Rys. 1. Model pojazdu solarno-hybrydowego

Fig. 1. Model of solar hybrid vehicle

3. Projekt OZI

3.1. Wprowadzenie

Projekt OZI swe początki miał jako koncepcja pojazdu o napędzie hybrydowym która powstała podczas działalności koła naukowego Odnawialnych Źródeł Energii „GRZAŁA" na Wydziale GGiOŚ AGH w Krakowie. Głównymi założeniami projektu były:

- pojazd trójkołowy jednoosobowy,
- dwa źródła napędu (elektryczny, mechaniczny),
- dwa źródła energii (konwersja fotowoltaiczna, energia ludzkich mięśni),
- wykorzystanie podzespołów konstrukcyjnych dostępnych na rynku ogólnym.



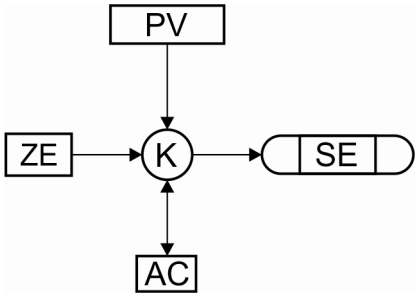
Rys. 2. Poglądowy model pojazdu OZI

Fig. 2. The illustrative model of the OZI vehicle

3.2. Model projektu OZI

Jako źródło energii elektrycznej wykorzystano zestaw 4 paneli fotowoltaicznych (PV), krzemowych, monokrystalicznych połączonych szeregowo o łącznym napięciu 48V, prądzie zwarcia 3,72A, łącznej mocy 240W i sprawności 18%. Panele zamontowano na pojeździe w formie dachu z możliwością regulacji nachylenia w jednej płaszczyźnie. Energia uzyskana z konwersji fotoelektrycznej przekazywana jest do kontrolera ładowania akumulatorów (K). Następnie w zależności od potrzeb przekazywana jest przez kontroler do czterech akumulatorów żelowych (AC) połączonych szeregowo (każdy o napięciu 12V oraz pojemności 17Ah) o łącznym napięciu 48V lub silnika elektrycznego. Silnik elektryczny zlokalizowany jest w jednym przednim kole w formie piasty (SE). W czasie braku generacji fotoprądu energia wymagana do napędu silnika przekazywana jest z akumulatorów.

Jako awaryjne źródło napędu pojazdu zastosowano napęd mechaniczny zasilany mięśniami kierowcy. Napęd przekazywany jest za pomocą pedałów rowerowych podłączonych do koła zębatego. Następnie realizacja napędu za pomocą łańcucha rowerowego przekazywana jest na przekładnie zębatą oraz ostatecznie na jedno tylne koło.



Rys. 3. Model pojazdu solarno-hybrydowego OZI

Fig. 3. Model of solar hybrid vehicle OZI

3.3. Obliczenia i dobór podzespołów

W celu doboru odpowiedniego systemu napędowego obliczono minimalną niezbędną moc potrzebną do swobodnego przemieszczania się pojazdu.

Założono, że pojazd poruszał będzie się ze średnią prędkością 20 km/h, dlatego na podstawie wzoru nr 1 [3][7] obliczono opory toczenia których wartość wyniosła 25,55 [N].

$$F_{to} = M \cdot g \cdot F_t(1 + A \cdot v^2) \tag{1}$$

gdzie: F_{to} – opory toczenia [N],
M – masa pojazdu [kg],
g – przyśpieszenie ziemskie,
F_t – współczynnik tarcia,
A – współczynnik toczenia dla powierzchni asfaltowej
V^2 – prędkość pojazdu [km/h].

Następnie na podstawie wzoru nr 2 [3][7]obliczono opory powietrza. Na potrzeby obliczeniowo założono, że pojazd stanowi pełna bryła, co można potraktować jako przeszacowanie. Obliczeniowy całkowity opór powietrza wyniósł 25,78 [N] przy współczynniku powierzchni czołowej A_t równym 2,025 [m^2] [5].

$$F_{po} = 0{,}5 \cdot \rho_{po} \cdot C_x \cdot A_t \cdot v^2 \tag{2}$$

gdzie: F_{po} – opory powietrza [N],
ρ_{po} – gęstość powietrza [kg/l] (warunki normalne),
C_x – współczynnik oporu aerodynamicznego,
A_t – współczynniku powierzchni czołowej [m^2],
V^2 – prędkość pojazdu [km/h].

Zgodnie z powyższym szacowana, niezbędna moc przekazywana na koło napędowe wyniosła 293,04 [W], co policzono za pomocą wzoru nr 3 [3][7].

$$P_K = (F_{to} + F_{po}) \cdot V \tag{3}$$

gdzie: P_k – moc przekazywana na koło [W],
V – prędkość pojazdu [km/h].

Przy założonej sprawności silnika elektrycznego na poziomie 70% oszacowano jego minimalną moc na 418,63W na podstawie wzoru nr 4. Po analizie rynku wybrano silnik prądu stałego 48V o mocy 550W.

$$Ps = \frac{P_k}{\eta_s} \tag{4}$$

gdzie: P_s – moc silnika [W],
η_s – sprawność silnika.

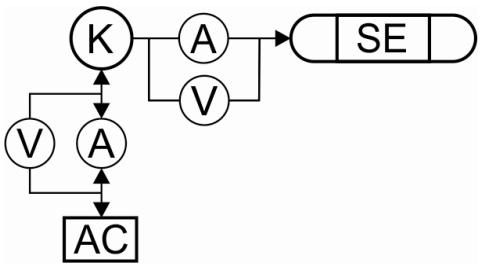
Zakładając, że pojazd pracował będzie w większości czasu na maksymalnej mocy 550W oraz czas ciągłej pracy wyniesie 30 minut obliczono, że prąd pobierany przez silnik wyniesie I=11,46A. Uwzględniając częste postoje oraz starty pojazdu podczas których chwilowa moc silnika wynosi 900W oszacowano prąd pobierany na poziomie 15,1A. Dla założonych parametrów obliczono wymaganą pojemność akumulatorów na poziomie 15,1Ah. Obliczono, że przy wykorzystaniu 4 akumulatorów o pojemności 17Ah i napięciu 12V połączonych równolegle oraz silnika o mocy 550W czas ciągłej pracy powinien wynieść około 88 minut.

W celu poprawnego i skutecznego działania sytemu zastosowano kontroler ładowania akumulatorów dostosowany do w/w parametrów sytemu, posiadający wbudowany algorytm MPPT.

3.4. Badania nad pojazdem

Badany pojazd nie posiada homologacji dlatego nie może poruszać się w ruchu ulicznym. Z tej przyczyny testy przeprowadzono stacjonarnie z wykorzystaniem rolki rowerowej bez obciążenia. Badania przeprowadzono w zmiennych warunkach nasłonecznienia w dniu 18.04.2014. Celem badań było wyznaczenie maksymalnego czasu pracy przy braku produkcji fotoprądu (z akumulatorami w pełni naładowanymi) oraz z ciągłym udziałem prądu z paneli fotowoltaicznych. Drugim celem badania było oszacowanie rzeczywistego zużycia prądu elektrycznego na potrzeby przemieszczania się HEV ze stałą prędkością.

Z użyciem czterech multimetrów elektronicznych zbadano wartości napięcia oraz natężenia prądu przepływającego między akumulatorami a kontrolerem ładowania oraz między kontrolerem ładowania a odbiornikiem (w tym przypadku układem napędowym). Podłączenie elementów pomiarowych zobrazowano na ilustracji nr 4. Symbolem (A) zaprezentowano amperomierz natomiast symbol (V) obrazuje Woltomierz. Wartości prądu mierzone za pomocą w/w urządzeń rejestrowano w interwale 15 sekundowym. Ilustracja nr 5 przedstawia moc przekazywaną pomiędzy akumulatorami a kontrolerem ładowania oraz między kontrolerem ładowania a układem napędowym bez wykorzystania fotoprądu. Te same parametry z wykorzystaniem fotoprądu zobrazowano na ilustracji nr 6.



Rys. 4. Schemat podłączeń urządzeń pomiarowych

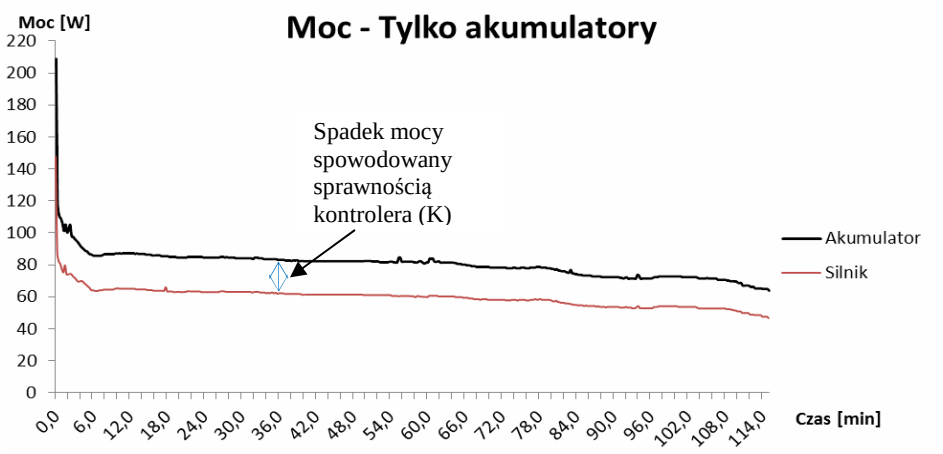
Fig. 4. Connection diagram of the measuring equipment

Efektywny (bez spadku mocy pozwalającej na poruszanie się pojazdu) pomierzony czas pracy pojazdu bez użycia systemu fotowoltaicznego wyniósł około 2 godzin. Badanie zakończone zostało w punkcie w którym pojazd nie był w stanie poruszać się „samodzielnie”. Wykorzystanie systemu PV miało znaczący wpływ na czas pracy pojazdu. Badanie zostało zakończone po upływie 120 minut, jednak po tym czasie pojazd nadal był w stanie pracować „samodzielnie”.

Zauważono również, że system sterowania przepływem energii (K) charakteryzuje się sprawnością około 74% o czym świadczy strata średnio 26 % prądu przepływającego między akumulatorami a odbiornikiem.

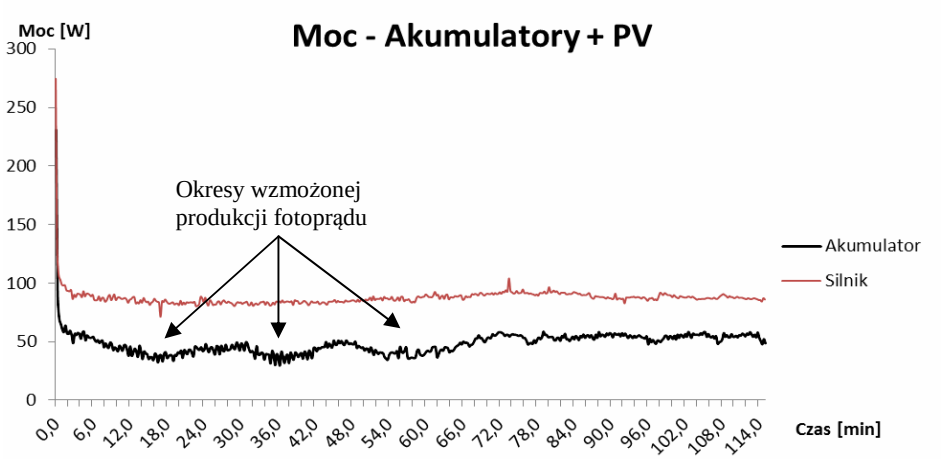
Przy pracy zasilanej z samych akumulatorów pojazd nie był w stanie uzyskać maksymalnej prędkości 35 km/h. Podczas wykorzystania energii promieniowania słonecznego pojazd przez cały okres testów utrzymywał maksymalną prędkość 35 km/h.

Na podstawie rysunku nr 6 zaobserwowano, że w trakcie pracy pojazdu energia elektryczna na bieżąco uzupełniana jest energią pochodzącą z systemu PV. Wraz ze wzrostem energii promieniowania słonecznego maleje udział prądu zmagazynowanego w akumulatorach do napędzania pojazdu.



Rys. 5. Charakterystyka mocy prądu elektrycznego pomiędzy AC – K oraz K – SE, bez udziału PV

Fig. 5. The power curve of electric current between AC - K and K - E, without the participation of PV



Rys. 6. Charakterystyka mocy prądu elektrycznego pomiędzy AC – K oraz K – SE, z udziałem PV

Fig. 6. The power curve of electric current between AC - K and K - E, with the participation of PV

4. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że systemy fotowoltaiczne w transporcie drogowym mogą znaleźć zastosowanie przy projektowaniu pojazdów hybrydowych. W szczególności w przypadkach o których mowa w punkcie 1, czyli średni czas przejazdu oraz pokonywane odległości własnym środkiem transportu w aglomeracjach miejskich. Nie można zapominać również o rozsądnym zarządzaniu energią elektryczną w trakcie poruszania się oraz postoju (możliwość zmiany konta nachylenia paneli w stosunku do źródła promieniowania w celu skutecznego ładowania akumulatorów) [4].

Zgodnie z częścią obliczeniową projektu pojazd powinien poruszać się ze stałą prędkością i ze stałym obciążeniem prze około 88 minut. Obliczono również, że moc przekazywana na koło powinna wynieść 293W z uwzględnieniem oporów powietrza. Pojazd testowany był stacjonarnie (z wykorzystaniem rolki) dlatego można przyjąć, że moc potrzebna wynosi około połowę tj. 146W. Po uwzględnieniu sprawności silnika okazało się że moc pobierana przez silnik wyniesie 190W.

Testy wykazały, że pojazd pracował przez ponad 2 godziny a moc pobierana przez silnik średnio wyniosła 88W. Należy jednak zauważyć, że masa pojazdu podczas testów nie uwzględniała pasażera co znacznie zmniejszyło opory toczenia a tym samym wydłużyło czas pracy. Dlatego można stwierdzić że różnice pomiędzy obliczeniami a pomiarem okazały się znacząco rozbieżne.

Należy zwrócić również uwagę na sprawność stosowanych podzespołów budujących HEV. Stosowanie urządzeń o większej sprawności generować może większy koszt produkcji, co z kolei wpływa negatywnie na opłacalność stosowania systemów fotowoltaicznych. Z całą pewnością rozwój technologii w przyszłości pozwoli na bardziej powszechne wykorzystanie PV w pojazdach hybrydowych.

Literatura

[1] Arsie I., Rizzo G., Sorrentino M.: Optimal design and dynamic simulation of a hybrid solar vehicle, Department of Mechanical Engineering, University of Salerno, 2006.

[2] Arsie I., Di Martino R., Rizzo G, Sorrentino M.: Toward a supervisory control of a hybrid solar vehicle, Department of Mechanical Engineering, University of Salerno, 2007.

[3] Daniels W. M., Kumar P. R.: Racing with the sun: The optimal use of the solar power automobile, 1997.

[4] Jastrzębska G.: Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2009.

[5] Ozawa H., Nishikawa S., Higashida D.:Development of aerodynamics for a solar race car, JSAE Review 19, s. 343-349, 1998.

[6] Rizzo G., Arsie I., Sorrentino M.: Solar energy for cars: perspectives, opportunities and problems, Department of Mechanical Engineering, University of Salerno, 2010.

[7] Transport Statistics Great Britain: www.gov.uk/government/collections/transport-statistics-great-britain, 2007.

HYBRID VEHICLES AND PHOTOVOLTAIC SYSTEMS - POSSIBILITY OF USE (PROJECT OZI)

S u m m a r y

The paper presents the subject of hybrid vehicles with photovoltaic systems as one of the sources of energy required to operate the system. Describes the basic solutions used in vehicles and describes principle of the each component. The main topic is the design of a hybrid vehicle (OZI) which was made by the students of the Academy of Science and Technology in Krakow. Presents the methodology used in the calculation for vehicle components. The article describes the calculation of rolling resistance, air resistance, and the engine power required to overcome these resistances. Authors matched batteries with the necessary capacity and photovoltaic panels with adequate power. The text describes the most often used constructional solutions for solar hybrid vehicle, but it also shows solutions used in OZI project. Text describes studies that have been conducted over OZI vehicle. The tests describes power flow of an electric current flowing between the battery and charging controller, charger controller and the motor. Studies were carried out without the generation of photocurrent, and with the photocurrent produced by the photovoltaic effect. Authors used electronic multimeters for studies the power flow with 15 seconds reading interval. Additionally the maximum time of continuous operation of the vehicle has been determined. In order to estimate the practical benefits and an indication of the target group of users authors relied on the report of the organization Transport Statistics Great Britain in 2007.

Keywords: Solar energy, rolling resistance, air resistance, transport

Przesłano do redakcji: 17.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.50

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 207-220

Radosław KRZEMIŃSKI [1]
Wojciech TERLIKOWSKI [2]

KASZYCE DREWNIANE - HISTORYCZNYM ELEMENTEM REWITALIZACJI ZABYTKÓW

Kaszyce jako masywne mury oporowe stosowane są od ok. VIII wieku do umacniania skarp i zboczy, brzegów rzek, potoków i osuwisk, zapewniając stateczność stromym brzegom oraz chroniąc ich podstawę przed rozmyciem. Przestrzenna struktura konstrukcji wypełniona materiałem przepuszczalnym znakomicie wpisuje się w wymagania stawiane konstrukcji gdzie problemem staje się parcie hydrostatyczne, osiadanie a także hałas i estetyka. Konstrukcja kaszyc posiada dużą odkształcalność i wpływa to znacząco na odporność na nierównomierne osiadanie. Nawet kilkudziesięciocentymetrowe różnice osiadań nie powodują uszkodzeń konstrukcji oporowej. Zaletą takiej cechy jest możliwość posadawiania kaszyc w strefie przemarzania gruntów. Dodatkowo istnieje możliwość obsadzenia takiej konstrukcji oporowej roślinnością pnącą potęguje pozytywny efekt estetyczny oraz podkreśla walory historyczne kompleksu zabytkowego. Wytyczne konserwatorskie stawiają za jeden z głównych celi wpisywanie się konstrukcji wzmacniającej w historyczny wygląd otoczenia zabytku a przede wszystkim nie pogarszał jego walorów estetycznych. Przykładem takiego obiektu budowlanego są ruiny zamku na wzgórzu zamkowym w Sochaczewie. W roku 2013 wykonano wzmocnienie wzgórza zamkowego poprzez wykorzystanie gwoździ gruntowych, masywnej ściany oporowej w konstrukcji kaszycowej oraz nasypów zbrojonych geosyntetykami. Efektem końcowym zabezpieczenia wzgórza zamkowego konstrukcją kaszycy jest powstanie drewnianej skrzynia wypełnionej kruszywem mineralnym. Geometria masywnej konstrukcji oporowej to kaszyca o długość 79,8 m i szerokości 1,65 m zaś nachylenie ściany oporowej to przepisowe 4:1. Kaszycę posadowiono na żelbetowym fundamencie bezpośrednim. W artykule przedstawiono zabezpieczenie nasypu budowlanego przy wykorzystaniu drewnianej konstrukcji kaszyc jako masywnej ściany oporowej.

Słowa kluczowe: masywny mur oporowy, ściana oporowa, kaszyca, konstrukcja kaszycowa, zabytek, wzmocnienie skarp, wzmocnienie osuwisk

[1] Autor do korespondencji: Radosław Krzemiński; Politechnika Warszawska Wydział Inżynierii Lądowej, Ove Arup & Partners Int. Ltd Sp. z o.o.; Al.Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; telefon: 607-780-316; email: radek.krzem@interia.pl.
[2] Wojciech Terlikowski; Politechnika Warszawska Wydział Inżynierii Lądowej, Al.Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa; telefon: 602-630-513; email: w.terlikowski@il.pw.edu.pl.

1. Wstęp

1.1. Mury oporowe

Norma PN-83/B-03010 [1] definiuje ściany oporowe jako budowle, które utrzymują w stanie statycznym uskok naziomu gruntów rodzimych oraz gruntów nasypowych, a także innych materiałów rozdrobnionych, sypkich takich jak: kruszywo, węgiel, żużel itp. Generalnie mury oporowe wymiennie nazywane ścianami oporowymi utrzymują w stanie statycznej równowagi uskoki naziomów materiałów, które charakteryzują się parametrami geotechnicznymi takimi jak: gęstość $\gamma\,[kN/m^3]$, kąt tarcia wewnętrznego $\Phi\,[^0]$, spójność $c[kPa]$, moduł odkształcenia pierwotnego E_0 $[MPa]$ czy współczynnik odkształcenia bocznego (współczynnik Poissona) ν.

Mury oporowe stosuje się do budowy: przyczółków kolejowych i mostowych, nabrzeży zbiorników wodnych i składów materiałów sypkich, ścian śluz, oraz do zabezpieczenia stateczności skarp i stoków.

Ściany oporowe ze względu na ich konstrukcję można podzielić na masywne (ciężkie) i lekkie (kątowe).

Ze względu zaś na materiał użyty do wykonania konstrukcji ścian oporowych dzielimy je na ściany: żelbetowe (prefabrykowane i wylewane na mokro na budowie), kamienne, murowane, stalowe, drewniane i syntetyczne (geosyntetyki użyte do budowy zabezpieczenia skarpy).

Podział ścian oporowych ze względu na rodzaj pracy konstrukcji [3] rozróżnić można następujące typy:

a) ściany masywne,
b) ściany masywne ze wspornikowymi płytami odciążającymi,
c) ściany płytowo-kątowe,
d) ściany płytowo-żebrowe,
e) ściany specjalne, np. palisadowe (wspornikowe).

Masywne mury oporowe są to ściany o dużej szerokości przekroju poprzecznego, przeciwstawiające się parciu gruntu czy innego materiału swoim ciężarem i tarciem podstawy o podłoże. Stateczność masywnych ścian oporowych zapewnia ich ciężar własny

Masywne mury oporowe wykonuje się z kamienia, pustaków betonowych i cegły oraz wylewane z betonu. Czasami, gdy jest wysoka ściana muru silnie obciążona parciem gruntu, konieczne jest zastosowanie wspornika lub jednej, a nawet więcej płyt odciążających. W ten sposób zmniejsza się niezbędny ciężar ściany oporowej. Płyta wspornika, obciążona gruntem wywołuje dodatkową siłę skupioną i odwrotnie skierowany moment zginający w ścianie, powiększając naprężenia ściskające na krawędzi od strony gruntu. Płyta odciążająca zwiększa jednocześnie stateczność muru.

Obliczanie statyczno-wytrzymałościowe masywnych ścian oporowych nie jest skomplikowane, albowiem schematy obliczeniowe są proste zaś wzory obliczeniowe parć materiału gruntowego na ścianę, są powszechnie znane.

Celem samym w sobie w czasie fazy projektowania, kiedy wymagane jest znacznie zaangażowania projektanta, jest prawidłowe i odpowiednie ukształtowanie geometrii ściany oraz jej posadowienia tj. fundamentu. Szczególną uwagę należy zwrócić na dobór pochylenia ściany a zwłaszcza jej powierzchni podstawy. Przyczynia się to znaczącego zredukowania składowej stycznej do wypadkowej podstawy obliczeniowych obciążeń w poziomie posadowienia. Pozwala to na spełnienie warunku stanu granicznego na przesuw oraz na wypieranie gruntu spod podstawy fundamentu ściany oporowej. Pochylenie konstrukcji ściany oporowej zwłaszcza jej tylnej ściany (tj. tej łączącej się z gruntem), zmniejszając tym samym parcie gruntu oszczędza zużycie materiału na poziomie około 25%. Jednak nie można przesadzić, gdyż zbyt duże pochylenie masywnej ściany oporowej, doprowadzić może do utraty stateczności konstrukcji ściany przed zasypaniem jej gruntem. Konieczne jest wówczas prowadzenie równoczesnych prac wznoszących ścianę oraz jej zasypywanie.

2. Kaszyce

2.1 Historia kaszyc

Kaszyce są masywnymi murami oporowymi o przestrzennej strukturze konstrukcji. Rozpoczęto ich używanie od ok. VIII wieku do zabezpieczania brzegów rzek, potoków i osuwisk, a także skarp oraz zboczy. Zapewniano tym samym stateczność stromym brzegom i chroniono ich podstawy przed rozmyciem. Szczególnie kaszycowe konstrukcje wykorzystywano zwłaszcza na tych odcinkach cieków, gdzie brzeg był niestateczny z uwagi na jego pionowość. Kaszycowe ściany oporowe były zwłaszcza rekomendowane na tych odcinkach cieków wodnych, gdzie na brzegach narażonych na podcinanie posadowione były obiekty budowlane oraz nasadzenia drzew. Stwarzało to wysokie ryzyko utraty stateczności konstrukcji budowli. Obecnie również jest to jeden z powodów, gdzie spotyka się takie właśnie wykorzystanie kaszyc. Kaszyce stosowane są również, jako podpory mostów. Często stopnie wodne (zwane progami lub stopniami kaszycowymi) przy melioracji i retencjonowaniu cieków wodnych lub rzek wykonywane są w technologii kaszycowej. Badania archeologiczne pokazują, że od momentu pojawienia się w inżynierii rozwiązań kaszycowych były to konstrukcje drewniano-kamienne. Na początku używano bali drewnianych lub kłód zaś współcześnie konstrukcje kaszyc wykonywane są z żelbetowych elementów prętowych zaś rzadziej z drewnianych czy też stalowych.

Konstrukcje masywnych murów oporowych, jako kaszyc używano bardzo często jeszcze w XX w, zaś obecnie niestety zmalało zainteresowanie taką kon-

strukcją mimo jej wielu zalet o czy w dalszej części niniejszego dokumentu autorzy będą przekonywać. W minionym wieku bardzo często stosowano kaszyce do konstruowania podpór mostów drewnianych [10]. Szczególnie znajdowały zastosowanie w warunkach, w których nie można było wbić pali w dno rzeki. Biorąc równocześnie pod uwagę dużą głębokość wody oraz rozmycie dna bardzo dobrym rozwiązaniem były filary kaszycowe. Kształt takiej konstrukcji był skrzynią prostopadłościenną (lub w rzucie wielobocznąą), wykonaną z drewna, a wnętrze jej wypełniane było kamieniami.

Przestrzenna struktura konstrukcji kaszyc wypełniana była i jest obecnie najczęściej materiałem kamiennym, kruszywem lub gruzem (współcześnie z rozbiórek konstrukcji żelbetowych, jako materiał ekonomicznie uzasadniony do użycia) a pierwotnie gruntem i kamieniami.

2.2 Konstrukcja kaszyc

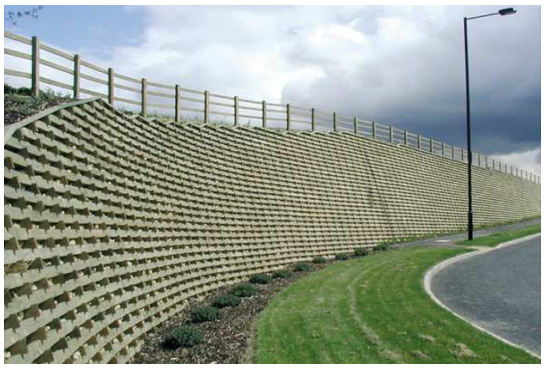
Historycznie rozpoczęto wykonywanie kaszyc z elementów drewnianych – bali jak wspomniano powyżej. Do wykonania przestrzennej drewnianej konstrukcji kaszyc konieczne jest stosowanie drewno odpornego na butwienie. Stąd rekomendowane jest wykorzystanie pni gatunków twardych drzew. Średnica Typową średnicą drewnianych bali jest wielkość ok. 15 cm, a dla wysokich konstrukcji kaszycowych średnica oczywiście jest nieco większa. Natomiast współczesne realizacje pokazują wykonywanie konstrukcji kaszyc z różnych materiałów takich jak przedstawiono na zdjęciach poniżej.

Jednym z pierwszych zastosowań w kraju kaszyc żelbetowych było wykonanie z nich tymczasowej grodzy dla potrzeb budowy zapory w Solinie [5].



Rys. 1. Przykład ściany kaszycowej z bali drewnianych

Fig. 1. Example of crib retaining wall with wooden logs



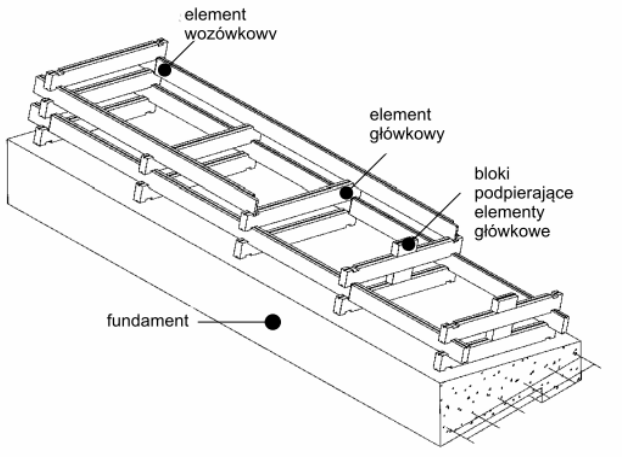
Rys. 2. Przykład kaszycy z drewnianych elementów
Fig. 2. Example of timber crib retaining wall



Rys. 3. Przykład kaszycy wykonanej z prefabrykatów
Fig. 3. Example of timber crib wall



Rys. 4. Przykład ściany kaszycowej ze stalowych profili
Fig. 4. Example of crib retaining wall with steel profiles



Rys. 5. Przykład ściany kaszycowej firmy Phi Group Ltd, na podstawie [6]

Fig. 5. Example of crib wall by Phi Group Ltd company, based on [6]

Przykładem współczesnej kaszycy drewnianej jest PERMACRIB z elementów dostarczanych przez brytyjską firmę Phi Group Ltd [6]. Przygotowane drewniane elementy kaszycy ciśnieniowo są nasycone ochronnym środkiem CCA, w celu całkowitego wypełnienia nim komórek drewna, aby zabezpieczyć go przed owadami i grzybami. Taka technologia przygotowania pozwala zapewnić przydatność użytkową kaszycy nawet ponad 125 lat. Firma Phi Group Ltd. udziela gwarancję na konstrukcję nawet na 60 lat.

Konstrukcja kaszyca wykonywana jest z prefabrykowanych elementów drewnianych: poprzecznych (elementy główkowe) i podłużnych (elementy wozówkowe). Przy końcach elementów poprzecznych (główki) znajdują się nacięcia o szerokości równej szerokości elementu podłużnego. Nacięcia te służą do wykonania połączeń ciesielskich elementów poprzecznych z podłużnymi. Wznoszenie ściany polega na naprzemiennym układaniu elementów poprzecznych i podłużnych wraz z sukcesywnym wypełnianiem kaszycy materiałem zasypowym. W efekcie powstaje drewniana skrzynia wypełniona kruszywem mineralnym.

Elementy wozówkowe mają kształt belek o przekrojach kwadratowych lub prostokątnych, elementy główkowe posiadają podobny kształt, jednakże na ich końcach uformowane są zaczepy, które przejmują siły rozpierające ścianę oporową. Szerokość elementów podłużnych przyjmuje się z warunku [5]:

$$bA \geq 2\,hB \tag{1}$$

gdzie: bA – szerokość prefabrykatu A,

hB – wysokość przekroju prefabrykatu główkowego wyznaczająca światło pionowe między sąsiednimi prefabrykatami podłużnymi; zaleca się mniejszą niż 20 cm.

Zachowanie tego warunku pozwala na to, że wypełniający kaszycę suchy grunt nie wysypuje się przez otwory między prefabrykatami podłużnymi.

Wnętrze kaszycy jest wypełniane kamieniami, tłuczniem, pospółką lub innym gruntem przepuszczalnym. Materiał wypełniający powinien być dobrze zagęszczony. Dopiero potem zasypuje się konstrukcję oporową. Orientacyjnie przyjmuje się szerokość kaszycy na podstawie poniższego wzoru:

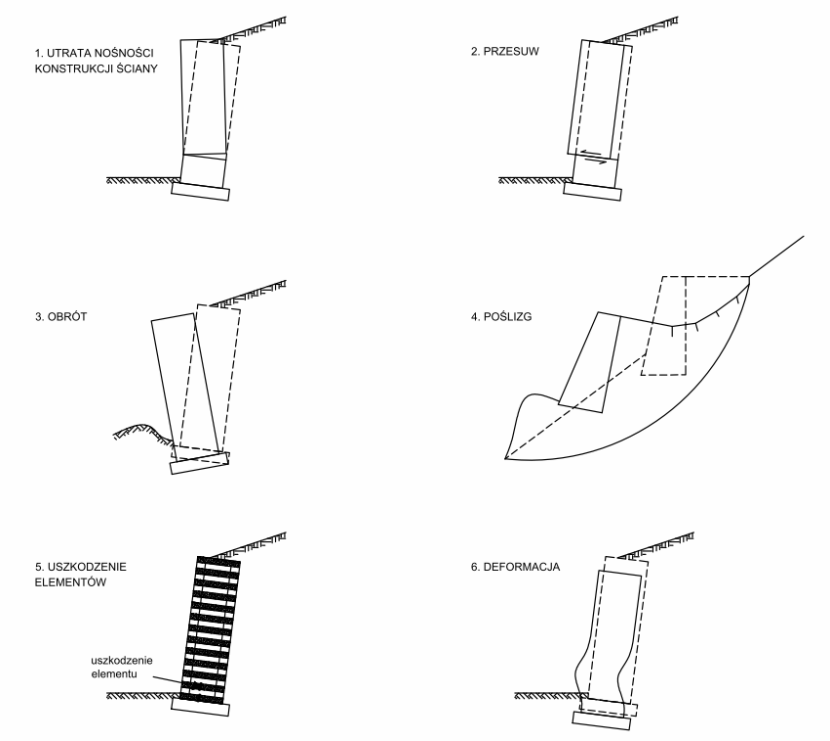
$$bk = (0{,}4\ h – 1{,}0)\ h \tag{2}$$

gdzie: h – jest jej wysokością.

Stateczność kaszycy sprawdza się tak, jak oblicza się inne typy masywnych ścian oporowych. Średnią gęstość wypełnionej kaszycy można przyjmować na poziomie 1600 kg/m^3. W celu zwiększenia stateczności konstrukcji kaszycy realizowane jest jej pochylenie w stronę zasypu, najczęściej w zakresie do 5:1.

Konstrukcja kaszyc posiada dużą odkształcalność i wpływa to znacząco na odporność na nierównomierne osiadanie. Nawet kilkudziesięciocentymetrowe różnice osiadań nie powodują uszkodzeń konstrukcji oporowej. Zaletą takiej cechy jest możliwość posadawiania kaszyc w strefie przemarzania gruntów. Zaleca się jednak zagłębienie konstrukcji kaszycy w grunt do około 60 cm. Należy pamiętać, aby w kaszycy i w jej sąsiedztwie nie tworzyły się zastoiska wody, które osłabiają materiał drewnianej kaszycy. Przeciwdziałaniem i ochroną jest wypełnienie materiałem o małej przepuszczalności wody (np. gliną) wnętrza kaszycy oraz otaczającego ją wykopu do poziomu terenu. W wypadku, gdy nośność gruntu nie pozwala na przeniesienie obciążenia konstrukcji oporowej bez znacznych osiadań, wówczas układa się na gruncie kilka elementów podłużnych kaszycy i na nich montuje kaszycę. W sytuacji, gdy zabieg ten nie jest wystarczający, konstrukcję kaszycy opiera się na płycie fundamentowej betonowej lub żelbetowej. Konieczność taka zachodzi w przypadku budowy wysokich konstrukcji oporowych. Należy jednak zaznaczyć, że w razie stosowania kaszyc, jako trwałych konstrukcji oporowych, jest wskazane oparcie ich na około 50-centymetrowej warstwie betonu lub gruntu stabilizowanego również, gdy mają nieznaczną wysokość. Warstwa taka pozwala wyrównać osiadania kaszyc.

Nośność kaszyc sprawdzana jest tak jak dla typowych masywnych murów oporowych oraz uwzględnia się dodatkowe charakterystyczne dla tego typu konstrukcji elementy. Stąd stany graniczne nośności konstrukcji kaszyc rozpatrywane powinny być dla przywołanych przypadków zniszczenia konstrukcji (Rys. 6).



Rys. 6. Stany graniczne zniszczenia kaszycy na podstawie [4]

Fig. 6. Limit modes of crib retaining wall failure based on [4]

Zaletami konstrukcji kaszycowej są również następujące cechy:

a) prefabrykowanie elementów konstrukcji,
b) dobre odwodnienie zasypki - brak parcia hydrostatycznego,
c) zróżnicowana wysokość konstrukcji – łatwość montażu,
d) waga elementów; prostota montażu (3 m^2/osobogodz),
e) montaż nie wymaga wykwalifikowanej kadry robotniczej oraz specjalnego osprzętu i maszyn,
f) tłumienie hałasu,
g) walory estetyczne i proekologiczne - mogą być porośnięte pnączami lub kwiatami.

Jest znamienne, że w krajach zachodnich wśród argumentów uzasadniających użycie kaszyc wymienia się na pierwszym miejscu estetyczność tej odmiany konstrukcji oporowych. Taka opinia może wzbudzać zdziwienie, jednakże jest faktem częste stosowanie tam kaszyc przy autostradach i w miejscach eksponowanych widokowo. Porośnięte zielenią kaszyce harmonizują w sposób naturalny z otaczającym terenem, czego na ogół nie można powiedzieć np. o betonowych ścianach oporowych, które z czasem pokrywają się rysami skurczowymi i uszkodzeniami korozyjnymi oszpecającymi budowle.

2.3 Konstrukcja kaszyc a zabytki

Konstrukcja kaszyc znakomicie nadaje się do zabezpieczania skarp, osuwisk, miejsc gdzie występują obiekty podlegające ochronie konserwatorskiej. Znakomicie współgrają nawet z zabytkami znajdującymi się w stanie „trwałej ruiny". Współpraca projektanta z konserwatorem zabytków jest nieodzowna i należy pamiętać, aby przed podjęciem działań konserwatorskich i budowlanych (w tym remontowych), konieczne była wykonana dokładna diagnostyka obiektu historycznego [7][8]. Przykładem zabytkowego obiektu budowlanego, przy którym zastosowano konstrukcję kaszyc są ruiny zamku w Sochaczewie. W zabezpieczeniu wzgórza zamkowego, na którym znajdował się zamek, wykorzystano drewniane kaszyce.

Historia wzgórza zamkowego w Sochaczewie [9] jest barwna, sięga początkiem XIII wieku, kiedy to książę Konrad I Mazowiecki wzniósł drewniano-ziemną warownię Piastów Mazowieckich. Zamek w ciągu swoich dziejów był rozbudowywany, burzony, odbudowywany fragmentarycznie, zaś w 1794 roku, podczas insurekcji kościuszkowskiej, został ostatecznie zniszczony. Od tego momentu pozostawał w ruinie i niszczał. Także wzgórze będące właściwie nasypem ziemnym podlegało wielokrotnym reprofilacjom i wzmocnieniom, wynikającym z jego niestateczności i degradacji. Główną czynnikami destrukcyjnymi dla wzgórza były oddziaływania klimatyczne i środowiskowe, a szczególnie opady deszczu, powodujące erozję powierzchniową i wgłębną. Dopiero w roku 2013 wykonano wzmocnienie wzgórza zamkowego poprzez wykorzystanie gwoździ gruntowych, ściany oporowej w konstrukcji kaszycowej oraz nasypów zbrojonych geosyntetykami.

Na podstawie badań geotechnicznych i archiwalnych badań archeologicznych ustalono, że wzgórze zamkowe zbudowane jest z nasypów piaszczystych (piaski i piaski pylaste) o różnej miąższości, od 1,6 do 7,5 m, zaś podłoże naturalne stanowią piaski gliniaste, gliny piaszczyste oraz lokalnie piaski pylaste.

Swobodne zwierciadło wody gruntowej zostało nawiercono na głębokości odpowiednio 1,5 m (skarpa północna), na głębokości 2,0 m p.p.t. (skarpa zachodnia) i u podstawy wzgórza, od strony północnej i zachodniej.

Nasypy na skarpie północnej, zachodniej oraz w południowo – wschodnim narożniku wzgórza zazbrojono geosyntetykami, jako zabezpieczenie przeciwerozyjne.

Na skarpie zachodniej dobudowano nasyp zbrojonego geosyntetykami na całej wysokości skarpy. Posadowienie nasypu zbrojonego wykonano na palach żelbetowych CFA, ze względu na występowanie gruntów słabych w podstawie skarpy.

W narożniku południowo-wschodnim, w celu zwiększenia odległości pomiędzy murami zamku a pierwotną skarpą wzgórza, zaprojektowano obudowanie narożnika nasypem z gruntu zbrojonego. Nasyp zbrojony wykonano zgodnie z projektem o nachyleniu 1:1,5 i wysokości 8,5 m.



Rys. 7. Widok ściany oporowej kaszycowej i ruin zamku w Sochaczewie
Fig. 7. View of crib retaining wall and castle of ruins in Sochaczew

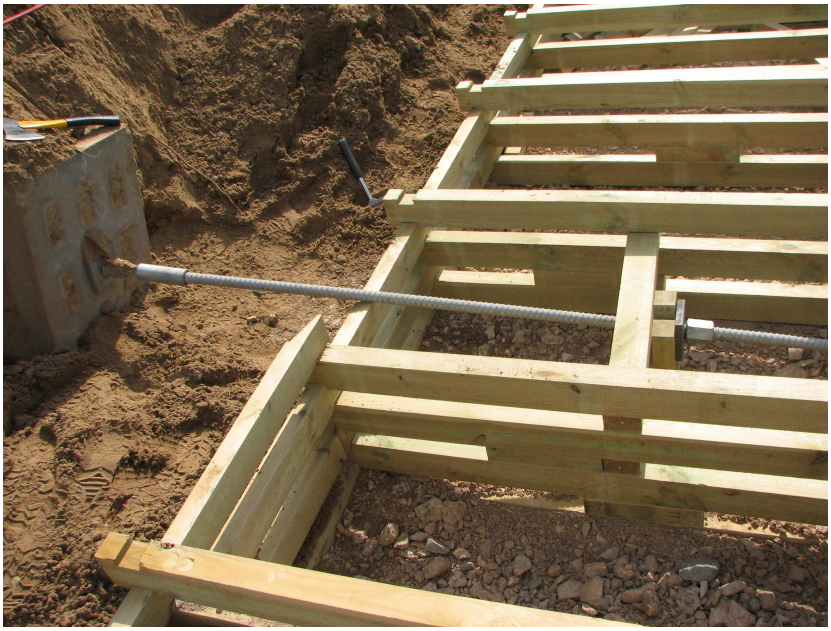
Ograniczenia przestrzenne po północnej stronie wzgórza (brak możliwości zajęcia sąsiednich działek oraz występowanie miejskiego kolektora kanalizacyjnego), u podstawy skarpy północnej wykonano ścianę kaszycową użycie, której uzgodnił projektant z konserwatorem zabytków. Ściana oporowa o zmiennej wysokości, utrzymując uskok naziomu od 0,8 do 7,0 m. Niestety ze względu na niedostateczną stateczność ogólną skarpy północnej, przed przystąpieniem do wznoszenia konstrukcji kaszycy wykonano wzmocnienie poprzez wykonanie gwoździ gruntowych. Zainstalowano gwoździe o nachyleniu 10° do poziomu, w rozstawie 1,5 m w poziomie na 1,5 m w pionie. Gwoździ gruntowych tymczasowo wzmacniały skarpę przed wykonaniem ściany oporowej oraz dodatkowo docelowo kotwią kaszycę w gruncie rodzimym. Zabieg taki był możliwy po uprzednim wydłużeniu zainstalowanych w skarpie gwoździ i połączeniu ich z konstrukcją drewnianej kaszycy. Na powierzchni gwoździowanej istniejącej skarpy, pod głowicami gwoździ, ułożono płyty drogowe typu IOMB, w celu rozdystrybuowania naprężeń pochodzących z poszczególnych gwoździ na powierzchnię skarpy. Od korony ściany oporowej do rzędnej 90,5 m npm wykonano nasyp zbrojony geosyntetykami, w postaci geotkanin poliestrowych. Powyżej zbrojonego nasypu wykonano nasyp niezbrojony, o nachyleniu 1:2,5.

Ścianę kaszycową wznoszono z prefabrykowanych elementów drewnianych. Przy końcach elementów poprzecznych znajdują się nacięcia o szerokości równej szerokości elementu podłużnego. Nacięcia te służą do wykonania połączeń ciesielskich elementów poprzecznych z podłużnymi. Wznoszenie ściany

polegało na naprzemiennym układaniu elementów poprzecznych i podłużnych wraz z sukcesywnym wypełnianiem kaszycy materiałem zasypowym, jak pokazano na zdjęciu poniżej (Rys 8).

Efekt końcowy to powstanie drewnianej skrzynia wypełnionej kruszywem mineralnym. Długość powstałej konstrukcji kaszycy wynosi 79,8 m przy szerokości 1,65 m zaś nachylenie ściany oporowej to przepisowe 4:1. Kaszycę posadowiono na żelbetowym fundamencie bezpośrednim. Za podstawą ściany ułożono rury drenarskiej w obsypce żwirowej, w osłonie z geowłókniny filtracyjnej. Dren ma za zadanie odprowadzać wodę gruntowej z zasypu niespoistego, znajdującego się w przestrzeni pomiędzy ścianą oporową a powierzchnią istniejącej skarpy. Powyżej masywnej ściany oporowej wykonano nasyp zbrojony o nachyleniu 1:1.

Stateczność kaszycy analizowano poprzez założenie zastępczej bryły gruntu spoistego, zakotwionego w masywie skarpy wzgórza, za pomocą przedłużonych gwoździ gruntowych. W przyjętym modelu obliczeniowym oporowa ściana kaszycowa stanowi, zatem jedynie oblicowanie dla skarpy, zbrojonej gwoździami gruntowymi. Stateczność konstrukcji kaszycy sprawdzono poprzez analizę



Rys. 8. Widok ściany oporowej kaszycowej, płyt oporowych IOMB, połączenia gwoździ gruntowych z konstrukcją kaszycy, oraz montażowe nacięcia w drewnianych elementach kaszycy oraz materiał zasypowy

Fig. 8. View of crib retaining wall, retaining plates IOMB, the connection of crib wall with extended soil nails, mounting notches in timber elements and the filling material



Rys. 9. Widok ściany oporowej kaszycowej i ruin zamku w Sochaczewie

Fig. 9. View of crib retaining wall and castle of ruins in Sochaczew

kołowych oraz łamanych powierzchni poślizgu. Do analizy przyjmowano zarówno wymuszone powierzchnie poślizgu w podstawie ściany oraz na połączeniu ze skarpą istniejącą, a także zoptymalizowane powierzchnie poślizgu, o najniższym możliwym współczynniku stateczności. Przeprowadzone obliczenia pokazały minimalny osiągnięty współczynniki stateczności o wartości $F > 1{,}5$. Stateczność ściany kaszycowej zapewniona jest dzięki ciężarowi ściany przeciwdziałającemu siłom wywracającym a przede wszystkim dzięki zakotwieniu ściany w masywie wzgórza za pomocą gwoździ gruntowych.

Kaszyce wypełniono kruszywem łamanym o odpowiednim uziarnieniu [9], zaś ścieralność kruszywa nie większą niż 50 oznaczono w bębnie Los Angeles [2]. Konstrukcję ściany oporowej wznoszono warstwami po trzy rzędy, przy założeniu, że jeden rząd tworzy komplet elementów podłużnych i poprzecznych. Po wzniesieniu trzech rzędów kaszycy, przestrzeń za konstrukcją ściany oporowej wypełniano gruntem zasypowym a następnie starannie zagęszczano do wymaganego wskaźnika zagęszczenia. Po wypełnieniu przestrzeni za ścianą, przystępowano do wypełnienia wnętrze kaszycy kruszywem i zagęszczono je. Ze wznoszeniem konstrukcji ściany oporowej układano równocześnie zbrojenie zasypu i łączono gwoździe gruntowe z kaszycą.

3. Podsumowanie

Konstrukcja kaszyc jest znana i sprawdzona w wielu różnorodnych realizacjach. Konstrukcja kaszyc są stabilne i łatwe do wykonywania, znakomicie dostosowując się do nierównomierności terenu. Z ekonomicznego punktu widzenia, biorąc pod uwagę koszt materiału, niewykwalifikowanej robocizny oraz czas wznoszenia, konstrukcja kaszyc plasuje się wysoko, jako oszczędny mur oporowy. Kaszyce drewniane ze względu na dużą możliwość odkształcania, znakomicie zastępują betonowe umocnienia brzegów płynących cieków wodnych. Wielowiekową historię konstrukcji kaszyc znakomicie podkreśla atut kaszyc przy zabezpieczaniu osuwisk i wzgórz w bezpośrednim sąsiedztwie obiektów budowlanych będących zabytkami podlegających ochronie konserwatorskiej. Możliwość obsadzenia takiej konstrukcji oporowej roślinnością pnącą potęguje pozytywny efekt estetyczny oraz podkreśla walory historyczne kompleksu zabytkowego. Przykład wzmocnienia wzgórza zamkowego w Sochaczewie za pomocą kaszycy drewnianej w ocenie autorów bardzo dobrze komponują się z zabytkiem. Potwierdza to także pozytywna opinia konserwatora zabytków, gdyż wyeksponowany obiekt zabytkowy nie jest przytłoczony elementem konstrukcyjnym, który obecnie, mimo że, jest widoczny w pełni docelowo będzie ukryty za roślinnością go porastającą.

Projektując konstrukcje kaszyc należy jednak pamiętać o społecznym czynniku. Uzgadniać go należy każdorazowo z administratorami terenu, gdzie powstać ma taka właśnie masywna ściana oporowa. Forma konstrukcji kaszyc znajdujących się w miejscu publicznym, może być zachętą do niebezpiecznych praktyk takich jak wspinaczka, co w konsekwencji może być źródłem wypadków. Wymusza oczywiście takie niebezpieczeństwo prowadzenie stałego monitoringu (wideo) konstrukcji a także odpowiednie oznakowanie tablicami informacyjnymi oraz ostrzegającymi terenu wokół kaszycy.

Literatura

[1] PN-83/B-03010 Ściany oporowe. Obliczenia statyczne i projektowanie. Warszawa, Wydawnictwo Normalizacyjne „ALFA”, 1983 (z późniejszymi zmianami).

[2] PN-B-06714-42:1979P: Kruszywa mineralne. Badania. Oznaczanie ścieralności w bębnie Los Angeles.

[3] Cios I., Garwacka-Piórkowska S.: Projektowanie fundamentów, Warszawa, Oficyna wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2003.

[4] Design Manual for Roads and Bridges. Volume 2: Highway structures: Design (substructures and special structures), Materials. Section 1: Substructures. Part 4. BA 68/97, Crib Retaining walls, February 1997.

[5] Jarominiak A.: Lekkie konstrukcje oporowe, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2000.

[6] Phi Group Ltd: Permacrib Retaining walls, materiały informacyjne, http://www.phigroup.co.uk/solutions/permacrib-timber-crib-retaining-walls, z dnia 06.2010.

[7] Terlikowski W.: Rola badań w procesie rewitalizacji budynków zabytkowych, Miesięcznik Materiały Budowlane 8'2013 (nr 493), Warszawa 2013.

[8] Terlikowski W.: Aspekty techniczne i inżynierskie konserwacji starożytnych konstrukcji murowych jako trwałej ruiny, Miesięcznik Materiały Budowlane 11'2013 (nr 496), Warszawa 2013.

[9] Terlikowski W., Krzemiński R.: Wykorzystanie kaszyc do wzmocnienia wzgórza zamkowego, Miesięcznik Materiały Budowlane 03'2014 (nr 499), Warszawa 2014.

[10] Thakaa Alkhafaji, Henryk Zobel, Mosty drewniane – konstrukcje przełomu XX i XXI wieku, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, 2006.

TIMBER CRIB RETAING WALLS HISTORIC ELEMENT OF REGENERATION FOR MONUMENTS

S u m m a r y

Timber crib retaining walls as massive retaining walls are used from about the VII century to the strengthening of embankments and slopes, riverbanks, streams and landslides, ensuring the stability of the steep shores and protecting their base against blur. 3D structure filled with permeable material fits perfectly in the design requirements where the problem becomes hydrostatic, settlement, noise and aesthetics. Crib walls structure has high formability and affects significantly the resistance to differential settlement. Even settlement about few centimeters differences doesn't damage the retaining structure. The advantage of such feature is the possibility of foundation crib walls at the level in freezing zone. It is also possible to fill the retaining structure with climbing vegetation which improves the positive effect of aesthetic and underlines the complex historical values. Conservation guidelines put one of the major issues typing a strengthening structure in the historic appearance of the surroundings of the monument and above all, do not worsen his aesthetic. An example of such a building is the ruins of a castle on the hilltop castle in Sochaczew. In 2013, has been made the stabilization of the castle hill using soil nails, a massive retaining wall and reinforced embankments with geosynthetics. The final result of strengthening the castle hill with timber crib retaining wall is the creation of a wooden box filled with mineral aggregate with length 79.8 m, 1.65 m width and 4:1 slope of the retaining wall. The article presents strenghtening embankment with a timber crib retaining wall.

Keywords: massive retaining wall, retaining wall, crib wall, crib retaining wall, monument, embankments strengthening, landslides strengthening

Przesłano do redakcji: 23.03.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.51

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 221-238

Sabina KSIĄŻEK[1]
Małgorzata KIDA[2]
Piotr KOSZELNIK[3]

WYSTĘPOWANIE PERFLUOROWANYCH ZWIĄZKÓW ORGANICZNYCH W ŚRODOWISKU I FIZYKOCHEMICZNE METODY USUWANIA ICH Z ROZTWORÓW WODNYCH

Praca zawiera przegląd literatury dotyczący właściwości i występowania perfluorowanych związków organicznych w różnych komponentach środowiska oraz możliwości usuwania ich z roztworów wodnych w procesach fizykochemicznych. Związki perfluorowane stosowane są jako składniki wielu przedmiotów codziennego użytku. Wykazują one dużą trwałość i odporność termiczną i chemiczną. Stabilność perflurowanych związków organicznych, która wynika z ich struktury chemicznej powoduje, że są one obecne we wszystkich elementach środowiska. Wykazano ich obecność w wodzie, ściekach, glebie, żywności i kurzu domowym, a nawet we krwi ludzkiej i zwierzęcej. Podejrzenia, że związki te wpływają niekorzystnie na zdrowie człowieka i ulegają kumulacji w organizmie spowodowało zapoczątkowanie poszukiwań skutecznych metod, które pozwolą na wyeliminowanie ich na etapie oczyszczania wody czy ścieków. Okazuje się, że stopień usuwania w przypadku zastosowania konwencjonalnych metod często jest niewystarczający i znaczna część tych związków wprowadzana jest do środowiska w niezmienionej formie albo w postaci bardziej toksycznych metabolitów. Procesy takie jak sorpcja, nanofiltracja czy odwrócona osmoza pomimo dobrej wydajności nie są wystarczające, ponieważ wymagają dalszych czynności w celu eliminacji wyodrębnionych związków. Dodatkowo właściwości perfluorowanych związków organicznych ograniczają ilość metod, które mogą być stosowane do ich eliminacji. Istnieje więc potrzeba opracowania nowych efektywnych sposobów ich usuwania oraz łączenia różnych technik w jednym procesie technologicznym.

Słowa kluczowe: mikrozanieczyszczenia, związki endokrynnie aktywne, perfluorowane związki (PFCs), fizykochemiczne metody usuwania związków organicznych

[1] Sabina Książek, Politechnika Rzeszowska, Katedra Inżynierii i Chemii Środowiska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, 35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 12, tel. + 48 (017) 743 2407, e-mail: sabina_ksiazek@outlook.com
[2] Małgorzata Kida, Politechnika Rzeszowska, Katedra Inżynierii i Chemii Środowiska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, 35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 12, tel. + 48 (017) 743 2407, e-mail: mkida@prz.edu.pl
[3] Autor do korespondencji: Piotr Koszelnik, Politechnika Rzeszowska, Katedra Inżynierii i Chemii Środowiska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, 35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 12, tel. + 48 (017) 865 1065, e-mail: pkoszel@prz.edu.pl

1. Wprowadzenie

Gwałtownemu rozwojowi cywilizacji, przemysłu oraz urbanizacji towarzyszy wzrost ryzyka skażenia środowiska. Zwiększa się emisja licznych grup substancji chemicznych do otoczenia, które bezpośrednio pogarszają jego stan [53]. Do jednej z takich grup należą związki perfluorowane (PFCs, ang. perfluorinated compounds). Ze względu na szeroki zakres stosowania materiałów, w skład których wchodzą te substancje, nieunikniony jest kontakt ludzi z tymi związkami, co sprawia, że narażenie na ich właściwości toksyczne jest duże. Substancje te wnikają do organizmu poprzez układ pokarmowy, oddechowy i skórę [71], nie ulegają metabolizmowi i kumulują się w organizmie [37, 70].

W konsekwencji tego, aktualne pozostają badania nad opracowaniem skutecznych metod oznaczania i usuwania perfluorowanych związków organicznych ze środowiska naturalnego.

Celem artykułu jest przedstawienie w oparciu o dostępną literaturę możliwości usuwania tych zanieczyszczeń przy zastosowaniu procesów fizykochemicznych.

2. Ogólna charakterystyka perfluorowanych związków organicznych

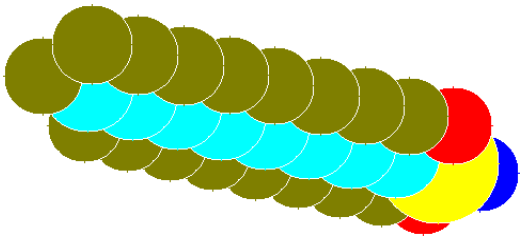
Perfluorowane związki organiczne nie występują w przyrodzie w sposób naturalny, wytwarzane są celowo [19]. Pierwsze z nich otrzymano w czasie II wojny światowej i były one składnikami materiałów służących do przechowywania fluorku uranu (VI) stosowanego w produkcji bomby atomowej [51]. Związki perfluorowane można uzyskać wykorzystując dwa podstawowe sposoby. Pierwszym jest elektrochemiczna fluoryzacja Simsona, natomiast druga metoda to telomeryzacja. Istnieje także możliwość otrzymywania perfluorowanych związków na drodze bezpośredniej fluoryzacji w fazie płynnej [20].

Związki perfluorowane to substancje charakteryzujące się pełnym podstawieniem w hydrofobowym łańcuchu węglowym atomów wodoru atomami fluoru [25]. Do tej grupy należą pochodne karboksylowe (np. kwas perfluorooktanowy), sulfoniany (np. perfluorooktanosulfonian), sulfonamidy (np. sulfonamid perfluorooktanu), a także estry, sole i fluorki [48].

Właściwości fizykochemiczne tych związków są bardzo zróżnicowane. Wynika to z występowania różnych grup funkcyjnych, które posiadają w swej strukturze. W budowie cząsteczki alifatycznego związku perfluorowanego można wyodrębnić hydrofobowy łańcuch węglowy oraz hydrofilową „główkę" (rys. 1). Dodatkowo ich specyficzna budowa (rys. 2) powoduje, że posiadają one właściwości powierzchniowo czynne [34]. Im dłuższy jest łańcuch węglowy, a co za tym idzie większa liczba wiązań węgiel–fluor i większe upakowanie tym lepsze są właściwości powierzchniowo czynne substancji [26]. Ponadto, perfluorowane związki organiczne mogą mieć łańcuch węglowy zarówno prosty, jak i rozgałęziony, co skutkuje możliwością występowania izomerów, które z kolei mogą znacznie różnić się niektórymi właściwościami [39].

hydrofobowy, fluorowany "ogon"	hydrofilowa "głowa"

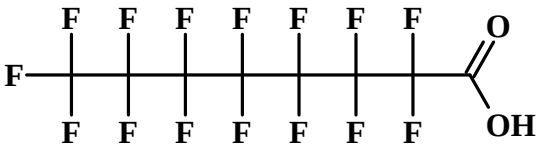
Rys. 1. Budowa alifatycznych związków perfluorowanych, na podstawie [34]
Fig. 1. Construction of aliphatic perfluorinated compounds,, based on [34]



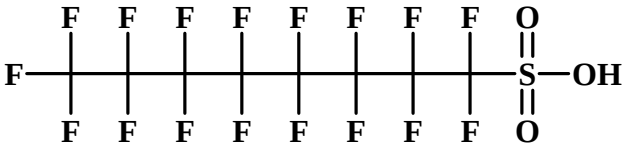
Rys. 2. Schemat budowy surfaktantu, na podstawie [35]
Fig. 2. Schematic structure of the surfactant, based on [35]

Wiązanie węgiel–fluor, które jest bardzo silnym wiązaniem kowalencyjnym powoduje, że związki perfluorowane są trwałe i odporne na degradację. Wspólną ich cechą jest stabilność w wysokich temperaturach i odporność na degradację chemiczną [71]. Część związków perfluorowanych charakteryzuje się dużą rozpuszczalnością w wodzie. Dla przykładu warto podać kwas perfluorooktanowy (PFOA, ang. perfluorooctanoic acid), którego rozpuszczalność wynosi 3400 mg/dm^3 [56]. Natomiast odnosząc się do wartości pKa (stała dysocjacji) dla związków perfluorowanych to są one niższe niż 3,5 i związki te występują w ściekach w postaci anionów przy wartości pH = 6,5-8,0 [11].

Głównym przedstawicielem związków perfluorowanych jest kwas perfluorooktanowy (rys. 3) i kwas perfluorooktanosulfonowy (PFOS, ang. perfluoroooctane sulfonic acid) (rys. 4). Roczna wielkość produkcji PFOS na świecie oszacowana została w 2000 roku na poziomie 3500 ton, natomiast PFOA 1200 ton w 2004 roku [59]. W wyniku tego, substancje te są szeroko rozpowszechnione w środowisku naturalnym i najczęściej identyfikowane w osadach dennych i ściekowych, wodach powierzchniowych, gruntowych, deszczu, oraz faunie i florze [16].



Rys. 3. Kwas perfluorooktanowy, na podstawie [20]
Fig. 3. Perfluorooctanoic acid, based on [20]



Rys. 4. Perfluorooktanosulfonian, na podstawie [20]

Fig. 4. Perfluorooctanesulfonic acid, based on [20]

3. Zastosowanie PFCs

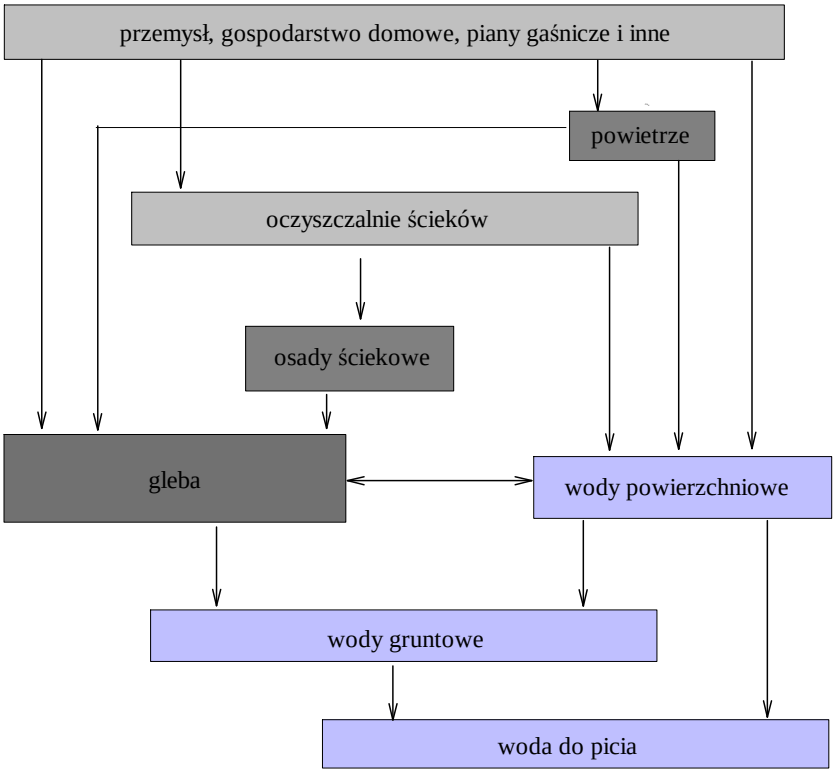
Związki perfluorowane wykorzystywane są w wielu dziedzinach przemysłu, w głównej mierze uwarunkowane jest to ich właściwościami, np. z powodu termostabilności mają zastosowanie tam, gdzie związki niezawierające fluoru mogłyby ulec degradacji [36]. Stosowane są przede wszystkim do produkcji przedmiotów codziennego użytku np. jako środki powierzchniowo czynne, impregnaty do dywanów, wykładzin, skór, do powlekania papieru, opakowań i tkanin, a także jako dodatki do pian gaśniczych, past, farb, lakierów [33] oraz do produkcji opakowań odpornych na tłuszcze, ponieważ nie wykazują powinowactwa względem nich [21]. Można je znaleźć w półprzewodnikach, płynach hydraulicznych oraz jako dodatki do pestycydów, katalizatorów chemicznych i nawozów sztucznych [60]. Należy również wspomnieć o stosowaniu PFCs w fotografii oraz w transformatorach [26]. Wzrastająca produkcja materiałów, w skład których wchodzą te substancje powoduje, że rośnie zagrożenie zanieczyszczeniem środowiska tymi związkami. Dodatkowo dobra rozpuszczalność w wodzie, hydrofilowe/hydrofobowe właściwości i niska lotność związków perfluorowanych zwiększa możliwość występowania ich we wszystkich środowiskach wodnych (wody gruntowe, powierzchniowe, do picia), w tym także w wodzie deszczowej [2].

4. Zagrożenia wynikające z obecności PFCs w środowisku

Perfluorowane mikrozanieczyszczenia dostają się do środowiska przede wszystkim wraz z odpadami, ściekami, ze stałymi, ciekłymi i gazowymi produktami. Nawet niewielkie zawartości tych związków stanowią istotny problem środowiskowy ze względu na ich właściwości toksyczne. Na rysunku 5 zostały przedstawione główne źródła i potencjalne ścieżki emisji perfluorowanych związków do różnych elementów środowiska naturalnego. Źródła te mogą być punktowe lub rozproszone, a zarówno jedne, jak i drugie mogą uwalniać znaczne ich ilości do otoczenia. Przykładem punktowego źródła emisji związków perfluorowanych może być np. użytkowanie pian gaśniczych [44], zrzut ścieków komunalnych i przemysłowych [4]. Badania Schultza wykazały obecność PFOA i PFOS w ściekach surowych i oczyszczonych w 10 oczyszczalniach ścieków w USA [57]. Stężenie PFOS w ściekach oczyszczonych mieściło się w zakresie 1,1-130 ng/dm^3, podczas gdy PFOA wahało się w granicach od 2,5-

97 ng/dm^3 [1]. Natomiast bezpośrednio po procesie produkcji półprzewodników zawartość PFOS w ściekach surowych wynosiła do 1650 mg/dm^3 [64].

Rozproszone źródło zanieczyszczeń stanowi osad ściekowy stosowany jako nawóz lub środek poprawiający właściwości gleby, który jednocześnie prowadzi do gromadzenia się niepożądanych związków chemicznych w glebie. Stężenia PFOS i PFOA w osadach ściekowych przeznaczonych do celów nawozowych są już regulowane w niektórych krajach. Jednak w szlamie znajduje się dużo innych substancji z tej grupy lub prekursorów, które mogą ulegać rozkładowi na polach i w oczyszczalniach ścieków tworząc zagrożenie dla otoczenia [58]. Perfluorowane związki alifatyczne łatwo adsorbują się w stałych matrycach takich jak gleba, osad, rośliny i zwierzęta [15]. Ponadto wykazano, że pewne ilości PFCs mogą być wypłukiwane z gleby do wód gruntowych i powierzchniowych [42]. W dotychczasowych badaniach wykryto ok. 40 różnych związków perfluorowanych w wodzie pitnej, a ich typowe stężenia mieszczą się w zakresie od pg/dm^3 do ng/dm^3 [2, 72, 28, 54, 65]. Odnotowane zawartości na poziomie µg/dm^3, a nawet mg/dm^3 wynikały natomiast z działań gaśniczych i z sąsiedztwa zakładów produkujących te związki [18, 55].



Rys. 5. Droga emisji perfluorowanych związków ze źródeł do środowiska, na podstawie [35]

Fig. 5. The Way emissions of perfluorinated compounds from sources to the environment, based on [35]

W ciągu ostatnich kilku lat prowadzono badania, które miały na celu określenie dróg narażenia na związki perfluorowane. Wskazały one ich obecność również w powietrzu wewnątrz pomieszczeń, w kurzu oraz w żywności, między innymi w mięsie, rybach i produktach mlecznych. Na podstawie analiz przeprowadzonych w Wielkiej Brytanii oszacowano średnie dzienne spożycie związków perfluorowanych zawartych w pokarmie. W 2007 roku dawka ta wyniosła 0,1 µg/kg m.c. (m.c. - masa ciała) dla PFOS i PFOA, przy czym tolerowane dzienne spożycie ustalone przez Europejski Urząd ds. Bezpieczeństwa Żywności (EFSA) wynosi 0,15 µg/kg m.c. dla PFOS i 1,5 µg/kg m.c. dla PFOA [50]. W przypadku oceny narażenia człowieka na perfluorowane związki alifatyczne występujące w żywności brane są pod uwagę głównie ryby i produkty rybne. Poziom ten w przypadku ryb dla PFOS wynosi 52,7 ng/g m.m (masa mokra), a w przypadku PFOA 2,10 ng/g m.m. [47]. PFOS wykryto również w mięsie wołowym (0,5-2,7 ng/g m.m.) [62], jajkach kurzych (45-86,9 ng/g m.m.) [68], ziemniakach, produktach kukurydzianych, jabłkach, fasoli oraz w mleku (tab.1) [36]. Na wielkość narażenia wpływa kilka czynników, takich jak wiek, miejsce pobytu, właściwości substancji chemicznej.

Tabela 1. Zestawienie poziomów zawartości perfluorooktanosulfonian, na podstawie [36]

Table 1. Summary of the levels of perfluorooctanesulfonic acid, based on [36]

Przykłady	**Poziomy**
Ryby	52,7 ng/g m.m.
Mięso	0,5-2,7 ng/g m.m.
Jajka	45,0-86,9 ng/g m.m.
Ziemniaki	10,0 ng/g m.m.
Kurz domowy	440 ng/g
Powietrze	0,022 ng/m^3
Woski i impregnaty	212 µg/ml

PFOS i PFOA posiadają zdolność do wiązania się z białkami i tłuszczami oraz do biokumulacji w łańcuchu pokarmowym, a eliminacja tych związków z organizmu trwa bardzo długo [23]. W tabeli 2 przedstawiono kilka przykładów poziomów zawartości PFOS i PFOA w organizmach żywych.

Tabela 2. Związki perfluorowane w wątrobie bobra oraz krwi dorsza, bydlęcej i ludzkiej, na podstawie [20]

Table 2. Perfluorinated compounds in the liver beaver and blood of cod, beef and human, based on [20]

Substancja	**Narządy (ng/g)**	**Krew (pg/cm^3)**		
	Wątroba bobra	Dorsz	Młode bydło	Człowiek
PFOS	6,6	15000	520	34000
PFOA	0,13	90	<50-60	3700

Wyniki badań epidemiologicznych sugerują, że perfluorozwiązki mogą być przyczyną obniżonej masy noworodków, zwiększonego poziomu cholesterolu oraz nadpobudliwości psychoruchowej (ADHD) [24]. Badania przeprowadzone na zwierzętach wykazały, że związki te działają hepatotoksycznie i teratogennie oraz mają negatywny wpływ na układ rozrodczy i hormonalny [3, 31].

5. Fizykochemiczne metody usuwania perfluorowanych związków organicznych z wody i ścieków

5.1. Sorpcja

Proces sorpcji stanowi istotny element wielu układów technologicznych. Zasadniczą funkcją tego procesu jest usuwanie substancji zanieczyszczających głównie wodę, ścieki i powietrze, a niekiedy również gleby. Pojęcie sorpcji obejmuje dwa zjawiska: absorpcję i adsorpcję. Najczęściej stosowanymi adsorbentami są substancje naturalne (np. zeolity), węgiel aktywny, żele krzemionkowe, sadze grafitowe, sita molekularne, aktywny tlenek glinowy oraz jonity (tab. 3) [76].

Tab. 3. Porównanie kinetyki adsorpcji PFOS i PFOA oraz zdolności adsorpcji na różnych adsorbentach, na podstawie [17]

Tab. 3. Comparison of adsorption kinetics of PFOS and PFOA and adsorption capacity of various adsorbents, based on [17]

Adsorbent	Adsorbat	C_0 [mg/dm^3]	pH	$t_{równ.}$ [h]	k_2 [g/mg/h]	q_m [mg/g]
PAC	PFOS	20-300	5-7	3-5	0,01-8,06	374-550
PAC	PFOA	20-300	5-7	4-5	0,03-0,36	175-524
GAC	PFOS	15-250	4,4-7,2	48-168	0,00014	160-229
GAC	PFOA	15-250	5-7,2	~168	0,00017	112-161
Żywice anionowymienne	PFOS	20-400	3-5	48-168	0,000013-0,00032	210-2575
Żywice anionowymienne	PFOA	20-250	5	168	0,000024	1206
Niejonowe żywice	PFOS	0,01-5	6.4–6.9	10-90	-	37–41
Niejonowe żywice	PFOA	0,01-5	6.4–6.9	21-96	-	38–46
Zeolity	PFOS	15-300	6,8-7,2	3-5	1.15–3.69	8–126
Zeolity	PFOA	25-300	6,8-7	5	3.05–7.92	34–37
Usieciowane perełki chitozanu	PFOS	46–371	3	~100	-	2745

C_0–stężenie początkowe, k_2-stała szybkości pseudo-drugiego rzędu, q_m–pojemność sorpcyjna
PAC (ang. Powder Activated Carbon)-sproszkowany węgiel aktywny,
GAC (ang. Granular Activated Carbon)- granulowany węgiel aktywny.

Węgiel aktywny (AC, ang. active carbon) jest najbardziej popularnym i szeroko stosowanym adsorbentem w wielu gałęziach przemysłu. Dobre właściwości adsorpcyjne wynikają z jego mikroporowatej struktury i rozwiniętej

powierzchni właściwej z licznymi centrami aktywnymi [10]. Na ogół powierzchnia ta jest niepolarna, co oznacza, że umożliwia usuwanie zanieczyszczeń hydrofobowych. W technologii oczyszczania wody stosuje się go w celu eliminacji syntetycznych zanieczyszczeń organicznych, związków nadających smak i odorów, a także naturalnych substancji organicznych [61]. AC został użyty również jako adsorbent do usuwania perfluorowanych związków alifatycznych ze ścieków. W kilku instalacjach oczyszczania ścieków w Osace w Japonii zastosowano granulowany węgiel aktywny. Uzyskana skuteczność usuwania PFOS i PFOA mieściła się w zakresie 69 – 100% [63]. Istotną wadą AC jest jego regeneracja, a ze względu na dużą stabilność perfluorowanych związków alifatycznych nie mogą być one rozłożone poprzez zastosowanie konwencjonalnych metod biologicznych i utleniania [75].

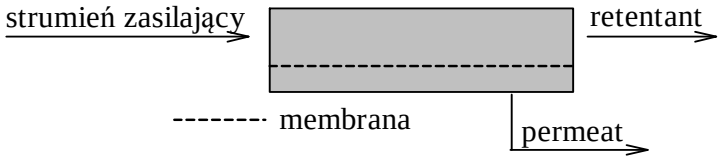
Anionowe i niejonowe żywice były również testowane jako adsorbenty do usuwania perfluorozwiązków. Okazało się, że wykazują większą pojemność sorpcyjną niż węgiel aktywny, ale wysoki koszt żywic zmusza do regeneracji i ponownego ich użycia [13]. Natomiast aktywowany tlenek glinu, krzemionka, zeolit i montmorylonit to materiały mineralne używane jako adsorbenty nieorganiczne. Ich zaletą jest niska cena, ale niestety wykazują gorsze właściwości adsorpcyjne wobec związków perfluorowanych [17]. Aby zwiększyć wydajność adsorpcji PFCs i zmniejszyć koszt adsorbentu badacze zaczęli wytwarzać modyfikowane materiały adsorpcyjne. Wykorzystano w tym celu biomateriały. Przykładem mogą być usieciowane perełki chitozanu, które wykazują znacznie większą zdolność do adsorpcji PFOS niż najlepsze anionowymienne żywice [74]. Perełki chitozanu są droższe niż węgiel aktywny, ale tańsze niż żywice i wykazują duży potencjał zastosowania w oczyszczalniach ścieków. Kolejnym przykładem modyfikowanego materiału naturalnego może być czwartorzędowana bawełna i aminowane łuski ryżu. Charakteryzują się dobrymi właściwościami sorpcyjnymi PFCs, ponieważ pomiędzy protonowymi grupami aminowymi na powierzchni adsorbentu, a anionowymi PFCs zachodzi silne przyciąganie elektrostatyczne. Na szczególną uwagę zasługuje czwartorzędowana bawełna, której zdolności sorpcyjne są stałe w szerokim zakresie pH (5-9) [14].

Sorpcja PFCs może zachodzić również na cząstkach osadu czynnego podczas biologicznego oczyszczania ścieków, jednak tylko w niewielkim stopniu, ponieważ osad czynny posiada słabe właściwości sorpcyjne w stosunku do tej grupy związków [41, 46]. Proces ten można ulepszyć poprzez dodanie PAC do osadu [12, 29]. Jednak sorpcja nie jest procesem destrukcji PFCs, a przesunięciem ich do innego komponentu środowiska. Najskuteczniejszym sposobem degradacji zanieczyszczonych osadów ściekowych jest ich spalanie. Niestety jest to nieekonomiczne ze względu na duże ilości energii potrzebnej do ogrzania sorbentu lub wody. Przykładowo kwas perfluorooktanowy ulega spalaniu przy temperaturze powyżej 300°C. Rozkład termiczny związków perfluorowanych w fazie gazowej jest wydajniejszy, gdy występują one w postaci soli (przeciwjony: Na^{+}, NH_4^{+}) [35]. Związki docelowe ogrzewa się do 1000°C i w tych wa-

runkach nawet najbardziej odporny fluorozwiązek CF_4 ulega degradacji w powyżej 99%, ale przebieg reakcji spalania w tym przypadku jest dość skomplikowany i produkty reakcji są trudne do przewidzenia. Na obecną chwilę wiedza na temat fluorowanych produktów niepełnego spalania oraz ich wpływu i zachowania po uwolnienia do środowiska jest bardzo uboga [49].

5.2. Filtracja membranowa

Usuwanie PFCs z roztworów wodnych można prowadzić stosując procesy membranowe, które należą do dużej grupy technik rozdzielania składników mieszanin ciekłych i gazowych. Filtracja membranowa (rys. 6) polega na rozdziale strumienia zasilającego na dwa produkty końcowe: strumień pokonujący membranę (permeat) i strumień zawierający substancje nieprzenikające przez membranę (retentat) [52].



Rys. 6. Zasada procesu filtracji membranowej, na podstawie [52]

Fig. 6. The principle of the process of membrane filtration, based on [52]

Nanofiltracja (NF) oraz odwrócona osmoza (RO) to metody skuteczne dla usuwania perfluorowanych związków alifatycznych z wody. Flores w swoich badaniach po czterech dniach prowadzenia NF i RO osiągnął wysoki stopień usuwania PFOS i PFOA wynoszący powyżej 90% [22]. Odwrócona osmoza w tym przypadku okazała się bardziej skuteczna. Dla czterech różnych typów membran 99% PFOS uległo separacji przy zastosowaniu szerokiego zakresu stężeń początkowych (1 – 1000 mg/l) [64]. Jednak przekrój poprzeczny nierozgałęzionych PFOS wynosi około 0,4 nm i znajduje się on w zakresie rozmiarów porów membrany NF i RO, dlatego może występować efekt migracji. W dalszej kolejności PFOS może również prowadzić do zatykania porów membrany, powodując duże straty ciśnienia [7].

5.3. Procesy utleniania

Stężenie związków perfluorowanych w ściekach oczyszczonych jest często znacznie wyższe niż w ściekach surowych. Jest to skutkiem małej podatności tych związków na rozkład w środowisku. Ponadto, PFOS i PFOA są stabilnymi produktami końcowymi rozpadu wielu substancji prekursorowych. Dlatego w celu zmniejszenia poziomów zawartości PFCs sprawdzano przydatność zastosowania procesów utleniania. Jednym z najbardziej reaktywnych utleniaczy

w uzdatnianiu wody jest rodnik $OH^{\bullet}$, który jest wytwarzany w wysokoefektywnych procesach utleniania (AOP, ang. advanced oxidation processes). Są to między innymi procesy wykorzystujące odczynnik Fentona, ozon (ozonowanie, proces (O_3/H_2O_2)), UV (UV/H_2O_2, UV/O_3 lub UV/TiO_2), jak również sonoliza wody [67]. W wyniku prowadzonych analiz okazało się, że perfluorowane związki chemiczne ze względu na całkowite zastąpienie węgla fluorem są odporne na utlenianie [69].

5.3.1. Sonoliza

Sonoliza opiera się na rozszerzaniu i sprężaniu pęcherzyków gazu wytwarzanych przez ultradźwięki o częstotliwości w zakresie 20 – 1000 kHz. Mogą być one generowane na dnie zbiornika i odbijane na powierzchni rozdziału faz gaz – woda, prowadząc do powstawania fal stojących. Małe pęcherzyki gromadzą się w obszarach maksymalnej amplitudy, gdzie oscylują. Podczas rozprężania gaz jest wciągany do pęcherzyków, które ogrzewa się podczas kolejnej fazy sprężania. W przypadku sonolizy wody osiągane są temperatury nawet do 4600 K, co prowadzi do rozkładu pary wodnej wewnątrz bańki. W ten sposób na powierzchni pęcherzyka tworzone są rodniki $OH^{\bullet}$ w wysokich stężeniach [67]. Zanieczyszczenia mogą być degradowane poprzez bezpośredni rozkład termiczny oraz pośrednio za pomocą rodników $OH^{\bullet}$. Perfluorowane związki nie reagują z rodnikami $OH^{\bullet}$, a zatem prawdopodobnie rozkładane są przez wysoką temperaturę. Związki hydrofobowe gromadzą się na granicy faz gaz – woda i degradacja jest bardziej efektywna niż dla związków hydrofilowych [27]. Zatem, aktywność powierzchniowa PFOS i PFOS jest zaletą w procesie sonolizy [43].

Rozkład sonolityczny PFOS i PFOA prowadzi do otrzymania głównie fluorku i siarczanu. Przykładowe warunki prowadzenia sonolizy dla PFOS były następujące: $[PFOS]_0$=20 µmol/dm^3, f = 200 kHz, 200 W/dm^3, 3W/cm^2, 20°C, argon. W zastosowanych warunkach okres półtrwania PFOA wyniósł 22 min, a dla PFOS 43 min. W celu zbadania mechanizmu i kinetyki degradacji, dodatkowo proces przeprowadzono w innych warunkach: $[PFOS]_0$=10 µmol/dm^3, f=358/618 kHz, 250 W/dm^3, 6,4 W/cm^2, 10°C, argon. Czas półtrwania zmniejszył się do 17 minut w przypadku PFOA i 26 minut dla PFOS [66].

Sonochemiczne badania degradacji w wodach gruntowych zawierających związki perfluorowane wykazały, że zawartość dodatkowych substancji organicznych ma tylko minimalny wpływ na szybkości rozkładu, nawet wtedy, gdy stężenie związków organicznych jest o wiele rzędów większe niż fluorozwiązków, ze względu na preferencyjną adsorpcję PFCs do powierzchni pęcherzyka wody [9].

5.3.2. Fotoliza

Fotodegradacja jest procesem przemiany chemicznej związków pod wpływem fotonów. Proces fotodegradacji przebiega w naturalnych warunkach w środowisku i dotyczy jedynie powierzchniowej warstwy gleby i wód po-

wierzchniowych. Fotodegradacja może być bezpośrednia lub pośrednia. Bezpośrednia to zwykle proces utlenienia następujący pod wpływem cząstki, która zaabsorbowała foton. Fotoliza pośrednia przebiega na przykład pod wpływem reakcji z rodnikami $OH^{\bullet}$ [73].

PFOA nie absorbuje światła UV powyżej 240 nm. Przy krótszych falach molowy współczynnik absorpcji wzrasta. Tak więc, bezpośrednia fotoliza jest najbardziej wydajna przy krótkich długościach fal promieniowania UV i ultrafioletu próżniowego (VUV, ang. Vacuum Ultra Violet) (<200 nm). Hori i inni [30] opisali przykład fotolitycznej degradacji PFOA w następujących warunkach: stężenie początkowe $[PFOA]_0$=1,35 mmol/dm^3, lampa Xe-Hg 200 W, objętość roztworu 22 cm^3, ciśnienie tlenu 4,8 atm. To źródło promieniowania emitowało promieniowanie UV głównie w zakresie długości fali 300-400 nm. Czas półtrwania PFOA wynosił 24 godziny. Przy zastosowaniu takich warunków produktami fotodegradacji były związki perfluorowane o krótszych łańcuchach węglowych. Kolejnym przykładem fotolizy PFOA był proces przy zastosowaniu 15 W lampy LP-Hg (low-pressure mercury lamp), długość fali: (254 + 185) nm. Skutkiem takich warunków fotolizy był większy stopnień degradacji z czasem półtrwania 90 min. Analogiczne przeprowadzono eksperymenty bez emisji promieniowania przy 185 nm. W ciągu 2 godzin stężenie PFOA nie uległo zmianie. Tak więc, rozkład PFOA jest skuteczny przy promieniowaniu 185 nm LP-Hg (254 + 185) lampy. Reakcji towarzyszy tworzenie fluoru i krótkołańcuchowych związków alifatycznych. Proces ten wymaga dużych nakładów energii, ponieważ większość energii emitowanej przez źródło promieniowania jest prawdopodobnie wykorzystywana w procesie fotolizy wody, co czyni ten proces nieefektywnym [8].

5.3.3. Alternatywne systemy utleniania

Niski stopień usuwania PFCs z wykorzystaniem powszechnych procesów utleniania skłonił do poszukiwania innych alternatywnych metod ich degradacji. W tym celu zastosowano rodnikowe aniony siarczanowe ($SO_4^{\bullet -}$), których potencjał redukcyjny wynosi 2,5-3,1V (silne utleniacze) [45]. Mogą być one wytwarzane w różny sposób, na przykład poprzez fotolizę UV i redukcję peroksodisiarczanu ($S_2O_8^{2-}$) lub peroksomonosiarczanu (HSO_5^-) metalami przejściowymi, jak również powstają w wyniku pirolizy nadsiarczanu (T> 40°C) [40, 32].

Reakcję z $SO_4^{\bullet -}$ wykorzystano w próbie degradacji kwasów perfluorokarboksylowych o różnej długości łańcucha węglowego [30]. Przebieg tej reakcji (rys. 7) został zaproponowany przez Kutsuna i Hori [38].

$$CF_3(CF_2)_6COO^- + SO_4^{\bullet-} \rightarrow CF_3(CF_2)_6COO^{\bullet} + SO_4^{2-}$$

$$CF_3(CF_2)_6COO^{\bullet} \rightarrow CF_3(CF_2)_5CF_2^{\bullet} + CO_2$$

$$CF_3(CF_2)_5CF_2^{\bullet} + O_2 \rightarrow CF_3(CF_2)_5CF_2OO^{\bullet}$$

$$2CF_3(CF_2)_5CF_2OO^{\bullet} \rightarrow CF_3(CF_2)_5CFOOOOCF(CF_2)_5CF_3$$

$$CF_3(CF_2)_5CFOOOOCF(CF_2)_5CF_3 \rightarrow 2CF_3(CF_2)_5CF_2O^{\bullet} + O_2$$

$$CF_3(CF_2)_5CF_2O^{\bullet} \rightarrow CF_3(CF_2)_4CF_2^{\bullet} + COF_2$$

$$COF_2 + H_2O \rightarrow CO_2 + 2HF$$

$$CF_3(CF_2)_5CF_2O^{\bullet} + HSO_4^- \rightarrow CF_3(CF_2)_5CF_2OH + SO_4^{\bullet-}$$

$$CF_3(CF_2)_5CF_2OH \rightarrow CF_3(CF_2)_5COF + HF$$

$$CF_3(CF_2)_5COF + H_2O \rightarrow CF_3(CF_2)_5COO^- + HF + H^+$$

Rys. 7. Schemat reakcji kwasów perfluorowanych z rodnikiem $SO_4^{\bullet-}$, na podstawie [38]
Fig. 7. The reaction scheme of perfluorinated acids with a radical $SO_4^{\bullet-}$, based on [38].

Degradacja PFOS to stopniowe eliminowanie jednostki $–CF_2$, co prowadzi do otrzymywania krótszych łańcuchów PFA, które następnie ulegają utlenianiu za pomocą rodnika anionu siarczanowego aż do całkowitego rozpadu do CO_2 i HF. Szybkość reakcji utleniania związków perfluorowanych jest zbyt mała. W związku z tym zastosowanie tej metody w uzdatnianiu wody byłoby nieekonomiczne z powodu dużej energochłonności. Dodatkowo obecność innych rozpuszczonych związków organicznych w roztworze PFOA będzie konkurencyjnie w procesie degradacji. Nastąpi tylko w sytuacji, gdy stężenie PFOS znacznie przekracza całkowite stężenie związków organicznych ([PFOA]/org] całkowita > 100) [30].

6. Podsumowanie

W ostatnim okresie zwraca się szczególną uwagę na występujące w wodach i ściekach mikrozanieczyszczenia organiczne, endokrynnie aktywne (EAC, ang. Endocrine Active Compound) [5]. Poważnym źródłem EACs dla człowieka jest zarówno żywność, jak i woda do picia, do których zanieczyszczenia te dostarczane są przez chemikalia wraz z opadami, ściekami przemysłowymi i odciekami ze składowisk odpadów [6]. Przykładem takiego typu

mikrozanieczyszczeń są organiczne perfluorozwiązki – pochodne węglowodorów, w których wszystkie bądź część atomów wodoru zostały zastąpione atomami fluoru. Narażenie na perfluorowane związki alifatyczne jest nieuniknione ze względu na powszechne wykorzystywanie ich w wielu gałęziach przemysłu. Ponadto, negatywny ich wpływ na środowisko powoduje, że usuwanie tych związków ze ścieków i wody stało się niezbędne. Zastosowanie konwencjonalnych metod eliminowania PFCs jest niewystarczające i wynika z ich dużej odporności i stabilności termicznej. Dodatkowo skuteczność usuwania zależy od wielu czynników, takich jak stężenie usuwanego składnika czy obecność innych substancji w próbce. Niestety procesy takie jak sorpcja, filtracja membranowa, itp. wymagają późniejszej utylizacji wyizolowanych związków perfluorowanych. Związki te nie są też podatne na powszechnie stosowane procesy utleniania chemicznego. Natomiast odpowiednio dobrane parametry procesów sonolizy i fotolizy powodują degradację w różnym stopniu. Dlatego, ze względu na niedostateczną wiedzę i zbyt małą ilość informacji na temat możliwości usuwania związków perfluorowanych sugeruje się dalsze badania w tym kierunku.

Literatura

[1] 3M, Environmental Monitoring-Multi-City Study (Water, Sludge, Sediment, POTW Effluent and Landfill Leachate Samples), Docket AR-226-1030a, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Pollution and Prevention and Toxic Substances, Washington, DC, 2001.

[2] Ahrens L. Polyfluoroalkyl compounds in the aquatic environment: a review of their occurrence and fate. J. Environ. Monitor. 13(1), 2011, pp. 20-31.

[3] Austin M.E., Kastuti B.S., Barber M., et al. Neuroendocrine effects of perfluorooctane sulfonate in rats. Environ. Health Perspect. 111, 2003, pp. 1485-1489.

[4] Becker A.M., Gerstmann S., Frank H. Perfluorooctane surfactants in waste waters, the major source of river pollution. Chemosphere 72, 2008, pp. 115–121.

[5] Biłyk A., Nowak-Piechota G. Zanieczyszczenie środowiska substancjami powodującymi zakłócenie funkcji endokrynologicznych organizmu, Ochrona Środowiska 26, 3, 2004, pp. 29-35.

[6] Bodzek M. Przegląd możliwości wykorzystania technik membranowych w usuwaniu mikroorganizmów i zanieczyszczeń organicznych ze środowiska wodnego. Inżynieria i Ochrona Środowiska. 16, nr 1, 2013, pp. 5-37.

[7] Carter K.E., Farrell J. Removal of perfluorooctane and perfluorobutane sulfonate from water via carbon adsorption and ion exchange. Sep Sci Technol 45(6), 2010, pp. 762–767.

[8] Chen J., Zhang P.Y. et al. Photodegradation of perfluorooctanoic acid by 185 nm vacuum ultraviolet light. J Environ Sci 19(4), 2007, pp. 387–390 .

[9] Cheng J., Vecitis C.D., Park H., Mader B.T., Hoffmann M.R. Sonochemical degradation of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in landfill groundwater: Environmental matrix effects. Environmental Science & Technology, 42(21), 2008, pp. 8057–8063.

[10] Choma J., Jaroniec M. Nowe metody opisu struktury porowatej węgli aktywnych na podstawie danych adsorpcyjnych. Ochrona Środowiska, 3(74), 1999.
[11] Consoer D.M., Hoffman A.D., Fitzsimmons P.N., Kosian P.A., Nichols J.W. Toxicokinetics of perfluorooctanoate (PFOA) in rainbow trout (Oncorhynchus mykiss). Aquatic Toxicology 156, 2014, pp. 65–73.
[12] Cornel P. Aktivkohle zur Abwasserbehandlung. Oral presentation at "Aktivkohletage Mannheim" 23/24, 2010, Mannheim, Germany.
[13] Deng S., Yu Q., Huang J., Yu G. Removal of perfluorooctane sulfonate fromwastewater by anion exchange resins: effects of resin properties and solutionchemistry, Water Res. 44, 2010, pp. 5188–5195.
[14] Deng S., Zheng Y., Xu F., Wang B., Huang J., Yu G. Highly efficient sorptionof perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoate on a quaternized cottonprepared by atom transfer radical polymerization, Chem. Eng. J. 193, 2012, pp. 154–160.
[15] Dietz R., Bossi R., Riget F.F., et al. Increasing perfluoroalkyl contaminants in east Greenland polar bears (Ursus maritimus): A new toxic threat to the Arctic bears. Environ Sci Technol 42, 2008, pp. 2701–2707.
[16] Dinglasan-Panlilio M.J., Prakash S.S., Baker J.E. Perfluorinated compounds in the surface waters of Puget Sound,Washington and Clayoquot and Barkley Sounds, British Columbia. Marine Pollution Bulletin 78, 2014, pp. 173–180.
[17] Du Z., Deng S., Bei Y., Huang Q., Wang B., Huang J., Yu G. Adsorption behavior and mechanism of perfluorinated compounds on various adsorbents—A review. Journal of Hazardous Materials 274, 2014, pp. 443–454.
[18] Ericson I., Nadal M., van Bavel B., et al. Levels of perfluorochemicals in water samples from Catalonia.Spain: is drinking water a significant contribution to human exposure. Environ Sci Pollut Res 15, 2008, pp. 614–619.
[19] Falandysz J., Taniyasu S., Gulkowska A., Yamashita N., Schulte-Oehlmann U. Is fish a major source of fluorinated surfactants and repellents in humans living on the Baltic Coast? Environ. Sci. Technol. 40, 2006, pp. 748-751.
[20] Falandysz J., Taniyasu S., Yamashita N., Jęcek L., Rostkowski P., Gulkowska A., Mostrąg A., Walczykiewicz B., Zegarowski Ł., Falandysz J., Zalewski K. Związki perfluorowane w środowisku przyrodniczym, żywności i organizmie człowieka. Roczn. PZH 57, nr 2, 2006, pp. 113-1244.
[21] Fiedler S., Pfister G., Schramm K.W. Poly- and perfluorinated compounds in household consumer products. Toxicol. Environ. Chem. 92(10), 2010, pp. 1801-1811.
[22] Flores C., Ventura F., Martin-Alonso J., Caixach J. Occurrence of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoate (PFOA) in N.E. Spanish surface water and their removal in a drinking water treatment plant that combines conventional and advanced treatment in parallellines. Sci. Total Environ. 461-462, 2013, pp. 618-626.
[23] Food Survey Information Sheet, Survey of Fluorinated Chemicals in Food, Food Standard Agency 05/09 October 2009.
[24] Fraser A.J., Webster T.F., Watkins D.J., Strynar M.J., Kato K., Calafat A.M., Vieira V.M., McClean M.D. Polyfluorinated compounds in dust from homes, offices, and vehicles as predictors of concentrations in office workers' serum. Environment International 60, 2013, pp. 128–136.

[25] Fromme H., Tittlemier S.A., Volkel W., Wilhelm M., Twardella D. Perfluorinated compounds – exposure assessment for the general population in western countries. International Journal of Hygiene and Environmental Health 212, 2009, pp. 239-270.

[26] Giesy J.P, Kannan K. Perfluorochemical surfactants in the environment. Environ. Sci. Technol. 36, 2002, pp. 146-152.

[27] Henglein A., Kormann C. Scavenging of OH radicals produced in the sonolysis of water. Int J Radiat Biol 48(2), 1985, pp. 251–258.

[28] Hoehn E., Plumlee M.H., Reinhard M. Natural attenuation potential of downwelling streams for perfluorochemicals and other emerging contaminants.Water Sci.Technol.56 (11), 2007, pp. 59-64.

[29] Hollender J., Zimmermann S.G., et al. Elimination of organic micropollutants in a municipal wastewater treatment plant upgraded with a full-scale post-ozonation followed by sand filtration. Environ Sci Technol 43(20), 2009, pp. 7862–7869.

[30] Hori H., Yamamoto A., Hayakawa E., Taniyasu S., Yamashita N., Kutsuna S., Kiatagawa H., Arakawa R. Efficient decomposition of environmentally persistent perfluorocarboxylic acids by use of persulfate as a photochemical oxidant. Environmental Science &Technology, 39(7), 2005, pp. 2383–2388.

[31] Hu W., Jonem P.D., Upcham B.L., et al. Inhibition of gap junctional intercellular communication by perfluorinated compounds in rat liver and dolphin kidney epithelial cel lines in vitro and Sprague-Dawley rats in vivo. Toxic. Sci. 68(2), 2002, pp. 429-436.

[32] Johnson R.L., Tratnyek P.G., et al. Persulfate persistence under thermal activation conditions. Environ Sci Technol 42(24), 2008, pp. 9350–9356.

[33] Kissa E. Fluorinated surfactants and repellents. Marcel Dekker, Inc., New York, 2005.

[34] Kissa E. Fluorinated surfactants: synthesis-properties-applications. Surfactant Science Series 50. Marcel Dekker, New York, 1994.

[35] Knepper T.P., Lange F.T. Polyfluorinated Chemicals and Transformation Products, Hdb Env Chem 17, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2012, pp. 63–72.

[36] Kucharska A., Góralczyk K., Czaja K., Struciński P., Hernik A., Korcz W., Snopczyński T., Ludwicki J.K. Wszechobecne związki perfluorowane. Roczn. PZH 2, 2011, pp. 137-144.

[37] Kudo N., Katakura M., Sato Y., Kawashima Y. Sex hormone-regulated renal transport of perfluorooctanoic acid. Chem. Biol. Interact. 139, 2002, pp. 301-316.

[38] Kutsuna S., Hori H. Rate constants for aqueous-phase reactions of SO_4^- with C2F5C(O)O$^-$ and C3F7C(O)O$^-$ at 298 K. International Journal of Chemical Kinetics, 39(5), 2007, pp. 276–288.

[39] Lehmler H-J. Synthesis of environmentally relevant fluorinated surfactants – a review. Chemosphere, 58, 2005, pp. 1471-1496.

[40] Liang C., Bruell C.J. Thermally activated persulfate oxidation of trichloroethylene: Experimental investigation of reaction orders. Ind Eng Chem Res 47(9), 2008, pp. 2912–2918.

[41] Loganathan B.G., Sajwan K.S., et al. Perfluoroalkyl sulfonates and perfluorocarboxylates in two wastewater treatment facilities in Kentucky and Georgia. Water Res 41(20), 2007, pp. 4611–4620.

[42] Moody C.A., Field J.A. Determination of perfluorocarboxylates in groundwater impacted by fire-fighting activity. Environ Sci Technol 33, 1999, pp. 2800–2806.
[43] Moriwaki H., Takagi Y., et al. Sonochemical decomposition of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid. Environ Sci Technol 39(9), 2005, pp. 3388–3392.
[44] Murakami M, Kuroda K, Sato N., et al. Groundwater pollution by perfluorinated surfactants in Tokyo. Environ Sci Technol 43, 2009, pp. 3480–3486.
[45] Neta P., Huie R.E., et al. Rate constants for reactions of inorganic radicals in aqueous solution. J Phys Chem Ref Data 17(3), 1988, pp. 1027–1040.
[46] Ochoa-Herrera V., Sierra-Alvarez R. Removal of perfluorinated surfactants by sorption onto granular activated carbon, zeolite and sludge. Chemosphere 72(10), 2008, pp. 1588–1593.
[47] Okochi E., Nishimaki-Mogami T., Suzuki K., Takahashi A. Perfluorooctanoic acid, a peroxisome – proliferating hypolipidemic agent, dissociates apolipoprotein B48 from lipoprotein particles and decreases secretion of very low density lipoproteins by cultured rat hepatocytes. Biochim. Biophys. Acta 1437, 1999, pp. 393-401.
[48] Olsen G.W., Huang H.Y., Helzlsouer K.J., et.al. Historical comparison of perfluorooctanesulfonate, perfluorooctanoate and other fluorochemicals in human blood. Environ. Health Perspect. 113, 2005, pp. 539-545.
[49] Olsen G.W., Huang H.Y., Helzlsouer K.J., Hansen K.J., Butenhoff J.L., Mandel J.H. Historical comparison of perfluorooctanesulfonate, perfluorooctanoate, and other fluorochemicals in human blood. Environ Health Perspect 113, 2005, pp. 539–545.
[50] Opinion of the Scientific Panel on Contaminants in the Food Chain on Perfluorooctane sulfonate (PFOS), Perfluorooctanoic acid (PFOA) and their salts. The EFSA Journal 653, 2008, pp. 1-131.
[51] Pilarek M., Szewczyk K.W. Zastosowanie perfluorozwiązków jako ciekłych nośników gazów oddechowych w medycynie i biotechnologii. Biotechnologia 69(2), 2005, pp. 125-150.
[52] Porębski T., Tomzik S., Ratajczak W., Talma-Piwowar M., Capała W. Zastosowanie procesów membranowych w przemyśle chemicznym—recykling surowców, oszczędność energii. POLIMERY 57, nr 5, 2012.
[53] Pruchnicka J., Środowisko a zdrowie – program krajowy i priorytety europejskie. Instytut Medycyny Pracy i Zdrowia Środowiskowego. VII Ogólnopolska Sesja Popularno-naukowa „Środowisko a zdrowie", Częstochowa, 2-3 czerwiec 2005.
[54] Quinones O., Snyder S.A. Occurrence of perfluoroalkyl carboxylates and sulfonates in drinking water utilities and related waters from the United States. Environ. Sci. Technol. 43 (24), 2009, pp. 9089-9095.
[55] Rahman M.F., Peldszus S., Anderson W.B. Behaviour and fate of perfluoroalkyl and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in drinking water treatment: A review. water research 50, 2014, pp. 318-340.
[56] Rostkowski P., Taniyasu S., Yamashita N., Falandysz J. Związki perfluorowane w wodzie pitnej. Roczn. PZH 59, nr 3, 2008, pp. 283-292.
[57] Schultz M.M., Barofsky D.F., Field J.A. Quantitative determination of fluorinated alkyl substances by large-volume-injection liquid chromatography tandem mass spectrometry—characterization of municipal wastewaters, Environ. Sci. Technol. 40, 2006, pp. 289–295.

[58] Sinclair E., Kannan K. Mass loading and fate of perfluoroalkyl surfactants in wastewater treatment plants. Environ Sci Technol 40, 2006, pp. 1408–1414.

[59] Stahl L.L., Snyder B.D., Olsen A.R., Kincaid T.M., Wathen J.B., McCarty H.B., Perfluorinated compounds in fish from U.S. urban rivers and the Great Lakes, Science of the Total Environment 499, 2014, pp. 185–195.

[60] Staszowska A. Źródła i poziomy związków perfluorowanych w środowisku wewnętrznym. Monografia nr 100, POLSKA INŻYNIERIA ŚRODOWISKA PRACE Tom II, pod redakcją Marzenny R. Dudzińskiej, Artura Pawłowskiego, Lublin 2012.

[61] Szlachta M., Adamski W. Application of Adsorption on Powdered Active Carbon for the Removal of Dissolved Organic Substances from Surface Water. Ochrona Srodowiska 31, Nr. 2, 2009, pp. 61–66.

[62] Szonyi S., Watzke H.J., Cambon A. Highly fluorinated surfactants in liposome technology. Thin Solid Films 284, 1996, pp. 769-771.

[63] Takagi S., Adachi F., Miyano, K., Koizumi Y., Tanaka H., Watanabe I., Tanabe S., Kannan K. Fate of perfluorooctanesulfonate and perfluorooctanoate in drinking water treatment processes. Water Res. 45 (13), 2011, pp. 3925-3932.

[64] Tang C.Y.Y., Fu Q.S., Robertson A.P., Criddle C.S., Leckie J.O. Use of reverse osmosis membranes to remove perfluorooctane sulfonate (PFOS) from semiconductor wastewater. Environ. Sci. Technol. 40, 2006, pp. 7343–7349.

[65] Thompson J., Eaglesham G., Mueller J. Concentrations of PFOS, PFOA and other perfluorinated alkyl acids in Australian drinking water. Chemosphere 83 (10), 2011a, pp. 1320-1325.

[66] Vecitis C. D., Park H., Cheng J., Mader B. T., Hoffmann M.R. Kinetics and mechanism of the sonolytic conversion of the aqueous perfluorinated surfactants, perfluorooctanoate (PFOA), and perfluorooctane sulfonate (PFOS) into inorganic products. Journal of Physical Chemistry A, 112(18), 2008, pp. 4261–4270.

[67] von Sonntag C. Advanced oxidation processes: Mechanistic aspects, Wat Sci Technol 58, 2008, pp. 1015–1021.

[68] Wang Y., et al. Perfluorooctane sulfonate (PFOS) and related fluorochemicals in chicken egg in China. Chin. Sci. Bull. 53, 2008, pp. 501-507.

[69] Wardman P. Reduction potentials of one-electron couples involving free-radicals in aqueous-solution. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 18(4), 1989, pp. 1637–1755.

[70] Weschler C.J., Nazaroff W.W. Semivolatile organic compounds in indor environments. Atmospheric Environment 42, 2008, pp. 9018-9040.

[71] Wolny A., Krupa K. Narażenie populacji na perfluorowane związki alifatyczne – świadomość zagrożenia. JEcolHealth, vol.16, styczeń-marzec 2012.

[72] Yamashita N., Kannan K., Taniyasu S., Horii, Y., Petrick G., Gamo T. A global survey of perfluorinated acids in oceans. Mar. Pollut. Bull. 51 (8-12), 2005, pp. 658-668.

[73] Zepp R.G., Schlotzhauer P.F. Eviron. Sci Technol. 17, 1983, pp. 462.

[74] Zhang Q., Deng S., Yu G., Huang J. Removal of perfluorooctane sulfonate fromaqueous solution by crosslinked chitosan beads: sorption kinetics and uptakemechanism, Bioresour. Technol. 102, 2011, pp. 2265–2271.

[75] Zhao H., Gao J., Zhao G., Fan J., Wang Y. Fabrication of novel SnO_2–Sb/carbon aerogel electrode for ultrasonic electrochemical oxidationof perfluorooctanoate with high catalytic efficiency, Appl. Catal., B: Environ.136–137, 2013, pp. 278–286.

[76] Żarczyński A., Stopczyk A., Zaborowski M., Gorzka Zb., Kaźmierczak M. Usuwanie związków chloroorganicznych ze ścieków przemysłowych ze szczególnym uwzględnieniem metody termokatalitycznego utleniania. Ochrona Środowiska 32, Nr 1, 2010.

OCCURRENCE OF PERFLUORINATED ORGANIC COMPOUNDS IN THE ENVIRONMENT AND PHYSICAL AND CHEMICAL METHODS OF REMOVING THEIR FROM WATER SOLUTIONS

S u m m a r y

The work includes a review of the literature on the properties and the occurrence of perfluorinated organic compounds in various components of the environment and the possibility of their removal from aqueous solutions of physical and chemical processes. Perfluorinated compounds are substances in which all hydrogen atoms are replaced by fluorine atoms. They are used as ingredients in many everyday objects. They are durable and resistant to thermal and chemical degradation. Stability of perfluorinated organic compounds, which due to their chemical structure means that they are present in all parts of the environment. Shown to be present in the water, wastewater, soil, food and house dust, even the blood of human and animal. Suspicions, that these compounds adversely affect human health and cumulate in an organism, initiated search of effective methods that will allow to eliminate them at the stage of water and sewage purification. It turns out that the degree of removal when using conventional methods is often insufficient and a significant proportion of these compounds is introduced into the environment in an unchanged form or in the form of more toxic metabolites. Processes such as sorption, nanofiltration or reverse osmosis, despite the good performance are not suitable because they require further surgery to eliminate the separate compounds. In addition, the properties of perfluorinated organic compounds reduce the number of methods that can be used for their elimination. There is therefore a need to develop new and efficient methods for their removal and the combination of different techniques in a single process.

Keywords: micropollutants, endocrine active compounds, perfluorinated organic compounds (PFCs), physical and chemical methods of removing micropollutants

Przesłano do redakcji: 21.06.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.52

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 239-248

Ewelina KUBACKA[1]
Dariusz HEIM[2]

KOMFORT TERMICZNY W POMIESZCZENIU ZE ZDECENTRALIZOWANYM, MECHANICZNYM SYSTEMEM DOPROWADZENIA POWIETRZA

W artykule przedstawiono analizę parametrów komfortu cieplnego w pomieszczeniu przeznaczonym do pracy biurowej i użytkowanego w okresie dnia. Dla celów badania opracowano modele węzłowe przepływu powietrza w pomieszczeniu z podziałem na objętości skończone. Założono idealne utrzymanie temperatury powietrza w strefie wlotu (na poziomie 20°C) oraz jego dystrybucję w pomieszczeniu z uwzględnieniem konwekcji naturalnej. Przeanalizowano 4 konfiguracje rozmieszczenia otworów wlotowych i wylotowych. Graficznie zilustrowano układ wlotów i wylotów oraz ścieżki przepływu powietrza w pomieszczeniach. Dla poszczególnych przypadków wyznaczono parametry PMV i PPD dla dwóch wybranych stref odpowiadających możliwemu usytuowaniu człowieka w pozycji pracy przy biurku: pośrodku pomieszczenia oraz przy oknie. Ponadto przedstawiono zmianę temperatury powietrza wewnętrznego w czasie dla wybranego okresu. Wyniki przeprowadzonej symulacji pozwoliły na stwierdzenie, że komfort termiczny w pomieszczeniu został zachowany dla każdego z rozpatrywanych wariantów.

Słowa kluczowe: wentylacja mechaniczna, przepływ powietrza, temperatura wewnętrzna, komfort cieplny, symulacja

1. Wprowadzenie

Komfort cieplny ma wpływ na samopoczucie i zdolność wykonywania czynności, a także na zdrowie użytkowników i ich podatność na różne choroby [8]. Dlatego też spełnienie jego podstawowych kryteriów jest niezwykle ważne, zwłaszcza w pomieszczeniach przeznaczonych do pracy. Pomieszczenia biurowe przeznaczone są do pracy umysłowej wykonywanej w pozycji siedzącej, zazwyczaj w jednym miejscu. Pracownik znajduje się wtedy pod wpływem oddziaływania środowiska wewnętrznego czasie nawet kilkunastu godzin.

[1] Autor do korespondencji: Ewelina Kubacka, mgr inż., Katedra Inżynierii Środowiska, Łódzka, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź, (42) 631-37-83, ewelina.kubacka@wipos.p.lodz.pl

[2] Dariusz Heim, dr hab. inż., Katedra Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź, (42) 631-37-82, dariusz.heim@p.lodz.pl, osoba do korespondencji

Na przestrzeni ostatnich kilkudziesięciu lat powstało wiele modeli do określania komfortu cieplnego [3]. Podstawowym i najczęściej stosowanym jest model zaproponowany przez Fangera [4], w którym dokonuje jej się na podstawie wskaźnika PMV (Predicted Mean Vote), określającego średnią przewidywaną ocenę komfortu. Wskaźnik PMV jest funkcją zmiennych środowiskowych, takich jak: temperatura powietrza, średnia temperatura promieniowania, prędkość ruchu powietrza oraz ciśnienie pary wodnej, a także zmiennych fizjologicznych: poziomu aktywności i izolacyjności termicznej odzieży. Drugim sposobem oceny komfortu opracowanym przez Fangera jest wskaźnik PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied). Określa on udział osób niezadowolonych z warunków panujących w pomieszczeniu i jest wyrażony w procentach. Warunki panujące w pomieszczeniu można uznać za komfortowe, jeżeli wartość wskaźnika PMV zawiera się w przedziale -0,5<PMV<+0,5 (warunki określane jako neutralne). Jest to jednoznaczne z tym, że około 10% osób jest niezadowolonych, tzn. warunki panujące w pomieszczeniu uznaje za zbyt zimne lub zbyt gorące.

2. Metodologia

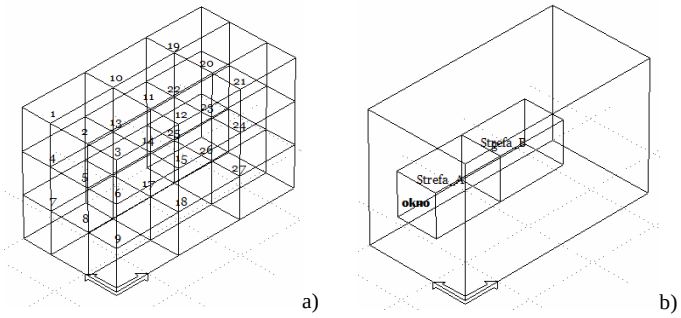
Na potrzeby artykułu oceny komfortu dokonano za pomocą dwóch wskaźników: PMV i PPD. Parametry niezbędne do ich wyznaczenia przyjęto zgodnie z zapisami norm, dotyczących wymaganych parametrów projektowanego środowiska wewnętrznego [7]. Przyjęto, że w okresie chłodniczym opór cieplny odzieży wynosi I_{cl} = 0,5 clo (ubranie w postaci cienkich spodni i koszuli z krótkim rękawem), poziom aktywności 1,2 met = 70 W/m^2 (wartość charakterystyczna dla pracy biurowej), a prędkość powietrza 0,12 m/s. W okresie ogrzewczym opór cieplny ubrania przyjęto równy 1,0 clo (koszula, spodnie, marynarka), prędkość powietrza jako 0,1 m/s. Poziom aktywności pozostaje bez zmian.

Aby przeprowadzić analizę komfortu termicznego w pomieszczeniu należało je poddać dynamicznej symulacji, wymagającej użycia odpowiedniego modelu przepływu powietrza. W celu określenia odpowiednich zjawisk sprzęgania transferu ciepła i masy, zastosowano metodę węzłowego przepływu powietrza (Air Flow Network). Poszczególne strefy są reprezentowane przez układy węzłowych sieci przepływu, gdzie strefy (węzły) o różnych parametrach fizycznych są połączone ścieżką przepływu i pozostają w stanie równowagi termodynamicznej. Połączenie sieciowe opisano przez układ nieliniowych równań różniczkowych, które charakteryzują cechy i formę przepływu. Strumień przepływu przez każde połączenie wykonuje się w taki sposób, że ilość powietrza wpływającego do i wypływającego z każdej strefy pozostaje w stanie równowagi (zgodnie z zasadą zachowania masy).

3. Model symulacyjny

Symulację przeprowadzono dla modelu pojedynczego pomieszczenia biurowego. Bazę danych klimatycznych zbudowano w oparciu o dane meteorolo-

giczne typu WYEC (Weather Year for Energy Calculation, Version 2) [6], opracowane dla miasta Łodzi. Pomieszczenie zostało stworzone na podstawie rzeczywistej strefy o wymiarach (głębokość x szerokość x wysokość) 5,8 x 3 x 3,6 m. Wszystkie przegrody zostały zaprojektowane z założeniem dobrej izolacji cieplnej i stałej wydajności cieplnej obszaru. Jako odstawowy materiał docieplenio wy zastosowano wełnę mineralną o grubości 200 m, umieszczoną po wewnętrznych stronach przegród zarówno pionowych jaki poziomych. W centralnej części ściany zewnętrznej znajduje się okno o wymiarach 1,2 x 1,2 m i grubości szyby równej 0,01 m, zorientowane na zachód. W celu uzyskania dokładnych wyników symulacji, rozpatrywany obszar podzielono na 27 stref o skończonych objętościach równych 1,94 m^3, 2,16 m^3, 2,59 m^3 lub 2,88 m^3 (Rys. 1.a)). Dwie z nich odpowiadają możliwemu usytuowaniu górnej części tułowia człowieka podczas pracy przy biurku. W jednej z nich (strefa A) osoba znajduje się w odległości od 2 do 4 m od okna, w drugiej (strefa B) do 2 m od okna (Rys. 1.b)). Możliwość zmiany usytuowania człowieka w pionie ograniczona jest wysokością tych stref równą 1,2 m. Obie są umieszczone na wysokości 1,2 m od powierzchni podłogi.



a) b)

Rys. 1. Model pomieszczenia a) z podziałem na 27 stref o objętościach skończonych, b) z wyróżnieniem strefy A i B

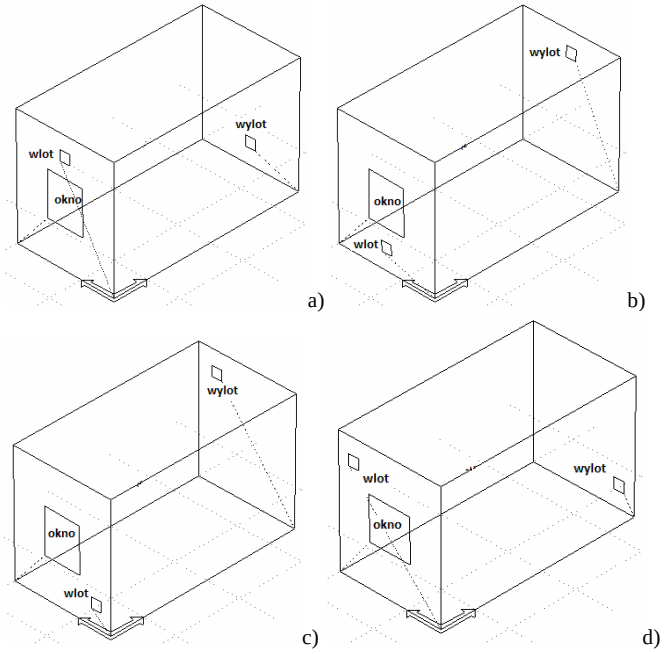
Fig. 1. The model of the room a) with the division for 27 zones of finite volumes, b) with the marking of the A and B zone

Analizy przeprowadzono zakładając, że pomieszczenie jest użytkowane przez jedną osobę. Prędkość przepływu przyjęto na poziomie 30 m^3/h. Ustalono, że strefa użytkowana jest od poniedziałku do piątku w godzinach 8:00 - 18:00. Całkowite zyski ciepła zostały określone jako 215 W/osobę [2], gdzie 100 W pochodzi od wyposażenia pomieszczenia w urządzenia elektroniczne. Założono, że promieniowanie słoneczne stanowi wystarczające źródło światła w godzinach 8:00 - 16:00, a zatem zyski ciepła od sztucznego oświetlenia przyjęto równe 10 W/m^2 w godzinach 16:00 - 18:00.

System wentylacyjny znajdujący się w pomieszczeniu można określić jako hybrydowy. Stanowi go zdecentralizowana, mechaniczna jednostka nawiewna, umieszczona w ścianie frontowej i doprowadzająca świeże powietrze, natomiast

odprowadzane jest ono w sposób grawitacyjny, wyciągiem wbudowanym w tylną ścianę pomieszczenia. Urządzenie wentylacyjne wyposażone jest w układ, dzięki któremu powietrze nawiewane utrzymuje stałą temperaturę równą 20°C. Strefa nie została wyposażona w system ogrzewania ani chłodzenia.

Przeprowadzono analizę czterech możliwych przypadków usytuowania w pomieszczeniu wlotów i wylotów powietrza. W modelu I jednostkę nawiewną umieszczono w centralnej części strefy nadokiennej, a wyciąg powietrza nad powierzchnią podłogi (Rys. 2.a)), w modelu II nawiew znajduje się pod oknem, wyciąg pod powierzchnią stropu (Rys. 2.b)). W modelach III i IV wloty i wyloty zlokalizowano po przekątnej względem siebie: w modelu III wlot w lewym górnym narożniku ściany frontowej, wylot w prawym dolnym narożniku ściany tylnej (Rys. 2.c)), w modelu IV powietrze nawiewano z poziomu prawego dolnego narożnika ściany frontowej, wywiew usytuowany był w lewym górnym narożniku ściany tylnej (Rys. 2.d)).

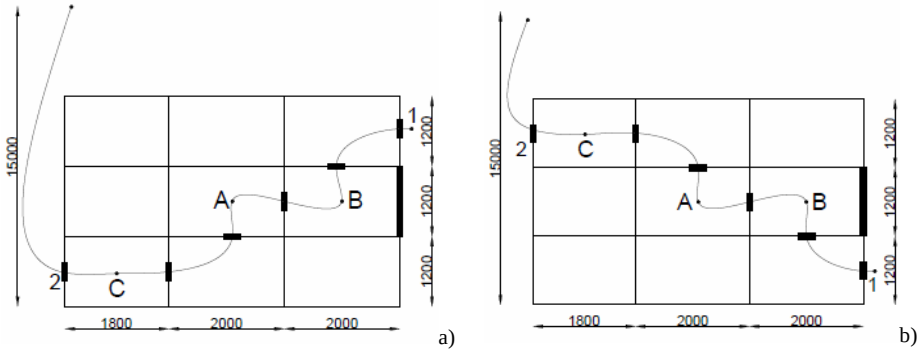


Rys. 2. Konfiguracja stref wlotu i wylotu powietrza w modelu a) I, b) II, c) III, d) IV

Fig. 2. Configuration deployment of inlet and outlet openings in the model a) I, b) II, c) III, d) IV

Dla wszystkich przypadków zaprojektowano sieć przepływu powietrza, składającą się z 5 węzłów (3 wewnętrzne – A, B i C oraz 2 zewnętrzne – 1 i 2, w których przepływ wywołany jest oddziaływaniem ciśnienia wiatru na powierzchnię elewacji) (Rys. 3.) Współczynnik rozkładu ciśnienia wiatru został określony w węźle wlotowym (1) jak dla ściany częściowo odsłoniętej, zaś dla

węzła wylotowego (2) jak dla dachu o kącie nachylenia mniejszym niż 10° [1]. Założono, iż odległość dachu budynku od podłogi rozpatrywanego pomieszczenia wynosi 15,0 m. Przepływy w węzłach są funkcją ciśnienia i właściwości komponentów, do których węzły są przyłączone. Dwie cechy komponentów były kluczowe dla analizy: obszar otworu i współczynnik rozładowania. Odpowiednie wartości tych współczynników przypisano do modelu, aby zapewnić średnią wielkość natężenia przepływu o wartości 30 m^3/h dla strefy biurowej.



Rys. 3. Przepływ powietrza w węzłowej sieci przepływu w modelach a) I i III, b) II i IV

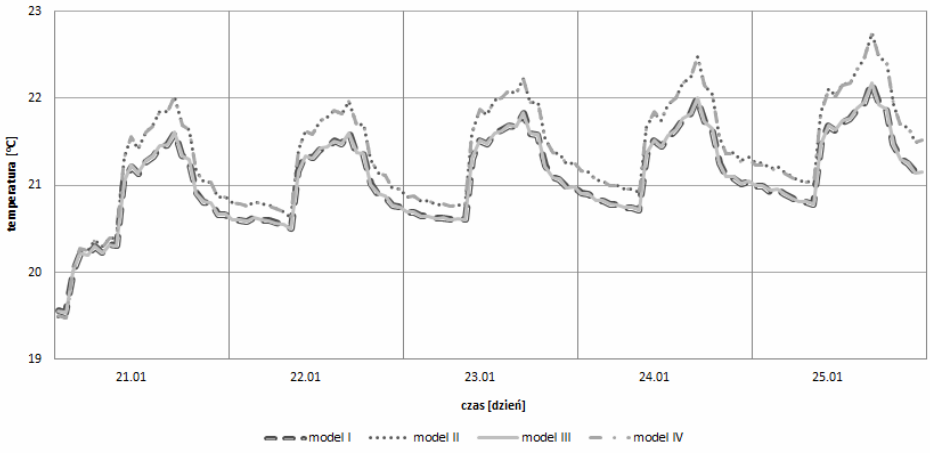
Fig. 3. The Air Flow Network in models a) I i III, b) II i IV

Wpływ przenoszenia ciepła i masy poprzez wewnętrzne strefy podziału obszaru modelu został pominięty ze względu na szczególne właściwości fizyczne przypisane do tych stref. Przegrody między nimi zostały określone za pomocą tzw. "fikcyjnych" materiałów, posiadających właściwości fizyczne jak dla cienkiej warstwy powietrza.

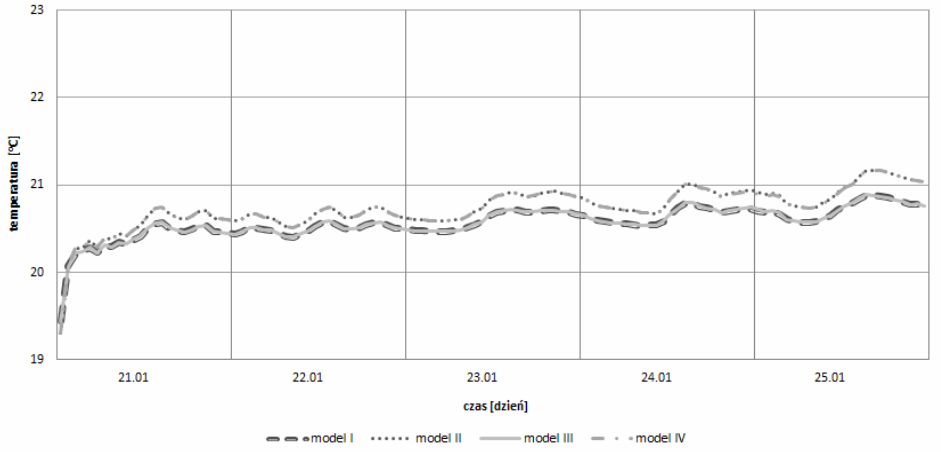
4. Wyniki

Symulacje przeprowadzono dla wybranych dwóch tygodni roboczych (poniedziałek – piątek): o najniższych i najwyższych średnich dobowych temperaturach. Były to odpowiednio okresy: od 21. do 25. stycznia oraz od 30. czerwca do 4. lipca. Zastosowano krok czasowy równy 60 minut.

Na Rys. 4. przedstawiono rozkład temperatur w wybranym tygodniu zimy, zarówno dla strefy A (Rys. 4a)) jak i dla strefy B (Rys. 4b)).Na Rys. 5. zobrazowano rozkład temperatur dla strefy A (Rys. 5a)) i B (Rys. 5b)) w tygodniu lata.

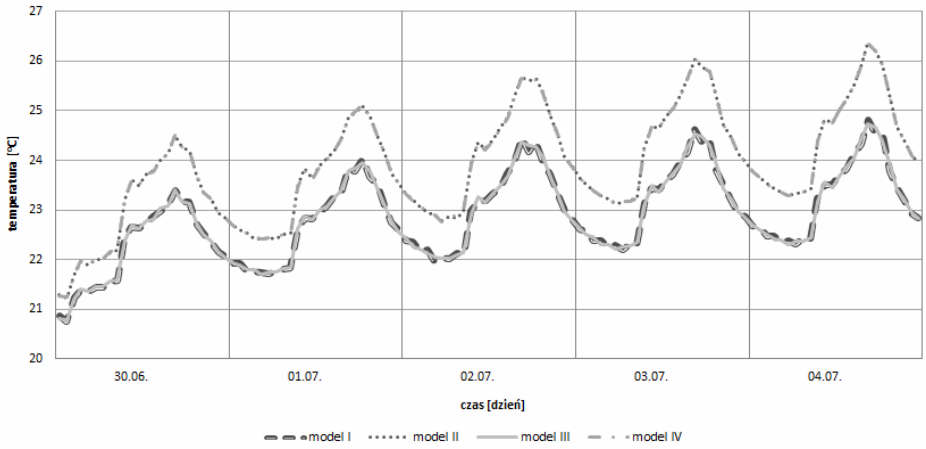


a)

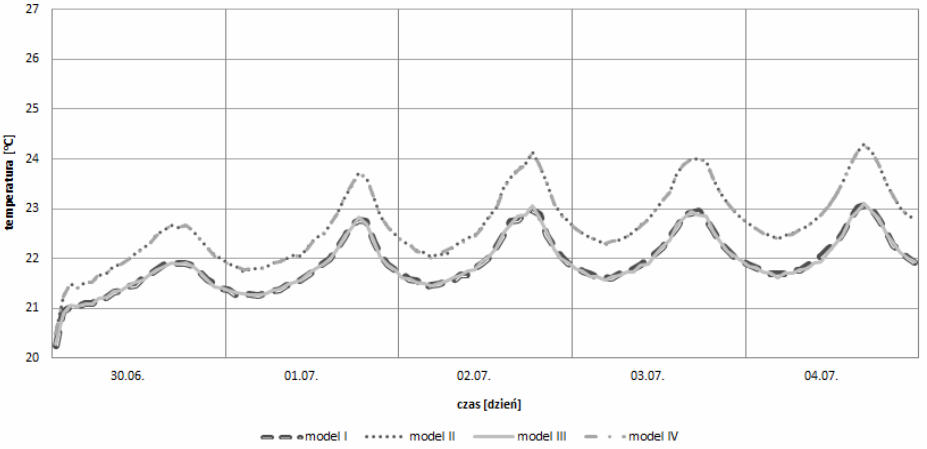


b)

Rys. 4. Rozkład temperatury wewnętrznej w najzimniejszym tygodniu roku a) w strefie A, b) w strefie B
Fig. 4. The internal temperature distribution in the coldest week of the year a) for zone A, b) for zone B



a)



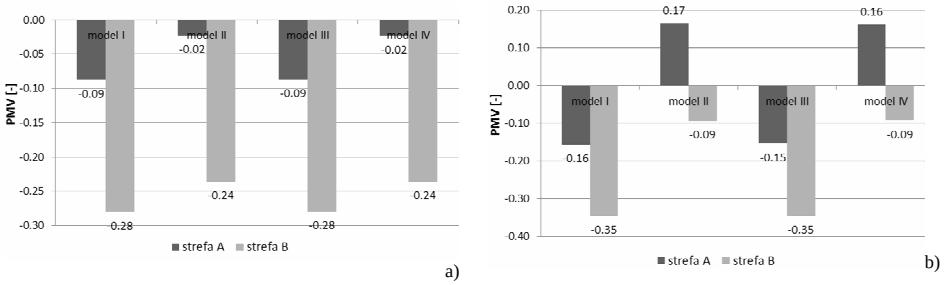
b)

Rys. 5. Rozkład temperatury wewnętrznej w najcieplejszym tygodniu roku a) w strefie A, b) w strefie B
Fig. 5. The internal temperature distribution in the hottest week of the year a) for zone A, b) for zone B

Można zaobserwować, iż wyniki są bardzo zbliżone dla modeli, w których wloty i wyloty powietrza usytuowano na tym samym poziomie (dla modelu I i III – wloty w górnej strefie przegrody pionowej, wyloty w dolnej oraz dla modelu II i IV – wloty w dolnej, wyloty w górnej strefie przegrody pionowej). W modelach II i IV temperatura w każdej ze stref jest wyższa niż w modelach I i III, niezależnie od okresu roku. Różnice temperatur między strefami różnią się i wynoszą, niezależnie od umiejscowienia nawiewu powietrza, około 0,5 K w styczniu oraz około 1 K w tygodniu letnim. Najniższa odnotowana w pomieszczeniu temperatura wynosi 19,3^{o}C i wystąpiła ona w styczniu

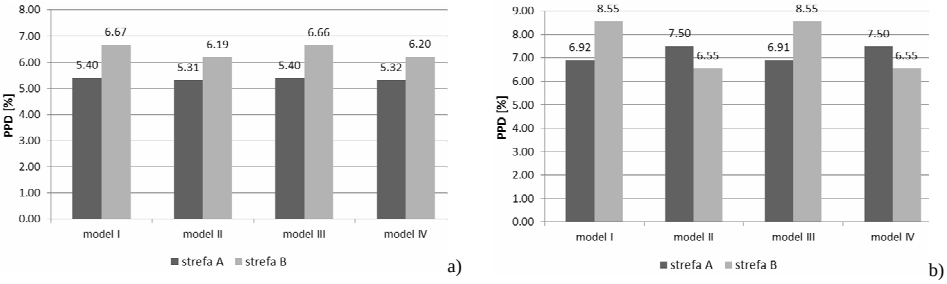
dla modelu III w strefie przy oknie, zaś najwyższa wartość temperatury to 26,2°C, wystąpiła latem w modelu II, w strefie oddalonej od okna.

Aby w łatwy sposób porównać warunki komfortu termicznego w pomieszczeniu dla wszystkich przypadków, wybrano jedynie wyniki uzyskane dla pojedynczych dni: o najniższej i najwyższej średniej dobowej temperaturze powietrza zewnętrznego (25. stycznia i 4. lipca). Na Rysunkach 6 i 7 przedstawiono średnie wartości wskaźników PMV i PPD dla tych dni w każdej ze stref.



Rys. 6. Średnie wartości wskaźnika PMV dla dni w roku o skrajnych średnich dobowych wartości temperatur a) 25.01, b) 04.07

Fig. 6. Average values of PMV index for days in the year of extreme daily mean temperature values a) 25.01, b) 04.07



Rys. 7. Średnie wartości wskaźnika PPD dla dni w roku o skrajnych średnich dobowych wartości temperatur a) 25.01, b) 04.07

Fig. 7. Average values of PPD index for days in the year of extreme daily mean temperature values a) 25.01, b) 04.07

W każdym przypadku warunki komfortu termicznego są zachowane. Średnie wartości wskaźnika PMV są zachowane w przedziale od -0,5 do +0,5, a wskaźnik PPD wyniósł mniej niż 10% w każdym rozpatrywanym przypadku.

W zimie mniejszy odsetek ludzi niezadowolonych z warunków panujących w pomieszczeniu uzyskano w modelach, w których wlot powietrza zlokalizowany jest w dolnej części ściany frontowej (model II i IV) i dla każdego przy-

padku korzystniejsze jest usytuowanie miejsca pracy w części środkowej pomieszczenia. wskaźnik PPD wyniósł mniej niż 10% w każdym rozpatrywanym przypadku.

W lecie, aby uzyskać jak najkorzystniejsze warunki komfortu cieplnego, należałoby sytuować biurka w części środkowej pomieszczenia w przypadkach, w których powietrze napływa z górnej strefy ściany frontowej (model I i III) i bliżej okna, gdy wlot jest u jej dołu (model II i IV).

5. Wnioski

Na podstawie wyników dokonanej analizy możliwe jest stwierdzenie, że sposób umiejscowienia w pomieszczeniu wlotów i wylotów powietrza wentylacyjnego, warunkuje sposób przepływu powietrza oraz ma wpływ na rozkład temperatury w jego wnętrzu. Odpowiednio zaprojektowany system wentylacji wraz z przemyślanym usytuowaniem miejsc pracy, pozwala na osiągnięcie bardzo dobrych parametrów komfortu termicznego.

Ponadto przeprowadzona symulacja pozwala wyciągnąć wniosek, że instalując zdecentralizowane systemy wentylacji z układem umożliwiającym utrzymywanie stałej temperatury powietrza nawiewanego, nie ma konieczności wyposażenia budynku w systemy ogrzewcze czy chłodzące. Wykorzystując do zasilania takiego systemu energię pochodzącą z odnawialnych źródeł, np. paneli fotowoltaicznych, możliwe jest osiągnięcie bardzo dobrych parametrów komfortu termicznego przy minimalnym zużyciu energii.

Literatura

[1] Clarke J.A.: Energy simulation in building design, 2nd-edition, Butterworth-Heineman, Oxford, 2001

[2] Comstock W.S.: ASHRAE Handbook – Fundamental, Chapter 29, Nonresidential Cooling and Heating Load Calculations, 2001

[3] Djongyang N., Tchinda R., Njomo D.: Thermal comfort: A review paper, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol. 14, Issue 9, s. 2626-2640, 2010

[4] Fanger P.O..: Komfort cieplny, Arkady, Warszawa 1974

[5] Hensen J.L.M., Lamberts R.: Building Simulation for Design and Operation, Spon Press, 2011

[6] Narowski P., Janicki M., Heim D.: Comparison of Untypical Meteorological Years (UMY) and their influence on building energy performance simulations, Proc. of Conference "Building Simulation - BS2013". Le Bourget-du-Lac, 2013, pp.1414-1421

[7] Olesen B.W., Parsons K.C.: Introduction to thermal comfort standards and to the proposed new version of EN ISO 7730, Energy and Buildings, vol. 34, s.537-548, 2002

[8] Śliwowski L.: Mikroklimat wnętrz i komfort cieplny ludzi w pomieszczeniach, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 1999

THERMAL COMFORT IN A ROOM WITH A DECENTRALIZED, MECHANICAL AIR SUPPLY SYSTEM

S u m m a r y

The article presents an analysis of the parameters of thermal comfort in a room designed for office work and occupied during the day. For the study purpose air flow network models were developed for a room divided into finite volumes. Maintenance of constant air temperature in the inlet zone (20°C) and its distribution by the natural convection were assumed. Four configurations deployment of inlet and outlet openings were analysed. Parameters of PMV and PPD for the selected zones corresponding to the possible location of a man working at a desk: in the middle of the room and at the window, were determined for individual cases. The results of the simulations have confirmed that the thermal comfort in the room was maintained for each of the considerated options.

Keywords: mechanical ventilation, air flow, internal temperature, thermal comfort, simulation

Przesłano do redakcji: 24.03.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.53

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 249-258

Karolina KURTZ-ORECKA[1]
Piotr CIERZNIEWSKI[2]

PROBLEMATYKA TERMOMODERNIZACJI W BUDYNKACH ZABYTKOWYCH I DAWNYCH

Znaczna część istniejących zasobów budowlanych datowana jest przed 1945 r. Na skutek upływającego czasu budynki te ulegają naturalnej dekapitalizacji. Przy zachowaniu oryginalnej konstrukcji, niemodernizowanego wyposażenia technicznego i instalacyjnego charakteryzują się wysokim zużyciem energii oraz znacznymi kosztami utrzymania. Redukcja zapotrzebowania na energię do celów ogrzewania i wentylacji w wielu przypadkach jest zadaniem trudnym, a czasem wręcz niemożliwym. Wynika to z ograniczeń różnej natury – technicznych, technologicznych, a często również prawnych. Jednym z ograniczeń może być ochrona budynku uwarunkowana względami konserwatorskimi. W artykule przedstawiono zagadnienia związane z termomodernizacją budynków zabytkowych i dawnych na wybranej grupie 10 obiektów stanowiących budynki biurowe, opieki zdrowotnej oraz usługowe. Bazą informacji o obiektach są wykonane audyty energetyczne – termomodernizacyjne, oświetlenia wbudowanego oraz efektywności energetycznej. Poza usprawnieniami ograniczającymi zużycie energii na cele ogrzewania i wentylacji analizowano również możliwość zredukowania potrzeb związanych z oświetleniem wbudowanym. W zależności od stanu zachowania budynków oraz narzuconych ograniczeń zakres proponowanych usprawnień był zróżnicowany, jednak w każdym przypadku wskazano możliwość redukcji zapotrzebowania na ciepło w granicach od 15 do 92 %, a w przypadku oświetlenia wbudowanego od 18 do 64 % w odniesieniu do stanu wyjściowego. Oszacowano, że wykonanie inwestycji przyczyniłoby się do redukcji emisji dwutlenku węgla do atmosfery od 9,72 do ponad 400 Mg CO_2 rocznie.

Słowa kluczowe: termomodernizacja, budynki zabytkowe, audyt energetyczny, efektywność energetyczna, oświetlenie wbudowane

1. Wprowadzenie

W krajobrazie urbanistycznym Polski i Europy znacząca część budynków datowana jest na okres przed 1945 r. Z uwagi na czas powstania, przeznaczenie,

[1] Autor do korespondencji: Karolina Kurtz-Orecka, WBiA ZUT w Szczecinie, KDMiMB, 70-311 Szczecin al. Piastów 50, tel. 608-691-975, karolinakurtz@gmail.com
[2] Piotr Cierzniewski, WE ZUT w Szczecinie, KEiNE, 70-313 Szczecin ul. Sikorskiego 37, tel. 91-449-42-70, Piotr.Cierzniewski@zut.edu.pl

sposób użytkowania, obiekty te ulegają naturalnej dekapitalizacji. Ich cechą znamienną jest niski poziom izolacyjności termicznej przegród oraz niezadawalająca sprawność systemów technicznych. Deficyt walorów użytkowych oraz wysokie koszty utrzymania będące skutkiem dużej energochłonności obiektów dawnych, sprzyjają sytuacji zaprzestania ich użytkowania na rzecz budynków nowocześniejszych, a samo wyłączenie obiektu z użytkowania gwałtownie przyśpiesza proces jego degradacji. Szansą na przetrwanie cennych realizacji jest zatem przemyślana i prawidłowo przeprowadzona termomodernizacja, dająca poprawę warunków użytkowych, ale jednocześnie przeprowadzona z pełnym poszanowaniem dla zachowanej substancji zabytkowej.

Zagadnienie termomodernizacji obiektów zabytkowych pojawia się w opracowaniach wielu autorów [m.in. 1, 3, 4, 5, 8, 9, 10, 11], co dowodzi istotności tematyki i stale trwających poszukiwań racjonalnego podejścia do dawnej tkanki budowlanej. Proponowane rozwiązania powinny z jednej strony minimalizować ingerencję w obiekt, z drugiej – skutkować zmniejszeniem zużycia energii na cele grzewcze, zapewnieniem poprawności stanu cieplno-wilgotnościowego przegród oraz polepszeniem komfortu cieplnego użytkowników. Samo znaczenie termomodernizacji zaczyna ewoluować w kierunku rozwiązań nie tylko poprawiających jakość cieplną budynku czy sprawność systemów technicznych, ale coraz częściej odnosi się do całościowego kontekstu użytkowania energii, w tym również w zakresie oświetlenia wbudowanego czy wyposażenia niebędącego składowymi systemów technicznych.

Zagadnienia związane z termomodernizacją budynków zabytkowych i dawnych przedstawione zostaną na wybranych przykładach obiektów, dla których wykonano audyty energetyczne – termomodernizacyjne, oświetlenia wbudowanego oraz efektywności energetycznej.

2. Efektywność energetyczna budynków zabytkowych i dawnych

Ocenie efektywności energetycznej poddano grupę 10 obiektów datowanych na okres od końca XIX do 1. połowy XX w. (tabela 1). Obiekty pełnią funkcję biurową, opieki zdrowotnej i usługową. Wszystkie wzniesiono w konstrukcji tradycyjnej murowanej z cegły ceramicznej pełnej, jedynie budynek B7 posiada żelbetowy układ nośny z ceramicznym wypełnieniem ścian. Budynki B3 i B6 mają elewacje ceglane akcentowane detalem wykonanym z barwionej w masie, szkliwionej cegły. Ściany obiektu OZ posiadają wyprawę tynkarską oraz detal w postaci ceglanych gzymsów i opasek okiennych, pozostałe budynki są tynkowane wyprawami tradycyjnymi. Budynek U został oszalowany w partii piętra, zaś B8 posiada dekoracyjne opaski okienne wykonane z piaskowca i szlifowanych bloków betonowych. Obiekty zaopatrywane są w energię głównie ze źródeł lokalnych: B2, B3, B5, B6 i B8 z kotłowni gazowej, U i B7 – węglowej. Budynki OZ i B1 zaopatrywane są w ciepło z zewnętrznej sieci ciepłowniczej (stan wyjściowy).

Tabela 1. Podstawowe dane analizowanych obiektów

Table 1. Basic data of analyzed buildings

Funkcja budynku, oznaczenie		***Datowanie***	***Powierzchnia użytkowa, m^2***	***Kubatura ogrzewana, m^3***	***A/V, m^2/m^3***
Usługowa	*U*	*k. XIX w.*	*820*	*2435*	*0,60*
Opieka zdrowotna	*OZ*	*XIX/ XX w.*	*1799*	*5945*	*0,33*
Biurowa	*B1*	*lata 30. XX w.*	*412*	*1234*	*0,35*
Biurowa	*B2*	*lata 40. XX w.*	*438*	*1208*	*0,48*
Biurowa	*B3*	*1. poł. XX w.*	*527*	*1401*	*0,46*
Biurowa	*B4*	*1. poł. XX w.*	*611*	*1862*	*0,35*
Biurowa	*B5*	*1. poł. XX w.*	*981*	*2842*	*0,41*
Biurowa	*B6*	*1. poł. XX w.*	*1007*	*3290*	*0,39*
Biurowa	*B7*	*lata 30. XX w.*	*4805*	*13880*	*0,28*
Biurowa	*B8*	*lata 30. XX w.*	*10240*	*51691*	*0,26*

2.1. Zapotrzebowanie na energię do celów ogrzewania i wentylacji

Zakres proponowanych przedsięwzięć termomodernizacyjnych w poszczególnych budynkach wynikał ze stanu ich zachowania i wtórnego zainwestowania, a w przypadku budynków wpisanych do rejestru zabytków lub gminnej ewidencji zabytków – ze wskazań służb konserwatorskich.

W tabeli 2 zestawiono:

- rozpatrywane usprawnienia termomodernizacyjne,
- średnioważony współczynnik przenikania ciepła obudowy $U_{C,śr}$,
- jednostkowe zapotrzebowanie na energię końcową do celów ogrzewania i wentylacji EK_H,
- roczny koszt ogrzewania 1 m^2 powierzchni użytkowej,
- oszczędność energii wynikającą z proponowanych usprawnień,
- prosty czas zwrotu proponowanych rozwiazań.

Symbolem 0 oznaczono stan wyjściowy, 1 – z wprowadzeniem proponowanych usprawnień. Oszacowany w stanie wyjściowym wskaźnik zapotrzebowania na energię końcową na potrzeby ogrzewania, w większości rozpatrywanych przypadków jest zbieżny z wielkością podawaną w literaturze [12] wynoszącą od 240 do 350 kWh/(m^2K) dla budynków wzniesionych do 1966 r. Koszty ogrzewania budynków przed termomodernizacją porównywalne są z danymi zaczerpniętymi z [12] – ok. 42,3 zł/m^2 rocznie, jedynie w przypadku budynków dużych, o stosunkowo niskim współczynniku kształtu (budynki oznaczone jako B7 i B8 – tabela 1).

Tabela 2. Rozpatrywane działania termomodernizacyjne wraz z ich oceną zintegrowaną
Table 2. Considered thermo modernization actions including their integrated assessment

Usprawnienie/ Opis		***Oznaczenie budynku***									
		U	***OZ***	***B1***	***B2***	***B3***	***B4***	***B5***	***B6***	***B7***	***B8***
Podłoga na gruncie		×/-									
Ściany w kontakcie z gruntem		×	×		×					×	×
Ściany nadziemia		×	×/-	×	×		×	×		×	×
Dach		×	×	×			×			×	
Strop poddasza		×			×	×	×	×		×	×
Ściany wewnętrzne								×			
Okna		×	×						×/-	×	×/-
Drzwi zew.		×	×							×	×
Wentylacja		×	×							×	×
System c.o.		×	×							×	×
$U_{C,śr}$, $W/(m^2K)$	*0*	*1,58*	*0,97*	*0,62*	*1,04*	*1,0*	*0,57*	*1,0*	*0,87*	*1,69*	*0,74*
	1	*0,23*	*0,50*	*0,49*	*0,36*	*0,80*	*0,34*	*0,37*	*0,68*	*0,31*	*0,41*
EK_H, $kWh/(m^2rok)$	*0*	*448,3*	*271,4*	*460,8*	*178,7*	*323,2*	*354,7*	*275,0*	*306,9*	*315,7*	*151,5*
	1	*105,2*	*147,3*	*328,6*	*70,8*	*271,5*	*261,2*	*152,1*	*261,7*	*112,2*	*75,3*
Roczny koszt ogrzewania, $zł/m^2$	*0*	*225,30*	*87,50*	*33,85*	*82,43*	*49,49*	*55,75*	*62,49*	*49,49*	*12,83*	*17,91*
	1	*14,24*	*40,33*	*24,96*	*38,52*	*42,18*	*42,84*	*36,34*	*42,18*	*7,68*	*13,50*
Oszczędność, %		*92*	*56*	*29*	*34*	*16*	*26*	*45*	*15*	*64*	*52*
SPBT, lata		*7*	*21*	*19*	*18*	*5*	*17*	*6*	*9*	*15*	*36*

W termomodernizacji budynków zabytkowych problematyczne jest ocieplenie ścian zewnętrznych, głównie ze względu na ochronę często dekorowanych elewacji. Ocieplenie ścian zaproponowano w przypadku budynków U, OZ, B1, B2, B4, B5, B7 i B8. W przypadku budynku OZ przewidziano wykonanie wtórnych wypraw zewnętrznych z wykorzystaniem tynku termoizolacyjnego, w budynku U – ocieplenie płytami z twardej wełny mineralnej z odtworzeniem na siatce Rabitz'a tynku zewnętrznego wg oryginalnych receptur, zaś w przestrzeni pierwszego piętra odtworzenie charakterystycznego w tym obiekcie szalowania ścian. Stan tynków zewnętrznych budynku B8 kwalifikował je do skucia. Usprawnienie termomodernizacyjne przewidywało wykonanie wtórnej izolacji termicznej z płyt z piany fenolowej grubości 2 cm a następnie odtworzenie na siatce Rabitz'a tynku zewnętrznego.

Usprawnienie systemu ogrzewania wraz z pracami w obrębie źródła ciepła zaproponowano w budynkach U, OZ, B7 i B8. Budynek U zlokalizowany jest na terenie objętym programem ochrony przyrody Natura 2000, stąd zaproponowano zastąpienie istniejącej kotłowi węglowej pionową gruntową pompą ciepła. Sąsiedztwo trasy przebiegu miejskiej sieci ciepłowniczej w przypadku budynku B7 pozwoliło na zaprojektowanie węzła cieplnego w miejsce istniejącej, nisko sprawnej kotłowni węglowej.

Zależnie od zakresu możliwych do realizacji i proponowanych usprawnień (tabela 2), szacowana roczna oszczędność zużycia energii na cele ogrzewania i wentylacji w rozpatrywanej grupie waha się od 15 do 92%. Największym potencjałem termomodernizacyjnym charakteryzuje się budynek U, będący jednocześnie obiektem najstarszym. W jego przypadku zaproponowano również najszersze spektrum działań.

2.2. Zapotrzebowanie na energię na cele oświetlenia wbudowanego

Z uwagi na funkcję niemieszkalną omawianych budynków każdorazowo analizowano usprawnienia systemu oświetlenia wbudowanego. W tabeli 3 zestawiono następujące informacje:

- rozpatrywane usprawnienia w zakresie oświetlenia wbudowanego,
- jednostkowe zapotrzebowanie na energię końcową do celów oświetlenia EKL,
- roczny koszt oświetlenia światłem sztucznym 1 m^2 pomieszczeń,
- oszczędność energii zużywanej na oświetlenie wbudowane w wyniku zaproponowanych rozwiązań,
- prosty czas zwrotu inwestycji.

Analogicznie do tabeli 2, symbolem 0 oznaczono stan wyjściowy, 1 – z wprowadzeniem proponowanych usprawnień. W zestawieniu nie podano wyników dla budynku usługowego ze względu na dewastację instalacji i niemożność opisu stanu wyjściowego. Na podstawie przeprowadzonych oględzin budynków stwierdzono, że w pomieszczeniach do oświetlenia wbudowanego w wielu

przypadkach stosowano żarowe źródła światła. Ich moc stanowi średnio 15,8% mocy zainstalowanej i oświetlają one 11,9% powierzchni analizowanych obiektów. Moc świetlówek kompaktowych stanowi średnio 7,1% mocy wszystkich zainstalowanych źródeł i oświetlają średnio 23,1% powierzchni. Natomiast moc zainstalowana w oprawach z rurami jarzeniowymi wynosi 57,1% i oświetlają one 65% powierzchni. W zainstalowanych oprawach jarzeniowych układy zapłonowo-stabilizujące są układami elektromagnetycznymi o niskich stratach, posiadającymi zbyt niską klasę – C sprawności energetycznej. Wiele opraw źródeł jarzeniowych była uszkodzona, z pozdejmowanymi bądź połamanymi rastrami, co sprzyja powstaniu olśnienia przeszkadzającego. Średnia ważona jednostkowa moc na potrzeby oświetlenia wbudowanego wyniosła 100 kW.

Tabela 3. Rozpatrywane działania w zakresie oświetlenia wbudowanego

Table 3. Tasks taken under Consideration in the built-in lighting system

Usprawnienie/ Opis		***Oznaczenie budynku***									
		U	***OZ***	***B1***	***B2***	***B3***	***B4***	***B5***	***B6***	***B7***	***B8***
Stateczniki w oprawach jarzeniowych		-	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Oprawy oświetleniowe		-	×	×	×	×	×	×	×	×	×
Źródeł światła		-	×	×	×	×	×	×	×	×	×
EK_L, kWh/(m^2rok)	*0*	-	*123,2*	*92,2*	*115,9*	*86,1*	*87,6*	*87,7*	*86,3*	*119,0*	*119,5*
	1	-	*76,4*	*62,5*	*95,1*	*70,6*	*64,7*	*63,1*	*68,7*	*44,9*	*80,4*
Roczny koszt Zużycia energii, zł/ (kWh m^2)	*0*	-	*65,54*	*51,72*	*65,02*	*26,42*	*49,14*	*26,92*	*26,49*	*67,70*	*74,06*
	1	-	*40,64*	*35,06*	*53,35*	*21,67*	*36,30*	*19,37*	*21,08*	*25,54*	*49,82*
Oszczędność, %		-	*38*	*32*	*18*	*18*	*23*	*37*	*20*	*64*	*33*
SPBT, lata		-	*3*	*1*	*3*	*6*	*2*	*3*	*5*	*7*	*2*

W usprawnieniach systemu oświetlenia wbudowanego na podstawie postanowień [7] rozpatrywano zastąpienie stateczników magnetycznych (EEI C) statecznikami elektronicznymi (EEI A), wymianę uszkodzonych opraw oraz zastąpienie żarowych źródeł światła świetlówkami kompaktowymi.

Przedstawione w tabeli 3 wyniki wskazują na znaczny potencjał redukcji zapotrzebowania na energię przez system oświetlenia wbudowanego. Należy zwrócić uwagę, że oszacowane czasy zwrotu inwestycji praktycznie będą jeszcze krótsze w wyniku poprawy żywotności rur jarzeniowych współpracujących ze statecznikami elektromagnetycznymi klasy A, a w związku z tym znacznie rzadszej ich awaryjności.

2.3. Emisja dwutlenku węgla do atmosfery

Poza efektywnością energetyczną, usprawnienia ocenia się pod kątem potencjalnego ograniczenia emisji. W tablicy 4 zestawiono wielkość emisji CO_2 rozdzielnie – w odniesieniu do zaproponowanych działań ograniczających zapotrzebowanie na energię na cele ogrzewania i wentylacji oraz oświetlenia wbudowanego, a także przedsięwzięć łącznych. Procentowa redukcja emisji w zadaniach cząstkowych wahała się w granicach od 3 do 94 % w przypadku systemu ogrzewania i wentylacji oraz od 18 do 63 % w przypadku oświetlenia wbudowanego. Zróżnicowanie możliwości redukcji emisji CO_2 pomiędzy zadaniami wynika głównie z wieku analizowanej substancji – w przypadku struktury budowlanej w większości przypadków była to oryginalna tkanka o wysokiej energochłonności, natomiast system oświetlenia wbudowanego bazujący często na oryginalnej instalacji elektrycznej, w zakresie opraw i źródeł oświetlenia jest już wtórny, na co wskazuje znaczący udział źródeł jarzeniowych wykorzystywanych do oświetlenia pomieszczeń.

3. Termomodernizacja zabytków a decyzje konserwatorskie

Audyt termomodernizacyjny jest formą analizy wykonalności przedsięwzięcia ograniczającego koszty eksploatacyjne budynku związane ze zużyciem energii oraz podnoszącego komfort użytkowania obiektu. W swoim zakresie powinien wskazywać usprawnienia optymalne do realizacji w przyjętych kryteriach oceny ekonomicznej i energetycznej oraz zachowania poprawności warunków fizykalnych, w tym cieplno-wilgotnościowych. Wśród osób decyzyjnych zajmujących się konserwacją zabytków często pojawia się błędne przekonanie o znaczeniu i funkcji audytu energetycznego mylonego ze świadectwem charakterystyki energetycznej. Świadczy o tym np. zapis: „Stare kamienice (…) wyłączone są z obowiązku wykonania audytu energetycznego”, który można znaleźć wśród rad urzędu konserwatora zabytków dotyczących możliwości poprawy izolacyjności cieplnej budynków zabytkowych [13]. Ponadto często wskazuje się, że przy braku możliwości realizacji docieplenia od strony zewnętrznej można je wykonać od wewnątrz z zastosowaniem np. wełny skalnej układanej między rusztem stalowym lub drewnianym z uzupełnieniem warstw izolacją paroprzepuszczalną oraz płytą gipsowo kartonową [13]. Przywołane tu błędne rozwiązanie, wynika prawdopodobnie z niezrozumienia przez osoby

zamieszczające tę informację istoty działania izolacji paroszczelnych i paroprzepuszczalnych. Szczegółowa analiza cieplno-wilgotnościowa izolacji cieplnej wykonanej od wewnątrz omówiona została m.in. w [2, 11].

Tabela 4. Ocena redukcji emisji CO_2

Table 4. Assessment of reduction in CO_2 emissions

Usprawnienie/ Opis		***Oznaczenie budynku***									
		U	***OZ***	***B1***	***B2***	***B3***	***B4***	***B5***	***B6***	***B7***	***B8***
Emisja – system ogrzewania i wentylacji, Mg CO_2/ rok	*0*	*96,91*	*273,41*	*35,71*	*39,20*	*37,37*	*24,93*	*29,39*	*53,59*	*469,39*	*442,0*
	1	*5,43*	*120,94*	*25,46*	*15,79*	*31,47*	*18,36*	*18,54*	*51,73*	*170,93*	*230,0*
Uniknięcie emisji, %		*94*	*56*	*29*	*60*	*16*	*26*	*37*	*3*	*64*	*48*
Emisja – oświetlenie wbudowane Mg CO_2/ rok	*0*	-	*63,51*	*16,28*	*20,89*	*21,33*	*9,86*	*54,09*	*46,57*	*169,62*	*629,0*
	1	-	*39,28*	*10,92*	*17,12*	*17,50*	*7,27*	*29,91*	*37,32*	*63,48*	*423,0*
Uniknięcie emisji, %			*38*	*33*	*18*	*18*	*26*	*45*	*20*	*63*	*33*
Łączne uniknięcie emisji, Mg CO_2/ rok		*91,48*	*176,70*	*15,61*	*27,18*	*9,73*	*9,16*	*35,03*	*11,11*	*404,60*	*418,0*
Łączne uniknięcie emisji, %		*94*	*52*	*30*	*45*	*17*	*26*	*42*	*11*	*63*	*39*

Niewłaściwe wydaje się również wydawanie wytycznych konserwatorskich podających jedynie maksymalną grubości termoizolacji, na którą urząd wydaje zgodę, bez dodatkowych uwag na temat interakcji pomiędzy zachowaną tkanką a możliwymi do zaimplementowania nowoczesnymi materiałami budowlanymi. O zgubnym wpływie niekompatybilności współczesnych materiałów lub współczesnych rozwiązań technicznych wprowadzanych w strukturę starej budowli wspomina Rouba w [6]. Niepełne wskazanie konserwatorskie może implikować swoisty poligon doświadczalny, w którym zabytek z reguły stoi na straconej pozycji.

4. Podsumowanie

Poprawa komfortu użytkowania obiektów zabytkowych powinna leżeć we wspólnym interesie prezentowanym zarówno przez samych użytkowników jak również prze urząd ochrony zabytków – obiekt niedostosowany do podstawowych potrzeb współczesnego życia bardzo często ulega degradacji na skutek zaprzestania jego użytkowania w wyniku zbyt wysokich kosztów utrzymania oraz braku komfortu użytkowania, głównie związanego z komfortem cieplnym.

Poza wskazanymi w artykule tradycyjnymi usprawnieniami termomodernizacyjnymi coraz częściej wprowadzane są rozwiązania nowoczesne, jak metoda ocieplenia przegród od strony wewnętrznej „In" [11] czy tworzenie buforów cieplnych poprzez wprowadzenie zewnętrznej fasady szklanej [8].

Literatura

[1] Jaworska-Michałowska M., Ochrona historycznej elewacji w procesie termomodernizacji – wybrane zagadnienia. Budownictwo. Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej, 2-B/2009, Zeszyt 9, str. 151-161.

[2] Kurtz K., Garbalińska H., Zapewnienie właściwych warunków cieplno-wilgotnościowych w adaptowanych budynkach poprodukcyjnych. Ogólnopolska Konferencja GUNB „Problemy techniczno-prawne utrzymania obiektów budowlanych", Warszawa 2012 r.

[3] Kurtz K., Paszkowski Z.W.: Problemy energetyczne przy przebudowie obiektu zabytkowego na przykładzie budynku Starej Dany w Szczecinie. „Wiadomości Konserwatorskie", Nr 26/2009, str. 518-528

[4] Lichołai L., Gosztyła M., Aplikacja systemów helioenergetycznych w zabytkową strukturę obiektów kościelnych. [W:] Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, z. 47. Energia odnawialna – Innowacyjne idee i technologie dla budownictwa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2008, s. 243-248.

[5] Łagowska Z. Remont i przebudowa zabytku. e-magazyn „Termomodernizacja", 4/2012 http://www.termomodernizacja.com.pl/prawo-i-finansowanie/remont-i-przebudowa-zabytku.html [dostęp: 26 kwietnia 2014 r.].

[6] Rouba B.J., Modernizacja zabytku droga do jego rewitalizacji? [W:] Problemy remontowe w budownictwie ogólnym i obiektach zabytkowych. Praca zbiorowa pod red. Jasieńki J., Klimka A, Matkowskiego Z., Schabowicza K., Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2006, str. 92-101.

[7] Rozporządzenie Komisji (WE) NR 245/2009 z dn. 18.03.2009 r. w sprawie wykonania dyrektywy 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego Rady w odniesieniu do wymogów dotyczących ekoprojektu dla lamp fluorescencyjnych bez wbudowanego statecznika, dla lamp wyładowczych dużej intensywności, a także dla stateczników i opraw oświetleniowych służących do zasilania takich lamp, Dz.U. UE 24.03.2009 L 76/17)

[8] Swarcewicz A., Kurtz-Orecka K., Wykorzystanie podwójnej fasady w termomodernizacji budynków zabytkowych – studium przypadku. [W:] Kierunki rozwoju bu-

downictwa energooszczędnego i wykorzystania odnawialnych źródeł energii na terenie Dolnego Śląska. Praca zbiorowa pod red. Bać A., Kasperski J., Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013, str. 175-184.

[9] Szymczak Cz., Problemy rewitalizacji budowli miejskich podejmowane w Centrum CURE. [W:] Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, z. 40. Energia odnawialna – Innowacyjne idee i technologie dla budownictwa. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2006, s. 499-504.

[10] Święcka E., Czy zostaną tylko dokumentacje …? [W:] System ochrony zabytków w Polsce – analiza, diagnoza, propozycje. Praca zbiorowa pod red. Szmygina B., Polski Komitet Narodowy ICOMOS, Biuro Stołecznego Konserwatora Zabytków Urzędu Miasta Stołecznego Warszawy, Politechnika Lubelska. Lublin – Warszawa 2011, str. 105-110.

[11] Wójcik R., Rewitalizacja i remonty budynków zabytkowych w aspekcie oszczędności energetycznej. VIII Dni oszczędzania energii, Wrocław 2010.

[12] Żurawski J., Energochłonność budynków mieszkalnych. Miesięcznik „Izolacje" nr 2/2008, str. 26-29.

[13] http://www.mwkz.pl/konserwator-radzi [dostęp: 26 kwietnia 2014 r.].

THE ISUE OF TERMOMODERNIZATION IN OLD AND HERITAGE BUILDINGS

S u m m a r y

A large part of the existing building is dated before 1945. As a result of the passage of time these buildings becomes of depreciation. While keeping the original design, the technical equipment these buildings are characterized by high energy consumption and significant maintenance costs. Reduction of energy demand in many cases is difficult and sometimes impossible. This results from the restrictions of various kinds - technical, technological, and often legal.

The article presents the issues related to the thermal efficiency of historic buildings on a selected group of 10 objects representing office buildings, health care facilities and services. A database of these objects is taken from thermo modernization, built-in lighting and energy efficiency audits. In addition to improvements of energy consumption demand for heating and ventilation there was analyzed also the possibility of reducing lighting needs built. In addition to improvements of energy demand for heating and ventilation there was also analyzed the possibility of reducing energy needs for built-in light system. Depending on the state of preservation of the buildings, and imposed restrictions the scope of the proposed improvements was varied. Enhancements have made it possible to obtain a reduction of the heat demand in old and historic buildings ranging from 15 to 92%, and in the case of built-in lighting system from 18 to 64% relative to baseline. It has been estimated that the implementation of the investment would contribute to reducing carbon dioxide emissions into the atmosphere from 9.72 to over 400 Mg of CO2 per year.

Keywords: thermal modernization, heritage buildings, energy audit, energy efficiency, build in light

Przesłano do redakcji: 02.06.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.54

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 259-264

Radosław KURZYP[1]

MOŻLIWOŚĆ ZASTOSOWANIA TECHNOLOGII WZNOSZENIA BUDYNKÓW WIELKOPRZESTRZENNYCH W BUDOWNICTWIE JEDNORODZINNYM W ASPEKCIE OCHRONY ŚRODOWISKA NATURALNEGO

Technologia tworzenia ekologicznych budynków mieszkalnych PlusDOM, powstała w wyniku poszukiwań takich rozwiązań architektonicznych, które jak najmniej szkodziłyby zanieczyszczonemu przez współczesną cywilizację środowisku przyrodniczemu. Cechą charakterystyczną tej technologii jest wykorzystanie do budowy specjalnego szkieletu, wykonanego z drewna klejonego, stanowiącego samonośną konstrukcję, wzorowaną na budownictwie wielkoprzestrzennym. Taki szkielet można dowolnie kształtować w przestrzeni. Ponadto, można wypełniać go różnym materiałem organicznym o minimalnym stopniu przetworzenia, jak np. lekka glina, słoma lub kamienie. Zaletą tej technologii jest możliwość pozyskiwania surowców do wypełnienia konstrukcji znajdującej się w bliskim otoczeniu docelowej lokalizacji budynku, zwłaszcza jeśli miejscem tym będą tereny porolne w krajobrazie rolniczym. Dodatkowo, domy w technologii PlusDOM są relatywnie tanie i stanowiłyby budownictwo jednorodzinne, będące alternatywą dla komunalnych bloków mieszkalnych. Ma to istotne znaczenie gospodarcze i społeczne. Z punktu widzenia ochrony środowiska przyrodniczego, domy w technologii PlusDOM, wykonywane z naturalnych, łatwych do biodegradacji surowców, energooszczędne oraz niskoemisyjne stanowią przykład nowoczesnego rozwiązania problemu niekorzystnego wpływu budownictwa na środowisko. Prezentowana technologia pozwala na budowę domów nawet w bliskim sąsiedztwie terenów chronionych (np. rezerwatów, parków krajobrazowych i obszarów Natura 2000). Proponowanymi siedliskami, gdzie można by najłatwiej budować w technologii PlusDOM są odłogi w krajobrazie rolniczym. Celem niniejszej pracy jest ocena ekologicznych, ekonomicznych oraz społecznych wartości autonomicznych domów realizowanych w technologii PlusDOM.

Słowa kluczowe: budownictwo ekologiczne, budynki autonomiczne, organiczne surowce budowlane, grunty porolne, PlusDOM

[1] Radosław Kurzyp, ul. Bajana 8A, 94-239 Łódź, tel. kom. 502 594 622, e-mail: rk@plusart.pl

1. Wstęp

W drugiej połowie XX wieku narodziła się idea zrównoważonego rozwoju, starająca się złagodzić skutki zniszczeń, jakie w środowisku przyrodniczym dokonała cywilizacja. Ludzkość zrozumiała, że dalsze, nadmierne eksploatowanie zasobów przyrody, zanieczyszczanie atmosfery, wód i gleb może spowodować z czasem całkowitą zagładę życia na Ziemi. Jednocześnie zmieniło się podejście do systemów: przyrodniczego i antropogenicznego, które często traktowane były niezależnie od siebie, a powinny być uznawane za jeden powiązany megasystem [4]. W każdej dziedzinie gospodarki zaczęto szukać rozwiązań alternatywnych dla nadmiernego zużycia energii i emisji szkodliwych gazów do atmosfery.

W architekturze koncepcja budownictwa ekologicznego narodziła się w latach 70. XX w., proponując budynki energooszczędne i przyjazne dla środowiska oraz wkomponowane w krajobraz i roślinność. Jednym z pierwszych projektantów takiej architektury był Emilio Ambasz. Jego prace są znakomitym przykładem integracji architektury z przyrodą. [3]. XXI wiek postawił przed budownictwem ekologicznym jeszcze trudniejsze zadania. Nacisk na jak najmniej szkodliwe technologie w budownictwie sprawia, że promuje się tworzenie budynków nawet z materiałów odpadowych. Można w znacznym uproszczeniu stwierdzić, że architektura ekologiczna stawia przed twórcami zadanie stworzenia budynku ze „śmieci" tak, aby efekt końcowy nie był „śmietnikiem"[1]. Wydaje się to zbyt daleko idącym posunięciem i przejaskrawioną koncepcją nowoczesnej architektury ekologicznej.

Istnieją przyjazne środowisku materiały, które można pozyskać w otoczeniu zamierzonej inwestycji. Doskonałą izolację tworzy architektura z błota. Ten budulec suszony przez słońce jest twardy i odporny. Proces budowy z jego użyciem nie wymaga palenia drewna lub węgla i niszczenia przyrody oraz wyczerpywania zasobów kopalnianych, co dzieje się w przypadku innych budulców, np. cegły[5]. Błoto używane było w architekturze już kilkaset lat temu. Przykładem może być Wielki Meczet Dżenne (Mali) wybudowany ok. 1400 r. Budownictwo w technologii PluDOM wykorzystuje do tworzenia budynków takie właśnie naturalne, łatwe do pozyskania surowce.

Celem niniejszej pracy jest:

1) zaprezentowanie innowacyjnej technologii budownictwa PlusDOM,
2) ocena ekologicznego oraz gospodarczo-społecznego znaczenia budownictwa w tej technologii.

2. Proekologiczne rozwiązania stosowane we współczesnym budownictwie

Współczesne budownictwo nadążając za potrzebami ochrony środowiska przyrodniczego stworzyło nurt rozwiązań stosowanych na wszystkich etapach

procesu inwestycyjnego. Nurt ten przejawia się w trzech strefach działań: 1) ekologicznym projektowaniu, 2) ekologicznym budowaniu, 3) ekologicznym użytkowaniu. Ekologiczne projektowanie opiera się na zintegrowanym oprogramowaniu typu BIM (*Building Information Modelling*) [6] z wykorzystaniem certyfikacji budynków za pomocą standardów ekologicznych, takich jak, np. system oceny jakości budynków BREEAM *(Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology)* [7]. System ten bierze pod uwagę wiele cech budynku, jak: efektywność energetyczna, materiały i konstrukcja, eksploatacja i realizacja, gospodarka wodna i odpadami, jakość środowiska wewnętrznego czy dostępność komunikacyjna.

Ekologiczne budowanie wyraża się w dążeniu do tworzenia domów z materiałów przetworzonych, już istniejących. Mogą to być:

1) materiały odpadowe, np. butelki PET, euro palety, stalowe kontenery;
2) materiały występujące naturalnie, w bezpośrednim sąsiedztwie inwestycji, np. lekka glina (glina mieszana ze słomą), glina ubijana w szalunkach traconych ścian, słoma balowana (tynkowana gliną), kamienie polne, drewno naturalne;
3) materiały naturalne, przetworzone, o niewielkim śladzie węglowym, np. drewno tartaczne, drewno klejone, pustaki gipsowe, pustaki krzemianowe.

Ekologiczne użytkowanie zakłada tworzenie takich budynków, które posiadają systemy (instalacje), wywierające najmniej szkodliwy wpływ na środowisko przyrodnicze. Są to zatem budynki posiadające systemy: solarne, fotowoltaiczne, wymienników gruntowych, elewacji wentylowanych, wody szarej, pomp ciepła, zarządzania budynkiem, gromadzenia wody deszczowej oraz systemy lokalnych oczyszczalni ścieków i lokalnego przetwarzania odpadów.

3. Charakterystyka technologii PlusDOM

Technologia PlusDOM łączy ekologiczne projektowanie z ekologicznym budowaniem i użytkowaniem nie zagrażającym środowisku przyrodniczemu. Podstawą tej technologii jest metoda wznoszenia budynków z zastosowaniem szkieletu samonośnego z drewna, który wypełnia się materiałem osłonowym. Materiałem takim mogą być surowce naturalne, znajdujące się w bliskim sąsiedztwie inwestycji, np. słoma balowana tynkowana gliną, kamienie polne, itp. Budowanie w technologii PlusDOM posiada liczne zalety, które różnię je od innych ekologicznych technologii budowy.

Najważniejsze z nich to:

1) szybkość realizacji budynku, który można wybudować w ciągu 4-8 tygodni,
2) elastyczność konstrukcji budynku, w którym przy zachowaniu takiego samego przekroju poprzecznego można jego powierzchnię dowolnie powiększać lub zmniejszać (brak ścian nośnych pozwala na zmianę podziału wnętrz),

3) duża adaptacyjność, polegającą na możliwości zmiany zarówno elewacji zewnętrznej, jak i wypełnienia szkieletu konstrukcyjnego, w całości lub fragmentach,
4) ekonomiczność, ponieważ dom w tej technologii, zależnie od rodzaju surowca użytego do wypełnienia szkieletu, na ogół jest tańszy od tradycyjnego nawet o 60%.



Ryc. 1. PlusDOM , szkielet z drewna klejonego wypełniony słomą balowaną i polnym kamieniem wapiennym

Fig. 1. PlusHOUSE, laminated wood frame filled with straw ball and field limestone



Ryc. 2. PlusDOM , przykład zastosowania w budownictwie jednorodzinnym

Fig. 2. PlusHOUSE, application example in SFH

4. Ekologiczne, ekonomiczne i społeczne znaczenie budownictwa w technologii PlusDom

Zaprezentowana technologia budownictwa PlusDOM posiada znaczne walory ekologiczne i gospodarczo-społeczne. W aspekcie ochrony środowiska przyrodniczego technologia ta, bazująca na naturalnych surowcach oraz stosująca nowoczesne systemy pozyskiwania energii i gospodarki odpadami, gwarantuje minimalizację szkodliwego wpływu budownictwa na przyrodę. Budynki w tej technologii mogą być usytuowane nawet na siedliskach graniczących z terenami chronionymi, np. rezerwatami, parkami krajobrazowymi czy obszarami Natura 2000. Jest to tym bardziej cenne, że wrażliwość elementów przyrodniczych na presję antropogeniczną na takich terenach bywa duża, co wpływa na coraz i tak mniej skuteczną konserwatorską ochronę przyrody [2]. Ponadto, tworzenie takich budynków, np. na odłogach porolnych nie będzie miało negatywnego wpływu na krajobraz rolniczy ani na walory przyrodnicze terenu.

Z punktu widzenia gospodarczego i społecznego technologia PlusDOM jest również bardzo korzystna. Może ona stać się tanim i powszechnie dostępnym sposobem tworzenia budynków mieszkalnych. Technologię tą mogą wykorzystywać inwestorzy indywidualni (domy jednorodzinne), wspólnoty mieszkaniowe (domy kilkurodzinne, szeregowe), gminy (domy czynszowe, mieszkania zastępcze) lub firmy (hotele, pensjonaty, magazyny, biura, itp.). Budynki wykonane w tej technologii są ze względów ekonomicznych łatwiej dostępne dla osób indywidualnych, jak i inwestorów grupowych. Poza tym, pozyskiwanie surowców naturalnych do tworzenia takich domów, może dać możliwość dodatkowych dochodów ludności wiejskiej, na terenach, gdzie rolnictwo nie jest wystarczającym źródłem utrzymania.

Literatura

[1] Iwanek M.: W poszukiwaniu znaczenia architektury ekologicznej – ciągłość historyczna architektury współczesnej, Teka Kom. Arch. Urb. Stu. Krajobr. – OL PAN, 2009, s. 43-49.

[2] Kistowski M.: Efficiency of Implementing National Ecological Policy in the years 1995-2005 an Suistainable Development Poland (w:) Giordano K., Legutko-Kobus P. (red.) The Prospects For International Collaboration in Environmental Protection and Inplementation of S.D. in the New UE Programing Period (2007-2013), Publishing House of Catholic University in Lublin, 2007, s. 9-26.

[3] Mazur R. Ecological and energy efficient architecture as a new trend in the architectural culture, Architectus, 2010, nr 2,28, s.127-131.

[4] Miller G.T.: Sustaining the Earth: an integrated approach, Brooks/Cole, Thomas Learning, 2002, s. 137.

[5] Wines J.: Zielona architektura, Taschen, 2000, s. 12.

[6] http://www.autodesk.com/solutions/building-information-modeling/overview {dostęp 15.11.2014} : BIM - is a process that involves creating and using an intelligent 3D model to inform and communicate project decisions. Design, visualization, simulation, and collaboration enabled by Autodesk BIM solutions provide greater clarity for all stakeholders across the project lifecycle. BIM makes it easier to achieve project and business goals;
BIM - jest to proces, który polega na tworzeniu i użyciu inteligentnego modelu 3D w celu informowania i komunikowania decyzji projektowych. Projektowania, wizualizacji, symulacji, a współpraca włączona rozwiązań Autodesk BIM zapewnienia większej przejrzystości dla wszystkich zainteresowanych stron w całym cyklu życia projektu. BIM ułatwia osiągnięcie celów projektu i biznesowych

[7] BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Methodology), po raz pierwszy opublikowana przez Building Research Establishment (BRE) w 1990 r. , to najdłużej działający i najbardziej powszechnie stosowane na świecie metody ocenyi poświadczania trwałości budynków. Więcej niż 250.000 budynków zostało certyfikowane BREEAM i ponad milion zarejestrowanych jest do certyfikacji - w ponad 50 krajach na całym świecie.

LARGE - SPATIAL BUILDINGS ERECTING TECHNOLOGY APPLICATION FOR SINGLE FAMILY HOUSES IN ASPECT OF ENVIRONMENTAL PROTECTION

S u m m a r y

PlusHOUSE, a name for technology to create green residential buildings, is the research outcome of architectural solution with least impact on natural environment, harmed by modern civilization. A characteristic feature of this technology is use a glue-lam self-supporting structure, modeled on the large spatial construction, filled with an organic material minimally processed, such as light clay, straw or stones. The advantage of this technology is the ability to use raw materials to complete construction, found in a close proximity to the target location of the building , especially if that place will be areas of the agricultural landscape. In addition, houses in PlusHOUSE technology as single-family housing, can be an alternative to municipal housing blocks. This has strong economic and social impact. PlusHOUSE technology made out of natural, easy-to-biodegrade materials, energy-efficient and low-emission represent a model of a modern solution to the problem of modern building technology improper impact on the environment. The presented technology allows to build homes, even in the vicinity of protected areas (eg. landscape protected areas such as Natura 2000). Proposed habitat, where you could easily build a PlusHOUSE are land in the agricultural landscape. The aim of this study is to evaluate the ecological, economical and social values of autonomous houses constructed in PlusHOUSE technology.

Keywords: green buildings, autonomous buildings , organic materials and construction, former farmland, PlusHOUSE

Przesłano do redakcji: 15.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.55

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 265-273

Dominika KUŚNIERZ-KRUPA[1]

PROBLEMATYKA REWALORYZACJI ZABYTKOWYCH WILLI W MIEJSCOWOŚCIACH UZDROWISKOWYCH NA PRZYKŁADZIE WILLI: PRIMAVERA, JAWORZYNA ORAZ WAWEL W RABCE ZDRÓJ

Rabka Zdrój jest XIX-wiecznym uzdrowiskiem, położonym na pograniczu Gorców i Beskidu Wyspowego, na południu województwa małopolskiego. Jej korzenie jako osady sięgają jednak jeszcze okresu Średniowiecza, kiedy to w 1254 roku Bolesław Wstydliwy zatwierdził uposażenie klasztoru Cystersów w Szczyrzycu, które obejmowało źródła solne na terenie ludźmierskim, które można utożsamiać z późniejszą Rabką. Miejscowość stała się oficjalnie uzdrowiskiem w 1864 roku, a inicjatorem tego przedsięwzięcia był Julian Zubrzycki. Na jego terenie działały wówczas cztery źródła solanki jodowo-bromowej: „Rafaela", „Maria", „Krakus" oraz „Kazimierz". W ich bliskim sąsiedztwie zlokalizowano centrum uzdrowiska, gdzie powstał m.in. Dom Zdrojowy, deptak, apteka oraz restauracja. Tutaj także zaczęto budować pierwsze pensjonaty, początkowo przeważnie drewniane, z czasem także murowane. Budynki te nosiły cechy tradycyjnej architektury Podhala, a przy tym nawiązywały do obowiązujących wówczas wzorców europejskich. Obecnie, przeważająca większość tych obiektów znajduje się w złym stanie technicznym, a sposób ich użytkowania jest przypadkowy. Istnieje więc pilna ich rewaloryzacji i adaptacji do nowych funkcji, które pozwolą na ich bieżące utrzymanie. Niniejszy artykuł prezentuje trzy projekty rewaloryzacji rabczańskich willi.

Słowa kluczowe: Rabka Zdrój, willa uzdrowiskowa, rewaloryzacja

1. Dzieje Rabki jako uzdrowiska

Historia Rabki jako osady sięga okresu Średniowiecza, natomiast uzdrowiskiem miejscowość ta stała się w 1864 roku, z inicjatywy Juliana Zubrzyckiego. Momentem przełomowym w historii Rabki był rok 1857 roku, kiedy Komisja Balneologiczna Krakowskiego Towarzystwa Naukowego zleciła dr Fryderykowi

[1] Dominika Kuśnierz-Krupa, Katedra Konserwacji Zabytków, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. (+4817) 865 1041, email: dominikakusnierzkrupa@zeriba.pl; dkk@zeriba.pl, dkrupa@prz.edu.pl,

Skrobelowi wykonanie analizy chemicznej rabczańskich wód, które okazały się mieć wyjątkowe walory lecznicze. Uzdrowisko zaczęło funkcjonować w oparciu o cztery źródła solanki jodowo-bromowej: „Rafaela", „Maria", „Krakus" oraz „Kazimierz". W kolejnych latach zaczęto regulować układ urbanistyczny Rabki, wytyczając zasadnicze osie kompozycyjne założenia zdrojowego. Centrum uzdrowiska zorganizowano przy źródłach, gdzie wkrótce powstał także, dziś już nieistniejący, Dom Zdrojowy (Kurhaus), kryty deptak, budynek łazienek, a także apteka oraz restauracja z salą widowiskową. Rozwój miejscowości następował bardzo szybko. W 1867 roku w Rabce funkcjonował park zdrojowy, trzy pensjonaty parterowe, dwa domy murowane, oferujące pokoje na wynajem, sklep z towarami luksusowymi oraz stajnie dla koni kuracjuszy. W 1882 roku na zespół uzdrowiskowy składało się już 15 budynków pensjonatowych z 240 pokojami dla kuracjuszy, a także kaplica zdrojowa oraz altana przewidziana jako miejsce występów miejscowej orkiestry [1]. Drugi etap rozwoju ośrodka związany był z budową połączenia kolejowego między Rabką a Chabówką, co miało miejsce w 1885 roku i wpłynęło na poprawę dostępności miejscowości [2].

Ważnym wydarzeniem w historii uzdrowiska była zmiana jego właściciela. W 1895 roku Rabkę kupiła rodzina Kadenów, która przez kolejne dziesięć lat zarobione środki inwestowała w rozbudowę uzdrowiska, a także poprawę jego infrastruktury poprzez budowę kanalizacji, wodociągu i elektryfikację.

Początek XX wieku naznaczył się przede wszystkim budową nowego kościoła według projektu Sławomira Odrzywolskiego. Okres międzywojenny przyniósł kolejne zmiany w urbanistyce i architekturze uzdrowiska. Zmiany te były podporządkowane zaleceniom planu regulacyjnego, jaki sporządzono w Ministerstwie Zdrowia Publicznego. Centrum uzdrowiska zaczęło krystalizować się wzdłuż ulicy Orkana, a jego rozwój postępował w kierunku północno-wschodnim. Wówczas to zmienił się także nieco charakter rabczańskiej architektury z inspirowanej stylem „Alpejskim" na modernizm [3].

Większość drewnianej architektury Rabki z początku XX wieku wyburzono w 1975 roku, co do dzisiaj jest ogromną stratą dla krajobrazu kulturowego uzdrowiska.



Rys.1. Widok na Rabkę od strony północno-wschodniej w 1 połowie XX wieku, na dawnej pocztówce, [w] Archiwum autorki

Fig.1. View of Rabka from the north-east in the first half of the 20th century, on the old post-card, [in:] the Authors' Archive



Rys.2. Widok na Rabkę od strony południowo-zachodniej w 1 połowie XX wieku, na dawnej pocztówce, [w] Archiwum autorki

Fig.2. View of Rabka from the south-west in the first half of the 20th century, on the old post-card, [in:] the Authors' Archive

2. Zabytkowe wille Rabki - historia i współczesność

W rozwoju architektury uzdrowiskowej Rabki z XIX i 1 połowy XX wieku można wyodrębnić trzy etapy. Budynki zaprojektowane i wzniesione w pierwszym okresie powstania miejscowości wyraźnie nawiązują do wzorców klasycystycznych, które tak chętnie stosowane były przez architektów w 1 połowie XIX wieku. Jako przykłady reprezentatywne dla tej grupy należy wymienić wille: „Pod Trzema Różami" oraz „Luboń", położone przy ul. Parkowej. Obiekty te posiadają kolumnowe portyki zaprojektowane na osi elewacji frontowych, które ewidentnie nawiązują do architektury klasycznej. Natomiast ich bryły, nakryte dwuspadowymi dachami o połaciach wysuniętych przed lico szczytów przywołują wspomnienie ówczesnej architektury „szwajcarskiej" lub „tyrolskiej". Etap drugi rozwoju architektury uzdrowiskowej w Rabce dotyczy obiektów powstałych pod koniec XIX wieku. W okresie tym można wyodrębnić kilka typów rozwiązań w zakresie architektury pensjonatowej, jednak najczęściej spotykanym jest typ bazujący na połączeniu cech stylu „alpejskiego" z eklektyzmem, reprezentowany przez takie obiekty jak willa „Kazimierz", "Warszawa", „Scholastyka, „Pod Aniołem" czy „Korona". Typ ten cechował się ponadto zwartym rzutem bryły, dachem dwuspadowym z osiowo zlokalizowanymi facjatami i gankami zdobionymi bogatym detalem snycerskim. Etap trzeci w rozwoju budownictwa pensjonatów Rabki związany był z pojawienie się w ich architekturze elementów stylu zakopiańskiego, co miało miejsce na początku XX wieku. Jako przykłady realizacji willi powstałych w tym okresie można wymienić budynek kolonii szpitala dziecięcego św. Ludwika oraz willę Wierchy. Opisane wyżej wille były w przeważającej większości obiektami drewnianymi. Architektura murowana

pojawiła się w uzdrowisku w okresie międzywojennym. Modernistyczne wille i pensjonaty zaczęto budowa wzdłuż ul. Orkana (wille „Biały dworek", „Świt", „Łowiczanka"), a także na stokach Bani (m.in. willa Primavera) [4].

3. Willa „Primavera"

Willa „Primavera" została wzniesiona w latach 1926-27 w stylu modernistycznym i jest jednym z najciekawszych rabczańskich obiektów zrealizowanych w tej estetyce. Wille zbudowano na południowych stokach góry Bani według projektu architektów Maksymiliana Burstina i Jerzego Struszkiewicza (zaprojektowali oni także m.in. budynek kliniki położniczej w Krakowie przy ul. Kopernika 23). Zabytkowa willa do dzisiaj odznacza się atrakcyjną bryłę o wysmakowanych proporcjach, która wpisuje się w krajobraz kulturowy modernistycznej Rabki, nawiązując jednocześnie do europejskich trendów w architekturze 1 połowy XX wieku. Obiekt pierwotnie funkcjonował jako pensjonat, później pełnił funkcję ośrodka zdrowia. Przez ostanie lata willa była nieużytkowana w związku z czym podupadła. Z czasem zatraciła dawny urok i charakter pensjonatu uzdrowiskowego.

Obecny inwestor - organ administracji samorządowej - postanowił odnowić budynek i przystosować do wymagań obowiązujących przepisów w zakresie funkcji centrum oświatowo- kulturalnego. Willa nie jest wpisana do Rejestru Zabytków, jest jednak ujęta w Gminnej Ewidencji Zabytków, a co za tym idzie wszelkie zamierzenia budowlane należy uzgadniać w Wojewódzkim Konserwatorem Zabytków (Delegatura w Nowym Targu).

Willa „Primavera" jest budynkiem 4 - kondygnacyjnym, wzniesionym w technologii tradycyjnej - murowanej. Ściany kondygnacji nadziemnych i piwnic wykonano z cegły pełnej, a następnie obustronnie otynkowano. Budynek



Rys.3. Willa „Primavera" w 1 połowie XX wieku, widok od strony południowo-wschodniej, na dawnej pocztówce, [w] Archiwum autorki

Fig.3. Pension "Primavera" in the first half of the 20th century from the south-east, on the old postcard, [in:] the Authors' Archive



Rys.4. Willa „Primavera" w 2008 roku, przed przystąpieniem do prac projektowych. Widok od strony południowej. Fot. D. Kuśnierz-Krupa, 2008

Fig.4. Pension "Primavera" in 2008, before designing process. View from the south. Photo by D. Kuśnierz-Krupa 2008

posiada stropy gęstożebrowe. Dach willi wykonano w konstrukcji drewnianej i pokryto blachą. Przed przystąpieniem do opracowania projektu architektoniczno-budowlanego wykonano inwentaryzację obiektu oraz ekspertyzę konstrukcyjną jego stanu technicznego. Ekspertyza ta określiła, że elementy konstrukcyjne budynku nie zdradzają poważniejszych uszkodzeń ani śladów zużycia. Jedynie tarasy i słupy na parterze od strony południowej oraz ściany zewnętrzne pomieszczeń znajdujących się pod nimi na skutek ciągłego zamakania (związanego z brakiem zabezpieczenia) były w gorszym stanie.

Projekt rewaloryzacji willi polega na przywróceniu jej dawnej świetności oraz, jak wspominano wyżej, adaptacji do nowej funkcji kulturalno - oświatowej. W obiekcie zaprojektowano sale konferencyjne, warsztatowe, pracownie oraz sale seminaryjne. Kondygnacja piwnic przeznaczona została na funkcje pomocnicze i techniczne (m. in. kotłownię). Na parterze zaplanowano biura, gabinety oraz sale konferencyjne i seminaryjne. Tutaj zaprojektowano również pomieszczenie socjalne dla pracowników centrum. Układ pomieszczeń piętra został podporządkowany funkcji obiektu i zaplanowano w nim sale dydaktyczne oraz gabinety do pracy indywidualnej. Poddasze willi zaadoptowano na przestrzeń pomocniczą [5].

Realizacja projektu nastąpi najprawdopodobniej w ciągu 2 lat. Należy mieć nadzieję, że dzięki zaplanowanym pracom rewaloryzacyjnym willa „Primavera" odzyska dawną świetność.

4. Willa „Jaworzyna"

Willa „Jaworzyna" w Rabce-Zdroju położona jest przy dzisiejszej Al. Jana Pawła II (wcześniej ul. Piłsudzkiego). Jest obiektem 4-kondygnacyjnym o ciekawej formie i charakterystycznym dla Rabki detalu architektonicznym. Obiekt powstał zapewne na przełomie XIX i XX wieku jako duży pensjonat. W przeszłości pełnił funkcje internatu św. Benedykta, prowadzonego przez OO. Benedyktynów, później był siedzibą Sanatoryjnego Gimnazjum Żeńskiego p.w. św. Tereski. Około połowy XX wieku do willi „Jaworzyna" przeniesiono Sanatoryjne Gimnazjum Męskie Dra Jana Wieczorkowskiego, założone w 1924 roku. Gimnazjum to oprócz działalności edukacyjnej zapewniało młodzieży kuracje w sanatorium, a także opiekę lekarską. Obecnie w willi „Jaworzyna" działa rabczańskie Liceum Ogólnokształcące im. E. Romera.

Opiekunem obiektu z urzędu jest organ administracji samorządowej, który około 8 lat temu postanowił odnowić budynek. Willa nie jest ujęta w rejestrze zabytków nieruchomych województwa, ani w gminnej ewidencji. Jest natomiast położona w strefie ochrony konserwatorskiej uzdrowiska i z tego tytułu wszelkie prace modernizacyjne przy obiekcie muszą być konsultowane z Wojewódzkim Konserwatorem Zabytków (Delegatura w Nowym Targu).

Prace rewaloryzacyjne w willi Jaworzyna polegały na modernizacji elewacji oraz odczyszczeniu i uzupełnieniu detali architektonicznych: zabytkowej snycerki, gzymsów oraz drewnianych dekoracji przy lukarnach [6].

Inwestycja została zakończona w 2008 roku. Kilka lat później obok willi wzniesiono nowy budynek dydaktyczny liceum im. E. Romera, który w swej formie miał nawiązywać do historycznego obiektu.



Rys.5. Willa „Jaworzyna" w 1 połowie XX wieku. Widok od strony południowo-zachodniej. Pocztówka [w:] Archiwum autorki

Fig.5. Pension "Jaworzyna" in the first half of the 20th century. View from the south-west. Post-card [in:] the Authors' Archive



Rys.6. Willa „Jaworzyna" w 2007 roku, przed rewaloryzacją. Fot. D. Kuśnierz-Krupa 2007

Fig.6. Pension "Jaworzyna" in 2007, before revalorization. Photo by D. Kuśnierz-Krupa 2007



Rys.7. Willa „Jaworzyna" obecnie, po rewaloryzacji. Fot. D. Kuśnierz-Krupa 2013

Fig.7. Pension "Jaworzyna" nowadays, after revalorization. Photo by D. Kuśnierz-Krupa 2013



Rys.8. Willa „Jaworzyna" obecnie, po rewaloryzacji. Widok na fragment elewacji frontowej. Fot. D. Kuśnierz-Krupa 2013

Fig.8. Pension "Jaworzyna" nowadays, after revalorization. View of front elevation fragment. Photo by D. Kuśnierz-Krupa 2013

5. Willa „Wawel"

Ostatnim z prezentowanych obiektów jest obecnie nieużytkowana willa „Wawel", położona w samym sercu uzdrowiska, przy głównej ulicy – Al. Jana Pawła II. Obiekt został zbudowany na początku wieku XX jako pensjonat zwią-

zany z funkcją uzdrowiskową Rabki. Znajdowały się w nim pokoje dla kuracjuszy, cześć wspólna (świetlica wraz z jadalnią) oraz zaplecze techniczne. Po II wojnie światowej, po latach prosperity pensjonat zaczął podupadać. Jego stan techniczny znacznie się pogorszył w okresie kiedy jego użytkownikiem była szkoła podstawowa. Po jej likwidacji w pierwszych latach XXI wieku obiekt był nieużytkowany przez kilka lat, aż do momentu, kiedy w 2010 roku pojawił się inwestor prywatny, który kupił go od władz samorządu terytorialnego.

Willa „Wawel" jest obiektem piętrowym z użytkowanym poddaszem. Jest też częściowo podpiwniczona. Układ konstrukcyjny budynku jest mieszany. Willa posiada drewnianą więźbę o konstrukcji płatwiowo-krokwiowej, na której wspiera się stromy, 2-spadowy dach, obecnie pokryty blachą trapezową, która zastąpiła tradycyjny gont. Budynek został wzniesiony w technologii tradycyjnej drewnianej ze ścianami wieńcowymi z bali drewnianych. Posiada stropy belkowe, drewniane. W części podpiwniczonej ściany wykonano jako murowane z kamienia łamanego, podobnie fundamenty.

Nowy właściciel obiektu postanowił przystąpić do remontu konserwatorskiego willi. W tym celu opracowano projekt architektoniczno-budowany uwzględniający adaptację willi do nowej funkcję – Domu Pogodnej Jesieni. Działanie to nie będzie wymagało zmian jego obrysu, ani zewnętrznych proporcji. Ze względu na niezaprzeczalne walory architektoniczne pensjonatu, adaptacja będzie polegała przede wszystkim na przystosowaniu układu funkcjonalno - przestrzennego do wybranej funkcji z bardzo zachowawczym podejściem do elewacji budynku i zastosowanych w niej materiałów.

Budynek nie jest wpisany do rejestru zabytków nieruchomych województwa małopolskiego, jest jednak ujęty w gminnej ewidencji zabytków, co jest jednoznaczne z zaopiniowaniem inwestycji przez Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków (Delegatura w Nowym Targu). W trakcie konsultacji i wizji lokalnych określił on granice adaptacji projektu i wytyczne konserwatorskie.



Rys.9. Willa „Wawel" w 1 połowie XX wieku. Widok od strony południowo-zachodniej. Pocztówka [w:] Archiwum autorki

Fig.9. Pension "Wawel" in the first half of the 20th century. View from the south-west. Postcard [in:] the Authors' Archive



Rys.10. Willa „Wawel" w 2011 roku, przed rewaloryzacją. Fot. D. Kuśnierz-Krupa 2011

Fig.10. Pension "Wawel" in 2011, before revalorization. Photo by D. Kuśnierz-Krupa 2011

Willa jest obiektem drewnianym, zatem przed przystąpieniem do projektu niezbędna była ekspertyza techniczna stanu jego konstrukcji oraz budulca. Poprzedziła ją inwentaryzacja konstrukcji oraz wizje lokalne w terenie. Ekspertyza wykazała, iż obiekt znajduje się w bardzo złym stanie technicznym. Opinia ta dotyczyła fundamentów, ścian wewnętrznych i zewnętrznych wszystkich kondygnacji, drewnianych stropów oraz konstrukcji dachu. Zawarte w niej ustalenia pociągnęły za sobą konieczność przeprojektowania struktury budynku. Postanowiono wymienić całą substancję, która nie nadawał się do dalszej eksploatacji. Zostanie ona zastąpiona identycznymi elementami konstrukcyjnymi (belki stropowe, elementy nośne ścian wewnętrznych, schody, bale, z których wykonane były ściany zewnętrze) oraz dekoracyjnymi (elementy snycerskie). W celu przeprowadzenia przedmiotowego zamierzenia konserwatorskiego konieczne okazało częściowe rozebranie obiektu, a następnie złożenie go ponowne z częściowym wykorzystaniem nowych elementów konstrukcyjnych oraz materiałów budowlanych.

Willa, jak wspomniano wcześniej, będzie pełniła funkcję Domu Pogodnej Jesieni, natomiast w jej przyziemiu (o powierzchni 348,15 m^2) zaprojektowano lokal usługowy wraz z zapleczem magazynowym i gospodarczym. Parter (o powierzchni 321,10 m^2), piętro (o powierzchni 244,98 m^2) i poddasze (o powierzchni 156,86 m^2) pensjonatu przeznaczono na potrzeby funkcji wiodącej [7].

Projekt zakłada odtworzenie wszystkich detali i elementów dekoracyjnych obiektu, które uległy destrukcji. Przewiduje także wymianę zabytkowej stolarki na drewnianą o identycznych podziałach i wielkości profili. Realizację inwestycji przewiduje się na lata 2014-2015.

6. Podsumowanie

Opisane wyżej projekty konserwatorskie realizowane w jednym z najpiękniejszych polskich uzdrowisk Rabce-Zdroju były wyzwaniem projektowym zarówno dla ich właścicieli jak i architektów. Wymagały pogodzenia sztuki konserwatorskiej, ekonomicznych możliwości ich właścicieli oraz wizji projektantów. Należy mieć nadzieję, że wille te, po kompleksowo i prawidłowo przeprowadzonych pracach konserwatorskich na powrót będę stanowić atrakcyjny element dziedzictwa kulturowego Rabki.

Literatura

[1] Beiersdorf Z., Krasnowolski B.: Rabka. Studialne materiały konserwatorskie dla zespołu uzdrowiska i dawnej wsi, mpis, Kraków 1977, [w:] Archiwum NID O. Kraków, sygn. 495, s. 4-6.

[2] Kowalczyk K., Moskal G., Rapta M., Szlaga J.: Rabka Juliana Zubrzyckiego, Wyd. Zachylina, Rabka 2012, s. 139.

[3] Beiersdorf Z., Krasnowolski B.: Rozwój przestrzenny i architektura Rabki, „Teka Komisji Urbanistyki i Architektur", t. XVI, 1982, Wyd. PAN, O. Kraków, s. 127-128.

[4] Ibidem, s. 131-132 oraz Słownik geograficzny Królestwa Polskiego i innych krajów słowiańskich, B. Chlebowski (red.), Wyd. Nakł. W. Walewskiego, Warszawa 1892, t. IX, s. 343-347.

[5] Projekt architektoniczno-budowlany rewaloryzacji willi „Primavera", opr. Grupa Projektowa ZERIBA, D. Kuśnierz-Krupa, M. Krupa, Ł. Wesołowski, 2008.

[6] Projekt architektoniczno-budowlany modernizacji willi „Jaworzyna" - budynku L.O. im. E. Romera, opr. Grupa Projektowa ZERIBA, D. Kuśnierz-Krupa, M. Krupa, Ł. Wesołowski, 2007.

[7] Projekt architektoniczno rewaloryzacji i adaptacji willi „Wawel", opr. Grupa Projektowa ZERIBA, D. Kuśnierz-Krupa, M. Krupa, Ł. Wesołowski, 2013-2014.

ISSUES OF REVALORIZATION OF HISTORIC PENSIONS IN HEALTH-RESORTS ON THE EXAMPLE "PRIMAVERA", "JAWORZYNA" AND "WAWEL" PENSIONS IN RABKA ZDROJ

S u m m a r y

Rabka Zdrój is a 19th-century health resort located between two mountain ranges: the Gorce and the Beskid Wyspowy, in the south of the Lesser Poland Voivodeship. Its origins as a settlement date back to the Middle Ages when, in 1254, king Bolesław Wstydliwy granted the endowment for the Cistercian Monastery in Szczyrzyc, which included salt springs in the vicinity of Ludźmierz that might later be identified as Rabka. The place officially became a health resort in 1864 and the author of the idea was Julian Zubrzycki. Four springs of iodine-bromine brine named: "Rafaela", "Maria", "Krakus" and "Kazimierz" functioned in the resort. The centre of the health resort in which there were Spa House, a promenade, a chemist's and a restaurant was located in their close neighbourhood. It was here that the first pensions were built, initially mostly wooden, later masonry. These buildings had features characteristic for traditional architecture of the Podhale region, while at the same time alluding to the current European models. The state of preservation of the majority of these pensions is poor, and their use is incidental. There is an urgent need for their revalorization and adaptation to new functions which will allow for their maintenance. This article presents three revalorization projects of the Rabka pensions.

Keywords: Rabka Zdroj, health-resort pension, revalorization

Przesłano do redakcji: 19.02.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.56

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 275-287

Roman LICHOGRAJ[1]
Jan Marian OLCHOWIK[2]
Piotr LICHOGRAJ[3]
Sławomir CZERNIK[4]

WPŁYW TRAWIENIA PLAZMĄ NA WYBRANE PARAMETRY CIENKICH WARSTW CdTe i SnO_2 DLA ZASTOSOWAŃ FOTOWOLTAICZNYCH

Powszechnie wiadomo, iż w oddziaływaniu fotonów z materią może dojść do odbicia, absorbcji i przenikania. W rozwiązaniach fotowoltaicznych, możliwość pomiaru i kontroli tych zjawisk na poziomie badań i produkcji ma kluczowe znaczenie w odniesieniu do ich późniejszej wydajności. Możliwość kontroli grubości warstw w czasie ich nanoszenia metodą napylania magnetronowego, czy też ich redukowania stosując trawienie plazmą, pozwala na dobór optymalnych parametrów optycznych i elektrycznych tworzonych ogniw cienkowarstwowych. W niniejszej pracy trawiono plazmą cienkie warstwy CdTe i SnO_2, naniesione we wcześniejszym etapie metodą rozpylania magnetronowego w próżni. Określono parametry technologiczne napylania magnetronowego i trawienia plazmą wpływające na właściwości warstw. Warstwy obrazowano przy użyciu AFM, natomiast pomiary grubości i pomiary współczynnika odbicia dokonano z wykorzystaniem elipsometrii. Przeprowadzone badania wykazały, że trawienie plazmą cienkich warstw w istotny sposób wpływa na zmianę ich refleksyjności (zarówno warstwy półprzewodnika ditlenku cyny jak i tellurku kadmu). Wykazano również ścisły związek użytej mocy i czasu trawienia z redukcją grubości warstwy. Obrazowanie AFM uwidoczniło zmiany w wielkości i ilości ziaren powierzchni trawionych warstw i wzrost ich nieregularności ułożenia, wraz ze zmieniającymi się parametrami procesu. Stwierdzono możliwość całkowitego usunięcia cienkich warstw w procesie trawienia plazmą i w efekcie możliwość uszkodzenia podłoża warstw trawionych co jednak wymaga dalszych badań w tym zakresie.

Słowa kluczowe: tellurek kadmu, tlenek cyny, sputtering magnetronowy, rozpylanie jonowe, modyfikacja powierzchni, ogniwa fotowoltaiczne

[1] Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II, Centrum Badań nad Innowacjami, 21-500 Biała Podlaska, ul. Sidorska 105, tel.:(83) 3446903, robbie@wtorek.net
[2] Autor do korespondencji: Politechnika Lubelska, Instytut Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii, ul. Nadbystrzycka 40B, 20–618 Lublin, tel.: (81) 5384700, j.olchowik@pollub.pl
[3] Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II, Centrum Badań nad Innowacjami, 21-500 Biała Podlaska, ul. Sidorska 105, tel.:(83) 3446903, p.lichograj@dydaktyka.pswbp.pl
[4] Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II, Centrum Badań nad Innowacjami, 21-500 Biała Podlaska, ul. Sidorska 105, tel.: (83) 3446903, czernikslawomir@gmail.com

1. Wprowadzenie

Pierwsze ogniwa PV wykonane na bazie tellurku kadmu powstały w latach 70. XX w. a ich początkowa niewielka sprawność (4,7%) w wyniku badań wzrastała osiągając w 2002 roku sprawność 16,5%. Obecnie ogniwa tego typu w powszechnym użytku osiągają sprawność na poziomie 8%, a oszacowana maksymalna możliwa wydajność ogniw CdTe, to 31%. Ze względu na swój charakter, cienka warstwa tellurku kadmu o grubości rzędu 2µm jest w stanie zaabsorbować do 90% fotonów padających na jej powierzchnię [1, 2, 3].

W rozwiązaniach cienkowarstwowych ogniw fotowoltaicznych, oprócz warstw półprzewodników, istotnymi elementami mającymi między innymi wpływ na ich sprawność są warstwy przewodzące. Muszą one wykazywać dużą transparentność, by nie stanowić bariery dla padającego na powierzchnię ogniwa światła, dodatkowo muszą zapewniać jak najlepszą przewodność elektryczną. Takimi własnościami charakteryzują się między innymi cienkie warstwy utworzone z SnO_2, ITO, ZnO [4].

W niniejszej pracy skupiono się nad modyfikacją cienkich warstw półprzewodnika CdTe oraz warstwy przewodzącej SnO_2 z wykorzystaniem trawienia plazmą.

2. Sposób przeprowadzenia eksperymentów

Cienkie warstwy naniesiono na szkła mikroskopowe BiosigmaVBS653 – Silver Quality 26x76mm o grubości 1mm. W celu usunięcia zanieczyszczeń powierzchni, próbki zostały wstępnie wytrawione. Proces napylania magnetronowego oraz trawienia plazmą przeprowadzono w urządzeniu Alliance Concept Line – 440. W celu oksydacji warstwy Sn, dodatkowo przed procesem trawienia plazmą, próbki zostały wygrzane w piecu laboratoryjnym muflowym w powietrzu w temperaturze 450^0C przez 15 minut. Badań powierzchni dokonano z użyciem mikroskopu AFM NT-MDT w trybie semi-contact. Do wyznaczenia współczynnika odbicia oraz grubości warstw wykorzystano elipsometr Horiba Uvisel 2.

2.1. Napylanie magnetronowe – przygotowanie warstw

W celu naniesienia cienkich warstw na szkła laboratoryjne poddano je procesowi napylania magnetronowego, zgodnie z określonymi parametrami (Tabela 1). Wszystkie procesy na tym etapie przeprowadzono w warunkach próżni o ciśnieniu $2*10^{-2}$ mbar, natomiast gazem roboczym był argon o stałym przepływie 100sccm (Standard Cubic Centimeters per Minute). Temperatura procesów napylania była stała i wynosiła 150^0C.

W celu uzyskania jednolitej grubości nanoszonych warstw na całej powierzchni próbki były one przemieszczane pod targetem (Sn lub CdTe) ze stałą prędkością 710mm/min. w czasie trwania procesu.

Tabela 1. Parametry procesu napylania magnetronowego

Table 1. The parameters of the magnetron sputtering process

Warstwa	Moc generatora RF (W)	Czas procesu (min)	Użyta energia (kJ)	Moc obita (W)
CdTe	600	15	537	7
Sn	600	15	101	480

2.2. Trawienie plazmą

Po etapie napylania magnetronowego otrzymane cienkie warstwy poddano procesom trawienia plazmą. Parametry poszczególnych etapów trawienia zostały ściśle określone (Tabela 2). Wszystkie procesy przeprowadzono w komorze próżniowej o ciśnieniu $2*10^{-2}$mbar, natomiast gazem roboczym był argon o przepływie 100 sccm. Temperatura procesów trawienia była stała i wynosiła 150^0C (równa temperaturze procesów nanoszenia tych warstw).

Po przeprowadzeniu etapu trawienia próbki zostały poddane badaniom optycznym oraz obrazowaniu powierzchni.

Tabela 2. Parametry procesu trawienia plazmą

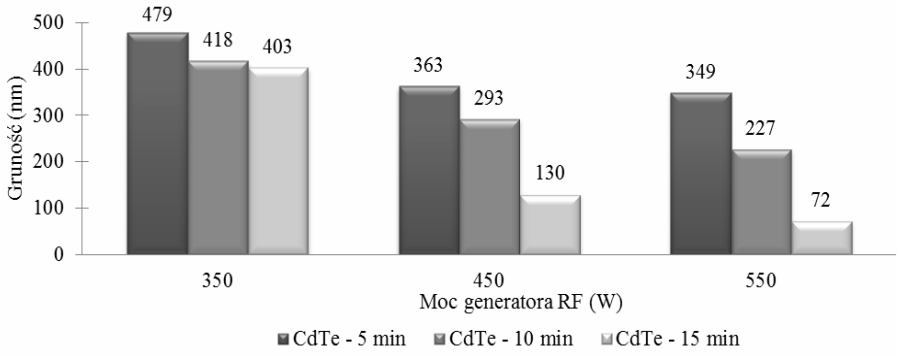
Table 2. The parameters of the plasma etching process

Warstwa	Numer próbki (#)	Moc generatora RF (W)	Czas procesu (min)	Moc odbita (W)	Użyta energia (kJ)
CdTe	1	-	-	-	-
	2	350	5	305	13,7
	3	450	5	7	134,7
	4	550	5	7	163,1
	5	350	10	305	27,1
	6	450	10	7	266,0
	7	550	10	7	325,2
	8	350	15	305	42,5
	9	450	15	7	398,0
	10	550	15	7	489,2
SnO_2	11	-	-	-	-
	12	350	5	305	13,7
	13	450	5	7	134,7
	14	550	5	7	163,1
	15	350	10	305	27,1
	16	450	10	7	266,0
	17	550	10	7	325,2
	18	350	15	305	42,5
	19	450	15	7	398,0
	29	550	15	7	489,2

3. Wyniki i dyskusja

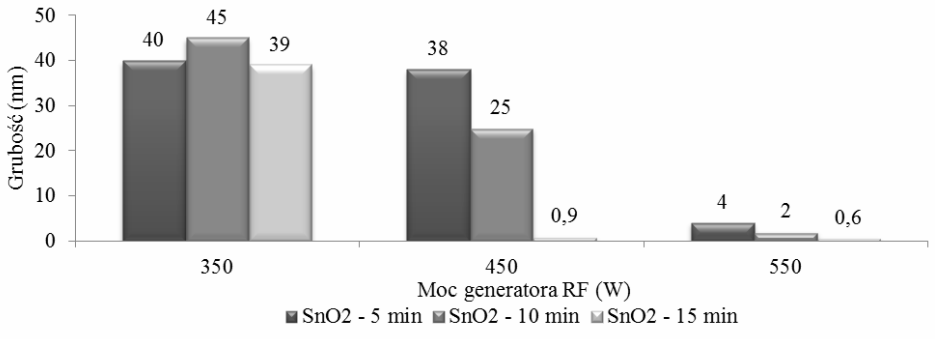
Warstwy naniesione w procesie napylania magnetronowego osiągnęły grubość odpowiednio 480nm – CdTe i 47nm - SnO_2. Na tym etapie różnice w grubości pomiędzy warstwami wynikły z wystąpienia odbicia mocy o wartości 480W podczas napylania cyny (Tabela 1).

Cienkie warstwy poddane procesowi trawienia plazmą uległy redukcji poprzez zmniejszenie swojej grubości. Grubość warstwy zależna była od mocy użytej i czasu jej trwania (Rys. 1, 2).



Rys. 1. Grubości warstw CdTe w odniesieniu do nastawy mocy generatora RF i czasu ekspozycji

Fig. 1. Thickness of the CdTe layers with regard to setpoint power RF generator and exposition time



Rys. 2. Grubości warstw SnO_2 w odniesieniu do nastawy mocy generatora RF i czasu ekspozycji

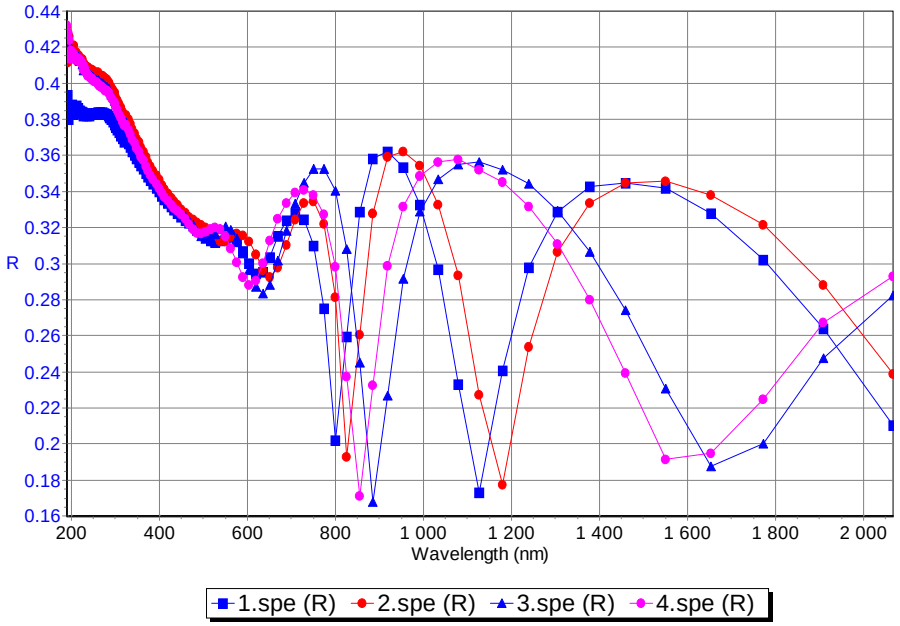
Fig. 2. Thickness of the SnO_2 layers with regard to setpoint power RF generator and exposition time

Warstwy CdTe jak i SnO_2 przy trawieniu w 350W uległy najmniejszej redukcji swojej grubości odpowiednio: CdTe od 1nm do 77nm, SnO_2 od 3nm do 8nm. Główną przyczyną tego stanu było niewykorzystanie pełnej mocy nastawy generatora RF z uwagi na powstanie w urządzeniu trawiącym efektu odbicia mocy o wartości 305W.

Przy zbliżonych użytych energiach a różnych czasach trawienia i mocach nastawy generatora otrzymuje się zbliżone grubości wynikowe (Rys.1, 2). Analizując grubości filmu tellurku kadmu przy zastosowaniu względnie dużej mocy (550W) i czasie ekspozycji 15 minut zaobserwowano największą redukcję grubości wynoszącą 408nm. Przy trawieniu z mocą 450W czasie 15 minut grubość warstwy CdTe zredukowana została o 350nm (Rys.1). Regulacja czasem ekspozycji zarówno przy mocy 450W i 550W wpływa w istotny sposób na grubość wynikową (Rys.1, 2).

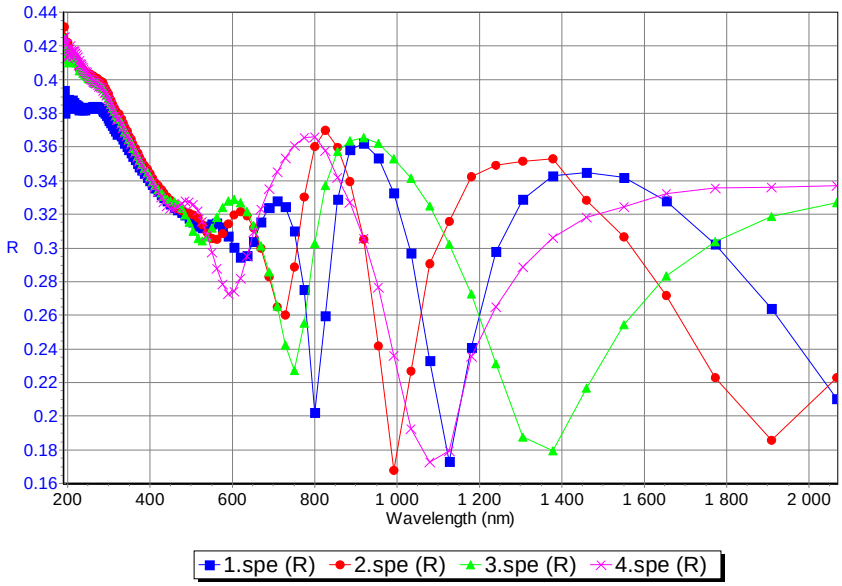
Warstwy ditlenku cyny trawione przy użyciu względnie wysokich mocy generatora (450W, 550W) i 15 minutowego czasu ekspozycji, osiągnęły znikome grubości w zakresie od 0,6nm do 4nm (Rys. 1). Dalsze zwiększanie nastawy mocy (powyżej 550W) i czasu ekspozycji (powyżej 15 minut) mogłoby skutkować całkowitym usunięciem warstwy, a w dalszym etapie trwałym uszkodzeniem podłoża (w tym przypadku szkła laboratoryjnego).

Na wykresach współczynnika odbicia warstw tellurku kadmu (Rys. 3, 4, 5) wraz ze wzrostem użytej energii w procesie trawienia, obserwuje się mniejsze zagęszczenie oscylacji oraz mniejsze ich amplitudy. Obserwowane różnice mają ścisły związek ze zmniejszającą się grubością oraz zmianami na powierzchniach trawionych warstw.



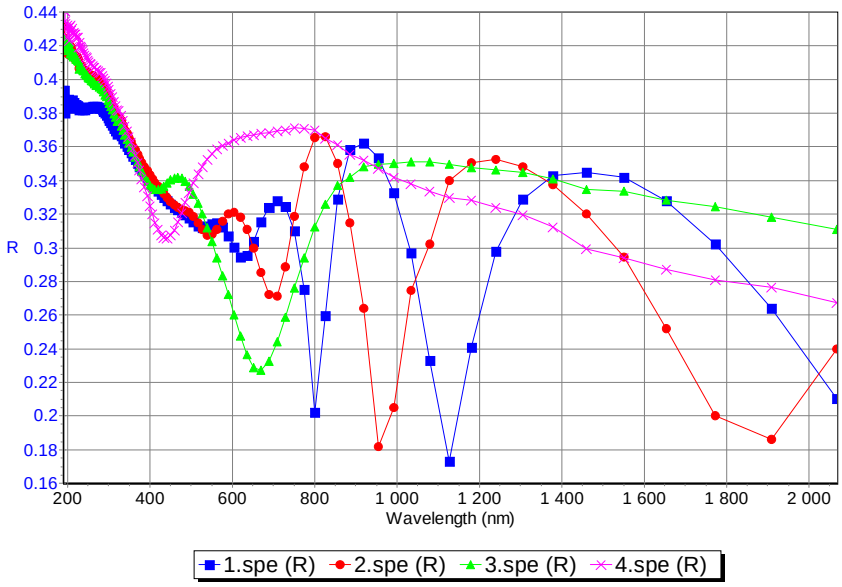
Rys. 3. Współczynniki odbicia warstwy CdTe po 5 min trawienia plazmą: 1.spe) bez trawienia, 2.spe) 350W, 3.spe) 450W, 4.spe) 550W

Fig. 3. The reflectances of CdTe layers after 5 min plasma etching process: 1.spe) without etching, 2.spe) 350W, 3.spe) 450W, 4.spe) 550W



Rys. 4. Współczynniki odbicia warstwy CdTe po 10 min trawienia plazmą: 1.spe) bez trawienia, 2.spe) 350W, 3.spe) 450W, 4.spe) 550W

Fig. 4. The reflectances of CdTe layers after 10 min of plasma etching process: 1.spe) without etching, 2.spe) 350W, 3.spe) 450W, 4.spe) 550W



Rys. 5. Współczynniki odbicia warstwy CdTe po 15 min trawienia plazmą: 1.spe) bez trawienia, 2.spe) 350W, 3.spe) 450W, 4.spe) 550W

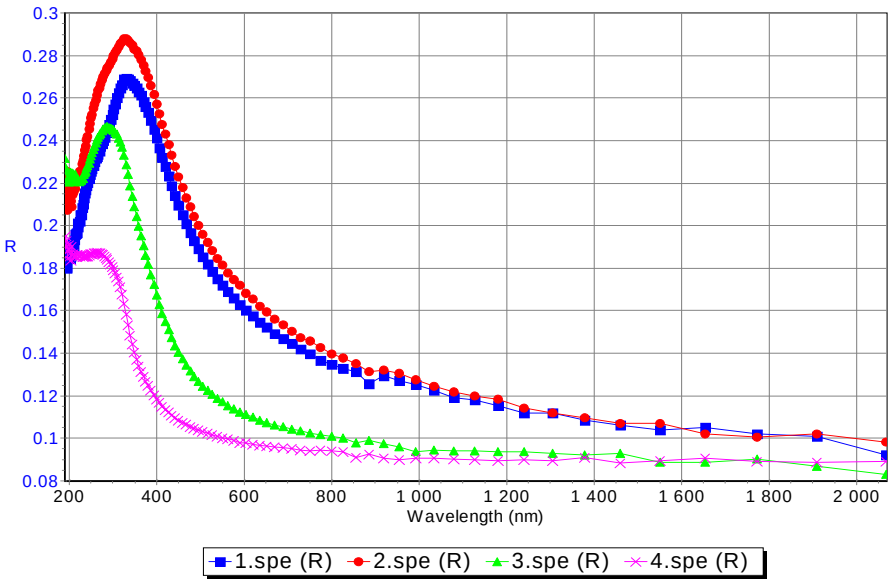
Fig. 5. The reflectances of CdTe layers after 15 min of plasma etching process: 1.spe) without etching, 2.spe) 350W, 3.spe) 450W, 4.spe) 550W

W odniesieniu do próbki nie poddanej trawieniu (Rys. 3.1.spe) współczynnik odbicia R ulegał zmianom zależnym od mocy generatora RF i czasu ekspozycji. Liczba minimów i maksimów na wykresie reflektancji CdTe zmniejsza się wraz ze spadkiem grubości warstwy (Rys. 3,4,5).

Podczas analizy doświadczeń przeprowadzonych w czasie 5 minut (Rys. 3) nie zaobserwowano istotnych zmian na wykresie odbicia. Ilość minimów i maksimów nieznacznie zmalała wraz z ze zmniejszeniem grubości podczas trawienia.

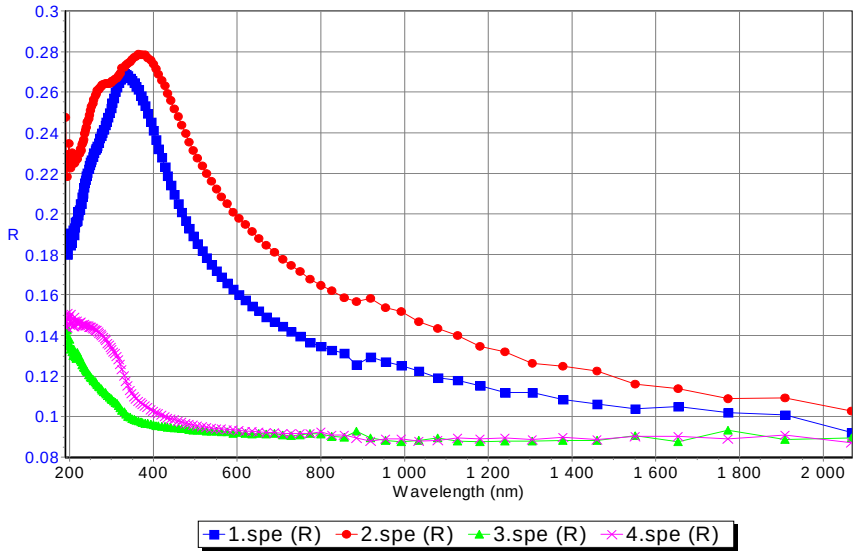
Analizując wykresy badań wykonany w czasie 10 i 15 minut (Rys. 4,5) zauważyć można znaczą zmianę odbicia. Powodem zaistniałych zmian współczynnika R jest zupełna modyfikacja struktury i grubości podczas trawienia. W przypadku maksymalnej mocy generatora (550 W) w czasie 10 i 15 min (Rys. 5) liczba minimów i maksimów na wykresie odbicia wynosiła 2. Wskazuje to na istnienie bardzo cienkiej grubości, przezroczystej warstwy CdTe oraz jej odmiennej strukturze.

Biorąc pod uwagę pełne spektrum świetlne we wszystkich analizowanych przypadkach poziom odbicia wahał się w zakresie od 18 - 42 %. Badania dowiodły, że zwiększenie czasu trawienia oraz mocy nie miało wpływu na odbicie w zakresie UV (do 400nm).



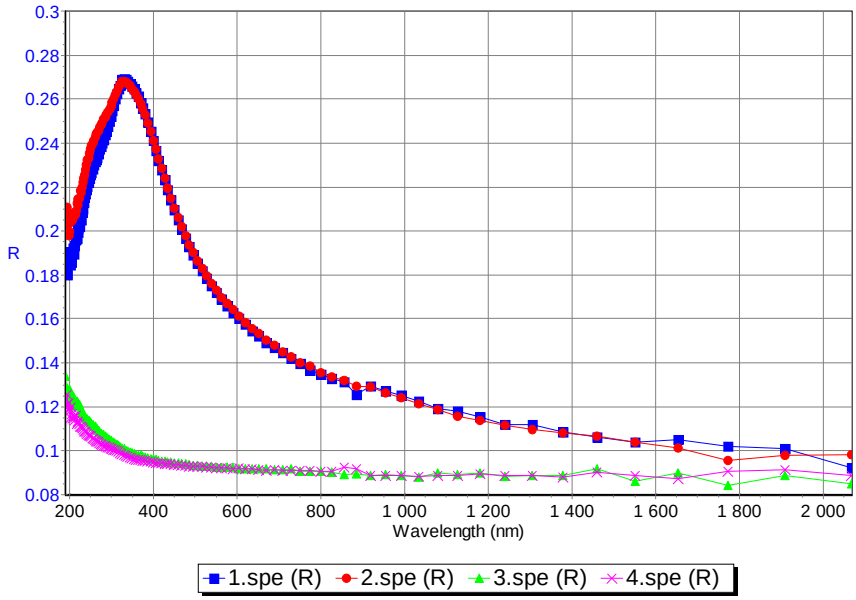
Rys. 6. Współczynniki odbicia warstwy SnO2 po 5 min trawienia plazmą: 1.spe) bez trawienia, 2.spe) 350W, 3.spe) 450W, 4.spe) 550W

Fig. 6. The reflectances of SnO2 layers after 5 min of plasma etching process: 1.spe) without etching, 2.spe) 350W, 3.spe) 450W, 4.spe) 550W



Rys. 7. Współczynniki odbicia warstwy SnO2 po 10 min trawienia plazmą: 1.spe) bez trawienia, 2.spe) 350W, 3.spe) 450W, 4.spe) 550W

Fig. 7. The reflectances of SnO2 layers after 10 min of plasma etching process: 1.spe) without etching, 2.spe) 350W, 3.spe) 450W, 4.spe) 550W



Rys. 8. Współczynniki odbicia warstwy SnO2 po 15 min trawienia plazmą: 1.spe) bez trawienia, 2.spe) 350W, 3.spe) 450W, 4.spe) 550W

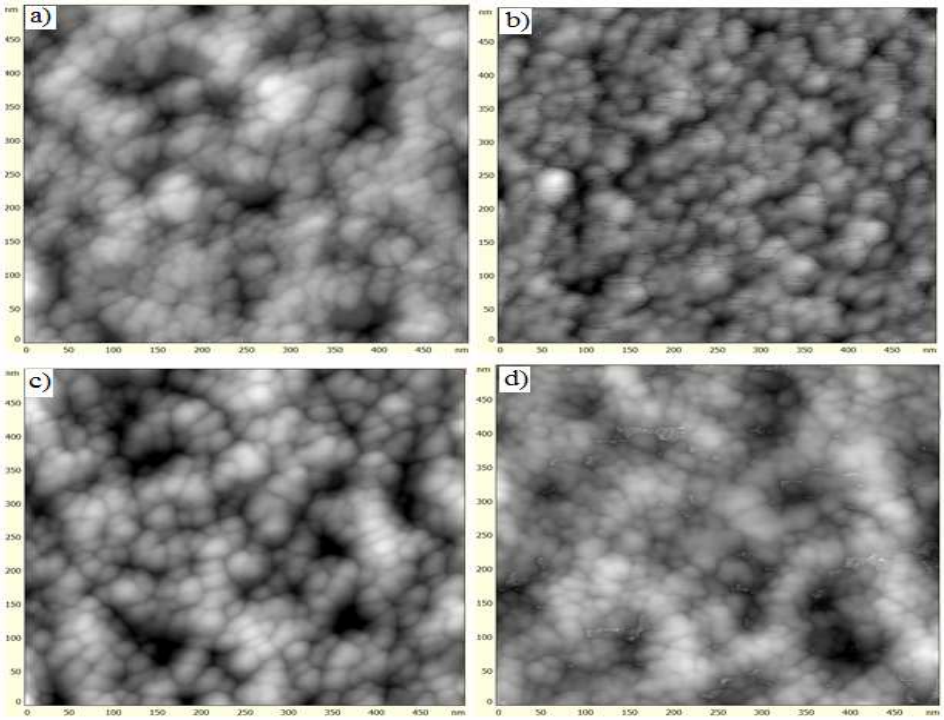
Fig. 8. The reflectances of SnO2 layers after 15 min of plasma etching process: 1.spe) without etching, 2.spe) 350W, 3.spe) 450W, 4.spe) 550W

Trawienie ditlenku cyny wpłynęło w sposób istotny na refleksyjność, powodując przy dużych mocach i czasach ekspozycji jej duży spadek w całym badanym zakresie długości fal (Rys. 7, 8). Próbka poddana 15 minutowemu trawieniu i mocy trawienia 550W prezentuje zbliżone wartości współczynnika odbicia do użytego w badaniach czystego szkła laboratoryjnego (Rys. 8). Potwierdza to wynik badanej elipsometrem względnie niewielkiej grubości cienkiej warstwy (Rys. 2, 7).

Na podstawie analizowanych wykresów odbicia ditlenku cyny zauważono, że poziom R waha się od 10 do 28 %. Na tej podstawie nie ma wątpliwości, że jest to warstwa transparentna.

Analizując przypadek SnO_2 można stwierdzić, że stosowanie czasu trawienia powyżej 5 minut i nastawianej w tym czasie mocy 450W i 550 W powoduje niemal całkowite usunięcie naniesionej warstwy.

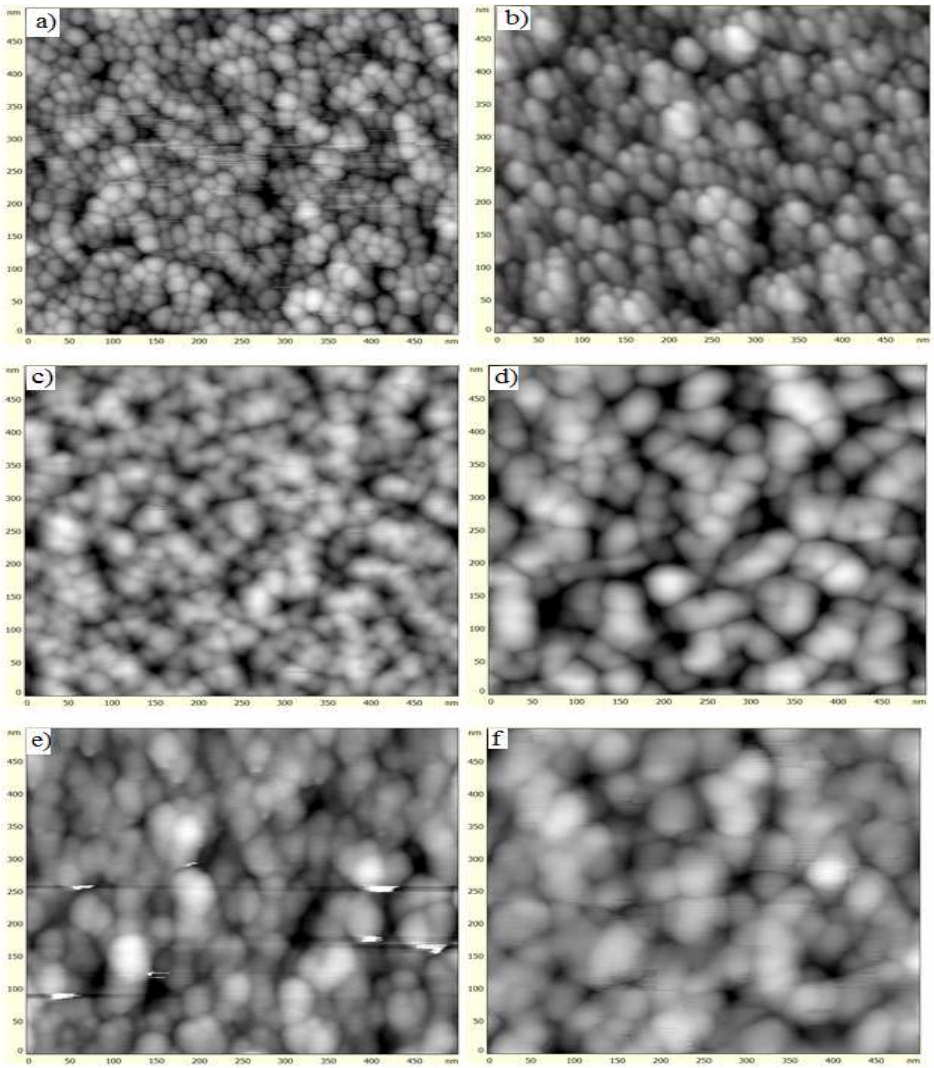
Na podstawie wykresów(Rys. 6, 7, 8) można stwierdzić, iż zmniejszenie grubości warstwy ditlenku cyny ma wpływ na obniżenia odbicia w zakresie UV. Zmiany są zauważalne w zakresie 300-500 nm, gdzie występowało jedyne maksimum krzywej dla próbki bazowej. Stopniowe usuwanie warstwy podczas trawienia plazmą powodowało zanik piku maksimum, co definiowało istnienie SnO_2.



Rys. 9. Obrazy AFM warstwy CdTe: a) 550W, 10 min., b) 350W, 15 min., c) 450W, 15 min., d) 550W, 15 min.

Fig. 9. The AFM images of CdTe layers: a) 550W, 10 min., b) 350W, 15 min., c) 450W, 15min., d) 550W, 15 min

Obrazowanie AFM warstw tellurku kadmu (Rys. 9, 10) ukazuje istotny wpływ trawienia na powierzchnię cienkich warstw. Średnia wielkość ziaren po procesie sputteringu warstwy CdTe (nie poddanej trawieniu) wynosiła 25 nm (Rys.10a). Trawienie plazmą spowodowało wzrost ziaren na powierzchni filmu i średnia ich wielkość przy mocy 450 W i czasie ekspozycji 10 min. osiągnęła 100 nm (Rys. 10f). Przy mocy 550W wraz ze wzrostem czasu procesu trawienia CdTe zaobserwowano silną aglomerację ziaren (Rys. 9a, 9d, 10d).

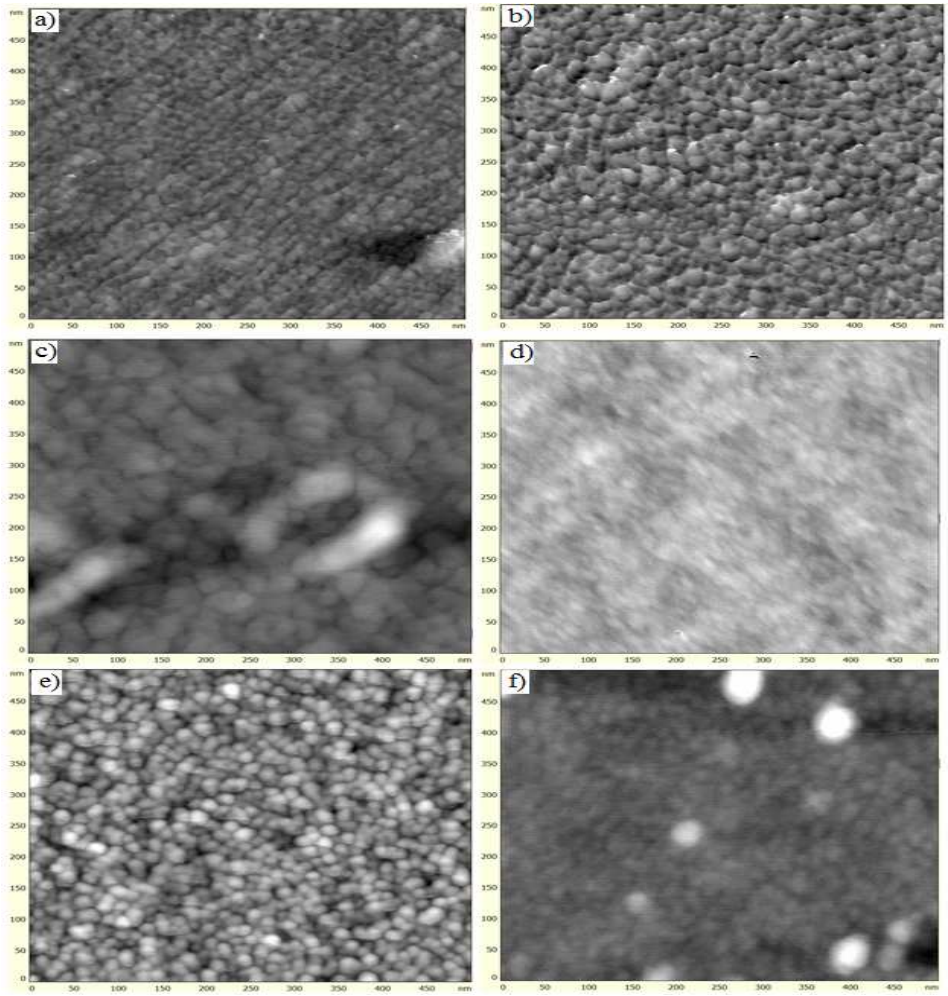


Rys. 10. Obrazy AFM warstw CdTe: a) bez trawienia, b) 350W, 5 min., c) 450W, 5 min., d) 550W, 5 min., e) 350W, 10 min., f) 450W, 10min.

Fig. 10. The AFM images of CdTe layers: a) without etching, b) 350, 5 min., c) 450W, 5 min., d) 550W, 5 min., e) 350W, 10 min., f) 450W, 10min.

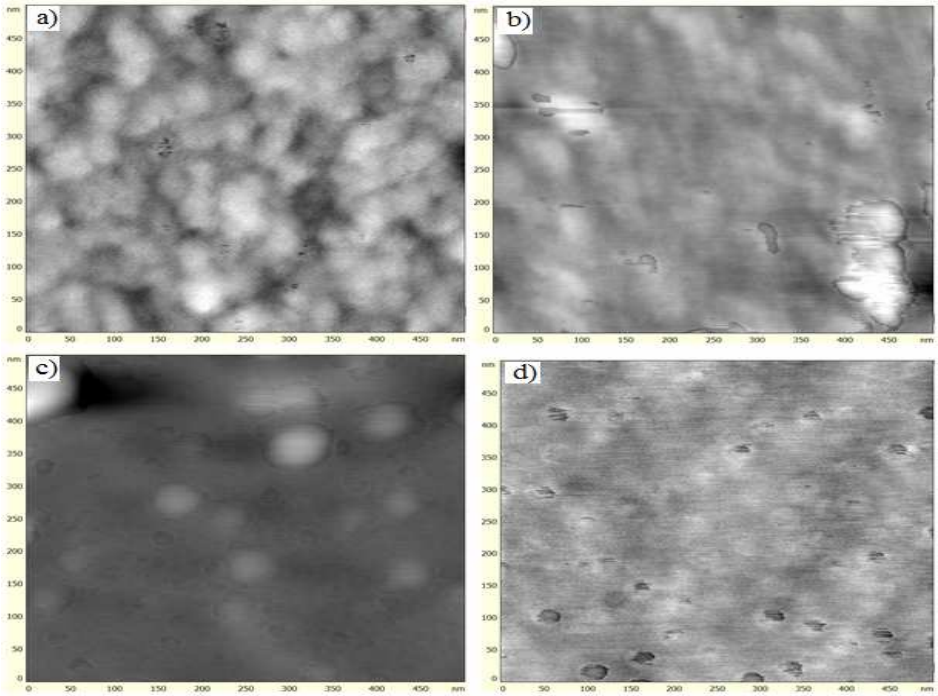
Z przeprowadzonych badań wynika, że wraz ze wzrostem mocy i czasu trawienia zmniejsza się ilość ziaren na rzecz ich wzrastającej wielkości. Struktura dodatkowo staje się mniej regularna, co świadczy o nierównomiernym wybijaniu atomów z powierzchni próbek w procesie trawienia plazmą.

Warstwy ditlenku cyny podobnie jak warstwy tellurku kadmu uległy widocznym na obrazowaniu AFM zmianom po zastosowaniu trawienia plazmą (Rys. 11, 12). Równomierna ziarnista struktura (Rys. 11a) ukazująca powierzchnię, której nie poddano trawieniu, została zmodyfikowana a w skrajnym przypadku w niektórych obszarach zupełnie usunięta (Rys. 12d).



Rys. 11. Obrazy AFM warstwy SnO2: a) bez trawienia, b) 350W, 5 min., c) 450W, 5 min., d) 550W, 5 min., e) 350W, 10 min., f) 450W, 10 min.

Fig. 11. The AFM images of SnO2 layers: a) without etching, b) 350W, 5 min., c) 450W, 5 min., d) 550W, 5 min., e) 350W, 10 min., f) 450W, 10 min.



Rys. 12. Obrazy AFM warstwy SnO2: a) 550W, 10 min., b) 350W, 15 min., c) 450W, 15 min., d) 550W, 15 min.

Fig. 12. The AFM images of SnO2 layers: a) 550W, 10 min., b) 350W, 15 min., c) 450W, 15 min., d) 550W, 15 min

Procesy trawienia przeprowadzone w 350W (gdzie występowało zjawisko odbicia mocy) miały najmniejszy wpływ na aglomerację i wielkość ziaren badanych powierzchni (Rys.11b, 11e, 12b).

4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania wykazały, że trawienie plazmą w istotny sposób wpływa na naniesione cienkie warstwy CdTe jak i SnO_2. Głównymi czynnikami wpływającymi na intensywność trawienia była moc użyta w procesie trawienia oraz czas ekspozycji. W skrajnych przypadkach działanie plazmy może być niekorzystne, powodujące trwałe usunięcie warstwy i uszkodzenie podłoża.

Dzięki przeprowadzonym badaniom stwierdzono iż możliwa jest zmiana współczynnika odbicia (który ma istotny wpływ na wydajność ogniw fotowoltaicznych) naniesionych metodą napylania magnetronowego warstw.

Literatura

[1] Dąbrowski M., Frydrychowicz-Jastrzębska G.: Nowe materiały w fotowoltaicznym przetwarzaniu energii, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, 2006, s41-64.

[2] Jastrzębska G.,: Ogniwa słoneczne. Budowa, technologia i zastosowanie, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2013.

[3] Gupta A., Parikh V., Alvin D., High efficiency ultra-thin sputtered CdTe solar cells, Solar Energy Materials and Solar Cells Volume 90, Issue 15, 2006, s2263–2271.

[4] Batzill M, Diebold U.: The surface and materials science of tin oxide, Progress in Surface Science, 2005.

THE INFLUENCE OF PLASMA ETCHING ON SELECTED PARAMETERS OF THIN LAYERS CdTe AND SnO_2 FOR PHOTOVOLTAIC APPLICATIONS

S u m m a r y

It is well known that the reaction of photons with matter may lead to reflection, absorption and permeation. In the photovoltaic solutions, the ability to measure and control these phenomena at the level of research and production is crucial in terms of their performance and quality. The ability to control the thickness of the layers at the time of applying magnetron sputtering method or the plasma etching using a reduction allows for selection of the optimum optical and electrical parameters of the formed thin-layer cells. In this study, plasma was digested with thin layers of CdTe and SnO_2, deposited by magnetron sputtering in a vacuum. Technological parameters of magnetron sputtering and plasma etching affecting the properties of layers have been specified. The layers were imaged using AFM, and the measurements of the thickness and reflectance measurements were made with the use of ellipsometry. The study showed the plasma etching of thin layers is an important contribution to change their reflectivity (both layers of semiconductors - tin dioxide and cadmium telluride). It was demonstrated the close relationship of the applied power and etching time with the reduction of the layer thickness. AFM imaging revealed changes in the size and number of grains etched surface layers and an increase of their irregular arrangement, together with changing process parameters. The possibility of complete removal of thin layers of plasma etching process, resulting in possible damage to the substrate etched layers has been stated, however, it requires further research in this area.

Keywords: cadmium telluride, tin oxide, magnetron sputtering, ion sputtering, surface modification, photovoltaic cells

Przesłano do redakcji: 24.01.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.57

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 289-296

Anna MAŁACHOWICZ[1]

KONCEPCJA REWITALIZACJI FARY W GUBINIE. PRÓBA WYKORZYSTANIA ENERGII SŁONECZNEJ W PROCESIE ADAPTACJI ZABYTKOWEGO KOŚCIOŁA NA CENTRUM KULTURY I KOMUNIKACJI

Artykuł prezentuje próbę wykorzystania energii odnawialnej (słonecznej) przy adaptacji Fary Gubińskiej na funkcje Centrum Kultury i Dialogu. Wieloletni proces ratowania i rewitalizacji późnogotyckiego kościoła doprowadził do przeprowadzenia konkursu urbanistyczno – architektonicznego mającego umożliwić wykorzystanie znajdującej się dziś w ruinie budowli fary przez mieszkańców miast Gubina i Guben. Gotycki kościół stanowi ważny element krajobrazu pogranicza polsko – niemieckiego. Wieloletnie badania dostarczyły wiedzy o licznych fazach powstawania i przebudowy budynku kościoła. Problem wprowadzania proekologicznych rozwiązań związanych z produkcją energii odnawialnej przy projektowaniu w obrębie zabytkowych budynków i zespołów jest tematem bardzo aktualnym. Polityka promowania rozwiązań proekologicznych coraz częściej wpływa na projektowanie konserwatorskie. Poszukiwania rozwiązań celem połączenia nowoczesnej technologii i zabytkowych wartości dają bardzo różnorodne rozwiązania. W przypadku koncepcji adaptacji średniowiecznej fary zabytkowe i architektoniczne wartości budowli wymusiły poszukiwanie nie ingerującego w bryłę budynku sposobu umiejscowienia instalacji paneli fotowoltaicznych (pod przeźroczystym pokryciem dachowym). Prezentowany eksperyment pokazał możliwość niestandardowego podejścia do próby połączenia nowoczesnych technologii z historyczną bryłą obiektu. Pomimo prób minimalizowania wpływu nowych instalacji na obiekt zabytkowy najlepszym rozwiązaniem pozostaje właściwe kształtowanie formy i poszukiwanie takiego programu funkcjonalnego dla obiektu, który wykorzysta jego atuty, oraz lokowanie zaawansowanych technologicznie funkcji poza obiektami zabytkowymi. Efekt wprowadzania do zabytkowych obiektów nowoczesnych, „proekologicznych" instalacji jest zwykle kontrowersyjny. Pytanie czy jest to właściwe rozwiązanie czy tylko chwilowa moda.

Słowa kluczowe: projektowanie, ochrona zabytków, energia solarna, energooszczędność

[1] Anna Małachowicz, Katedra Konserwacji Zabytków, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej, 35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 12, tel. 17 865 10 41 (51-637 Wrocław, ul. Bernardyńska 5/8), a_malach@prz.edu.pl; kkz@prz.edu.pl

Kościół farny w Gubinie, wpisany do rejestru zabytków województwa lubuskiego pod nr 281, jest jedną z ostatnich, nie odbudowanych po wojnie, monumentalnych ruin. Największy i najbardziej rozpoznawalny budynek w mieście stanowi jego wizytówkę. Ceglany kościół góruje nad otaczającą go zabudową i jest widoczny z dużej odległości.

Znaczenia procesowi rewitalizacji fary dodaje fakt jego położenia przy granicy polsko – niemieckiej oraz historia jego użytkowania wpierw jako świątyni katolickiej, a następnie protestanckiej. Oprócz władz miasta Gubina w proces odbudowy fary zaangażowane są fundacja „Fara Gubińska (utworzona w 2005 r.), niemieckie „Stowarzyszenie Wspierające Odbudowę Kościoła Farnego w Gubinie" oraz powstały w 2011 r. polsko – niemiecki Warsztat Konserwatora Fary Gubińskiej. Wśród prac zmierzających do przywrócenia świetności i zachowania zabytku należy wymienić przekrycie dachem budynku dawnej szkoły (1979-80 r.), rekonstrukcję hełmu, , prace zabezpieczająco – porządkowo – remontowe w latach 2007-08 oraz budowę klatki schodowej – trasy turystycznej prowadzącej na punkt widokowy na wieży kościelnej.

Powyższe argumenty stanowią, z jednej strony zachętę do przywrócenia pełnej świetności bryle kościoła poprzez odtworzenie jej charakterystycznego wysokiego dachu, z drugiej strony ożywiają dyskusję czy i jak powinno się odbudowywać taki zabytek, zwłaszcza, że po odbudowie nie będzie on pełnił funkcji sakralnej. Temat przebudowy (odbudowy) kościoła stawił temat międzynarodowych warsztatów architektonicznych, które dały bardzo zróżnicowane wyniki oraz podsumowanie w formie koncepcji Centrum Kultury i Komunikacji.

Centrum ma służyć funkcjom kulturalnym, turystycznym, komunalnym, naukowym i ekumenicznym.

Rozstrzygnięcie o formie odbudowy i adaptacji fary dla potrzeb nowej funkcji miał przynieść realizacyjny konkurs na opracowanie koncepcji urbanistyczno – architektonicznej Fary Gubińskiej jako Centrum Kultury i Komunikacji w ramach projektu: Renowacja Wieży Kościoła Farnego w Euromieście Gubin – Guben – warsztaty transgraniczne rozwoju kultury, sztuki i nauki.[2] na koncepcję odbudowy fary. W artykule prezentuję rozwiązanie zaproponowane przez zespół Autorskiej Pracowni arch. Macieja Małachowicza[3].

W regulaminie konkursu znalazły się następujące wytyczne: „pkt. 2.3.2. Zgodnie z wytycznymi Lubuskiego Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków

[2] Konkurs był prowadzony w oparciu o art. 11 ust.8 ustawy Prawo zamówień publicznych z dnia 29 stycznia 2004r.. na podstawie zwycięskiej pracy autorstwa pracowni Heinle, Wischer und Partner Sp. z o.o. powinna zostać opracowana w 2014 r. dokumentacja (projekt budowlany i wykonawczy) która będzie podstawą odbudowy kościoła.

[3] Prezentowana w artykule praca konkursowa została wykonana przez zespół w składzie: dr inż. arch. Maciej Małachowicz; mgr inż. konstruktor Florian Nadolski, mgr inż. arch. Rafał Karnicki, mgr inż. arch. Anna Małachowicz współpraca inż. arch. Andżelika Jonik; inż. arch. Ada Fijał; inż. arch. Marek Obajtek

forma odtworzenia Fary Gubińskiej winna uwzględniać ideę konserwatorską odbudowy obiektu, zakładającą odtworzenie budowli w jej historycznej bryle, stanowiącej dominantę architektoniczną i symboliczną w zespole urbanistycznym: odtworzenie formy historycznej bryły kościoła w tym:

- odbudowę wysokiego spadzistego dachu nad korpusem,
- zamknięcie otworów okiennych,
- zabezpieczenie, utrwalenie i wyeksponowanie autentycznej, historycznej substancji zabytkowej fary."

Wśród założeń projektowych znalazł się także postulat przeanalizowania możliwości wprowadzenia w obiekcie odnawialnych źródeł energii, w tym energii słonecznej, oraz innych rozwiązań mających zminimalizować oddziaływanie obiektu na środowisko oraz koszty jego eksploatacji.

W celu pełnego rozpoznania i wykorzystania wartości zabytkowej budowli proces odbudowy poprzedziły prace badawcze i inwentaryzacyjne. Kościół został przebadany archeologicznie w latach 1970 - 71 przez PPKZ oddział w Poznaniu (w południowo zachodnim narożu kościoła) i architektonicznie kolejne badania były prowadzone w 2008 r[4].

Badania ujawniły sześć faz powstawania kościoła w Gubinie oraz funkcjonowanie w tym miejscu dwóch budowli poprzedzających dzisiejszy, późnogotycki kościół. Pierwszy kościół parafialny lokowanego w 1235 r. miasta Gubina (wcześniejsza osada handlowa istniała tu od XI w.) prawdopodobnie pod wezwaniem św. Marii Magdaleny [3] [5] miał formę trójnawowej bazyliki z prostokątnym prezbiterium zakończonym absydą. Absydami zakończone były też od wschodu nawy boczne. Od zachodu bryłę świątyni zamykał westwerk z dwoma wieżami.

Pod koniec XIII wieku powiększono prezbiterium nadając mu prostopadłościenny, wydłużony obrys. Z pierwszego kościoła zachowały się ceglane, murowane w wątku dwuwozówkowym, ściany korpusu i prezbiterium (pod posadzką dzisiejszego wnętrza kościoła, posadowione ok. 2 m poniżej poziomu posadzki oraz, w niepełnej wysokości, wieże, wtopione w dzisiejszy masyw zachodni).

Po pożarze wzniesiono w tym miejscu nowy trójnawowy kościół – gotycką halę. Zdecydowanie powiększono prezbiterium, które było nieznacznie tylko węższe od korpusu nawowego. Wyniki badań nie pozwalają na jednoznaczne odtworzenie architektury tej części.

---

[4] Wyniki pierwszych badań w: C.Lasota, J.Rozpędowski, Rozwój przestrzenny kościoła parafialnego w Gubinie, Prace Naukowe Instytutu Architektury Sztuki i Techniki Nr 13/ 1980. W kwietniu i maju 2008 roku przeprowadzone zostały badania georadarowe we wnętrzu kościoła prowadzone przez zespół: Nawrocki W. , Antosiewicz W, Pieczonka J. Wyniki "Badania georadarowe Kościoła Farnego w Gubinie" w:"Fara -badania" Gubin 2008 w tym samym roku prace antropologiczno – archeologiczne prowadził J.Lewczuk oraz badania architektoniczne prowadzone przez zespół dr M.Małachowicza

[5] Works J.G."Inwent.dipl.Lusitiae Inter. Nr 278- document dla klasztoru w Dobrymługu wystawiony w kościele Marii Magdaleny w Gubinie

Korpus nawowy zachował wymiary zbliżone do pierwotnego. Przy budowie filarów oddzielających nawy wykorzystano posadowienie romańskich ścian arkadowych. Ośmioboczne w rzucie filary stanowiły oparcie dla gurtów dźwigających sklepienia naw.

Przebudowano wnętrze wież. Odcięto ich przyziemie od przestrzeni kościoła, co mogło być związane ze znacznym podniesieniem poziomu posadzki.

Dzisiejszy późnogotycki kościół farny składa się z budynku d. szkoły będącej pozostałością rozbudowy prezbiterium w I-szej połowy XV wieku, późnogotyckiego prezbiterium, ukończonego przed. 1508 r. oraz wybudowanych w latach 1508-1559 trójnawowego korpusu z kaplicami i wieży.

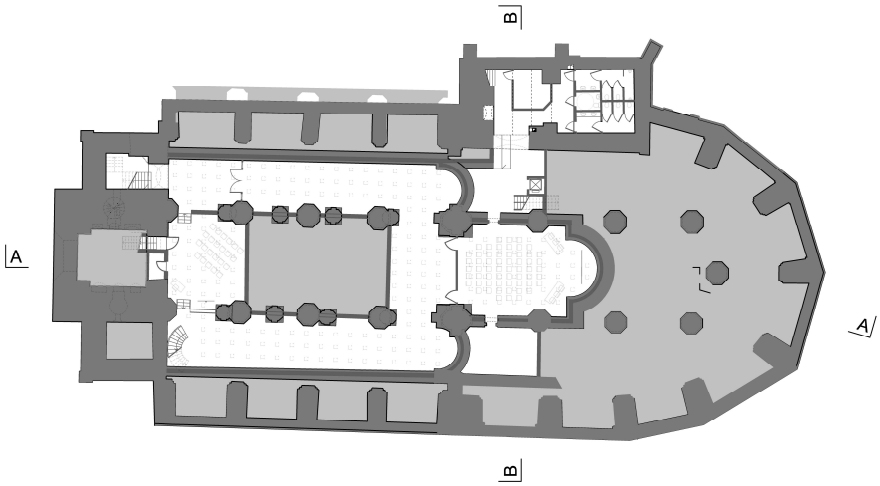
Kościół, mający mury z cegły pełnej grubości od 1,1 m do ok. 3 m, cechuje się dużą bezwładnością cieplną, a temperatura w jego wnętrzu powinna być dodatnia niezależnie od pory roku. Ściany kościoła posiadają dobrą izolacyjność cieplną, jednak przeszklenie otworów stolarką z szybą zespoloną jest możliwe tylko w mniejszych otworach budynku d. szkoły/ zakrystii czy wieży. W ścianach naw bocznych znajdują się wysokie (9,4 ÷ 9,6 m, szer. ok. 2 m) ostrołuczne otwory okien w nawach bocznych. Należy w nich przywrócić, zdemontowane w trakcie praz zabezpieczających, kamienne maswerk. Ze względu na swoją budowę (ozdobne obramienie z kształtek ceglanych oraz kamieniarkę) okna mogą być zamknięte jedynie pojedynczą taflą szklaną.

Aby zachować walory architektoniczne i zabytkowe Gubińskiej Fary zrezygnowano z termomodernizacji budynku, rozumianej jako docieplenie przegród. Ze względu na bardzo duże zapotrzebowanie na energię celem ogrzania wnętrz kościoła uznano, że najlepszym rozwiązaniem będzie czasowe ogrzewanie kościoła np. przy okazji organizacji koncertów, a w pozostałym czasie pozostawienie tej przestrzeni nieogrzewanej.

Elementem łączącym minimalizowanie zużycia energii i postulat konserwatorski pokazania odkrytych w trakcie badań archeologicznych fundamentów romańskiej fary było odsłonięcie wnętrza historycznej zakrystii (zdecydowano się na wykorzystanie wnętrza pierwotnego prezbiterium zakończonego półkolistą absydą) i naw bocznych późnoromańskiej bazyliki, przekrycie ich stropem i umieszczenie w tej części ekspozycji stałej oraz mniejszej sali wielofunkcyjnej mogącej pomieścić 80 osób.

Wykorzystanie romańskiej arkady – funkcjonującego w XIII przejścia pomiędzy nawą a pomieszczeniami w przyziemiu wież – pozwoliło wprowadzić wejście do pomieszczeń podziemnych od strony placu rynkowego (obecnie pl. Jana Pawła II), co pozwala na niezależne funkcjonowanie pomieszczeń ekspozycyjnych oraz sali wielofunkcyjnej.

W projekcie przyjęto, że w budynku dawnej szkoły zlokalizowana zostanie kawiarnia (bar cateringowy) biblioteka i pomieszczenia administracji oraz w piwnicy pomieszczenia techniczne i toalety. Pomieszczenia te będą ogrzewana przez cały okres grzewczy z węzła c.o. umiejscowionego w piwnicy dawnej szkoły, a pozostałe przestrzenie w zależności od stopnia ich wykorzystania.



Rys. 1. Rzut kondygnacji podziemnej. Adaptacja wnętrza romańskiego kościoła

Fig. 1. Underground floor plan. Adaptation of the interior of the Romanesque church

Mniej intensywnie wykorzystywane pomieszczenia (studio nagrań) zostanie ulokowane w wieży kościelnej, w pomieszczeniu nad kruchtą. Pomieszczenia te, dostępne dla ograniczonej liczby osób, miały być ogrzewane elektrycznie.

Pomieszczenia ekspozycyjne – Archiwum Dziedzictwa, które w zamyśle autorów programu Centrum Kultury i Komunikacji ma stanowić depozyt detali architektonicznych np. rzeźb, kształtek ceramicznych itp. znalezionych w trakcie prac konserwatorskich i badawczych w celu ich ponownego wkomponowanie w wystrój obiektu lub stworzenia z nich ekspozycji dydaktycznej, zostały ulokowane w kaplicach przylegających do naw bocznych korpusu fary. Za względów użytkowych zostały zamknięte szklanymi, nowoczesnymi ściankami.

Dzięki takiemu ukształtowaniu funkcji udało się zachować historyczne wnętrze fary oraz uzyskać bardziej zrozumiałą niż np. rysunek w posadzce ekspozycję wnętrze późnoromańskiej budowli oraz ograniczono zapotrzebowanie na energię.

Takie rozwiązanie pozwala dodatkowo na różnorodne, zależne od potrzeb i inwencji użytkowników aranżowanie i dzielenie przestrzeni fary w związku z organizowanymi wystawami, koncertami, warsztatami etc. nie zabiera przy tym możliwości zobaczenia unikalnej architektury gotyckiego kościoła w formie zbliżonej do pierwotnej.

Problem ułożenia na zabytkowym budynku, instalacji słonecznych był dużym wyzwaniem.

Wysoki dach, którego formę znamy dzięki zachowanemu odciskowi na ścianie zachodniej, będzie widoczny ze wszystkich stron i znacznej odległości.

W koncepcji zdecydowano się na odtworzenie tradycyjnego, ceramicznego pokrycia dachowego. Pomysł ustawienia na dachu „typowych" konstrukcji mocujących i paneli wydawał się nie do zaakceptowania.

Problemem jest też pogodzenie istniejącej bryły budynku z wymogami technologicznymi (spadek dachu w połaci południowej wynosi ok. 58° zaś optymalne odchylenie paneli powinno wynieść 20-40°).

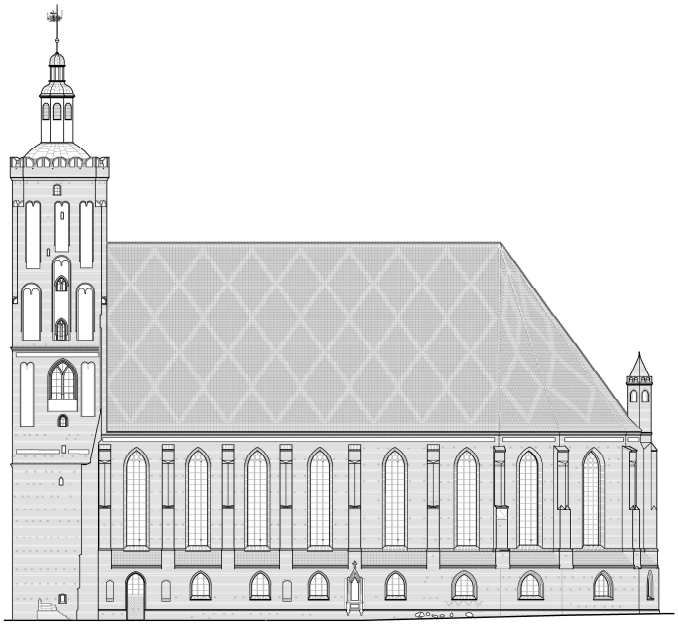
W pracach konkursowych oraz poprzedzających konkurs koncepcjach proponowane było różnorodne podejście do tej kwestii, w większości ograniczone do uporządkowania i zmniejszenia ustawionych na połaci dachowej paneli fotowoltaicznych.

Inne rozwiązanie zaproponował zespół Autorskiej Pracowni arch. Macieja Małachowicza.

Aby zachować wygląd i charakter zewnętrznych elewacji kościoła zaproponowano przekrycie części połaci dachowej przezroczystą, szklaną dachówką i ustawienie paneli fotowoltaicznych na poddaszu.

„Przeszklenia" zostały zakomponowane w formie ozdobnej szachownicy, stosowanej na dachach budynków średniowiecznych.

Panele pod pokryciem dachowym mogą być ustawione pod optymalnym kątem, jednak ich efektywność zmniejszy się wskutek odbicia części energii słonecznej przez szklana dachówkę.



Rys. 2. Elewacja południowa kościoła farnego w Gubinie

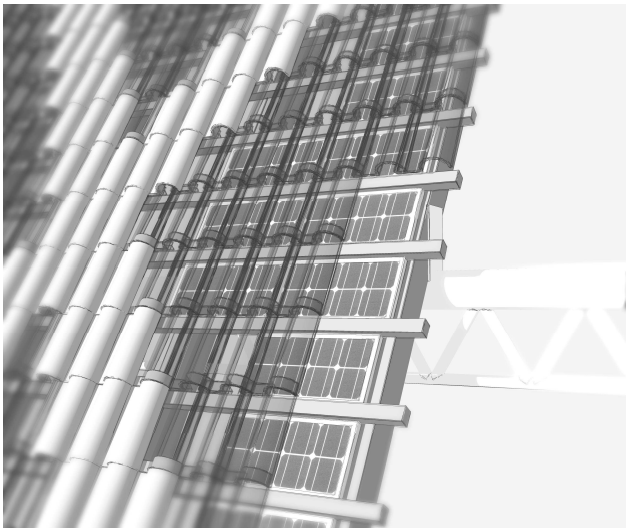
Fig. 2. South elevation of the parish church in Gubin

Dla potrzeb koncepcji przyjęto, że czasowe zacienianie części powierzchni min. przez konstrukcje więźby zmniejszy efektywność urządzeń o ok. 40%.

Zmniejszenie ilości produkowanej energii elektrycznej rekompensuje częściowo łatwy dostęp do całej instalacji , bezpieczne jej serwisowanie (bez konieczności wychodzenia na dach) oraz mniejsza podatność na uszkodzenia i możliwość zamontowania tańszych urządzeń.

Atutem jest też możliwość wykonania instalacji w dowolnym momencie, bez ustawiania rusztowań i wprowadzania zmian w pokryciu dachowym.

Ustawienia na powierzchni poddasza paneli fotowoltaicznych nie uniemożliwia adaptacji tej przestrzeni na funkcje ekspozycji, magazynowe itp. Pomieszczenia poddasza mogły by być adaptowane do potrzeb nowej funkcji i funkcjonować niezależnie od podziemnej trasy ekspozycyjnej oraz biur i biblioteki w budynku szkoły, choć wejście na poddasze wymaga przejścia przez kościół. Wg wstępnych szacunków dla potrzeb koncepcji konkursowej pod dachem fary można ustawić panele produkujących ok. 10-40 kWh rocznie.



Rys. 3. Schemat umieszczenia paneli fotowoltaicznych

Fig. 3. Schematic placement of photovoltaic panels

Ukrycie nowoczesnej, kontrastującej z wystrojem architektonicznym elewacji kościoła instalacji paneli fotowoltaicznych pod szklanym dachem pozwala pogodzić postulat konserwatorski zachowania bryły i formy.

Decyzja o wykonaniu przeziernego pokrycia z dachówki, a nie np. tafli szklanej, była podyktowana potrzebą zachowania faktury dachu.

Z punktu widzenia efektywności i kosztu takiego rozwiązania możemy postawić pytanie czy jest sens, przy obecnej technologii, stosowania instalacji np. paneli fotowoltaicznych przy rewaloryzacji obiektów zabytkowych. Czy wobec

niewykorzystania np. dachów i elewacji sąsiadujących z farą zabudowań mieszkalnych z wielkiej płyty umieszczanie paneli na zabytkowym kościele nie jest zbytnim podążaniem za chwilową modą?

Najefektywniejszą metodą ograniczania zapotrzebowania na energię w budynkach zabytkowych pozostaje właściwe lokowanie funkcji, w tym przenoszenie pomieszczeń mających duże wymagania instalacyjne do nowych budynków i poszukiwanie, przy adaptacji zabytku, programu użytkowego zbliżonego do pierwotnego np. wykorzystanie kościoła jako sali audytoryjnej czy koncertowej.

Literatura

[1] G. Domański: ”Początki Gubina i jego fary” w: Ruiny zabytków sakralnych – ochrona i adaptacja do nowych funkcji – materiały z międzynarodowej konferencji naukowej Gubin 6-8 .11.2008 r.
[2] C. Lasota, J. Rozpędowski: Rozwój przestrzenny kościoła parafialnego w Gubinie, Prace Naukowe Instytutu Architektury Sztuki i Techniki Nr 13/ 1980
[3] M. Małachowicz, Badania architektoniczne Fary Gubińskie w 2008 roku, Wrocław – Gubin 2008, maszynopis. Praca konkursowa z lipca 2013 r. wykonana przez zespół Autorskiej Pracowni arch. Macieja Małachowicza - regulamin konkursu wraz z załącznikami.

CONCEPTION OF REVITALIZATION OF PARISH CHURCH IN GUBIN. AN ATEMPT TO USE SOLAR ENERGY IN ADAPTATION OF GOTHIC CHURCH FOR THE FUNCTIONS OF CENTRE OF CULTURE AND DIALOGUE

S u m m a r y

The article presents an attempt to use renewable (solar) energy to the adaptation of the parish church in Gubin for the functions of Center for Culture and Dialogue. The long process of rescuing and revitalization of the late Gothic church led to an urban - architectural contest designed to allow the use of the ruined parish church by urban residents of Guben and Gubin. The Gothic church is an important element in the landscape of the Polish – German borderland. The issue of introducing eco-friendly solutions related to the production of renewable energy in designs of historic buildings and sites is very up-to-date. The policy of promoting ecological solutions increasingly affects restorative designs. The search for solutions to combine modern technology and historic values provides varied outcome. In the case of the concept of adaptation of the medieval parish church, historic and architectural values of the building necessitated the search for the way of positioning photovoltaic panels (under the transparent roof covering) not interfering with the body of the building. An attempt to minimize the impact of new technologies on the historical object is always a kind of compromise. The best solution remains to create a form and searching for proper functional program. This should use the advantages of certain object. A fine way out might be also to localize necessary advanced technologies outside the monument. The result of implementation of modern and so-called ecological installations is usually controversial. The question is, if this is a well solution or only temporary trend.

Keywords: design, historic preservation, solar energy, energy efficiency

Przesłano do redakcji: 24.03.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.58

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 297-310

Justyna MAZURKIEWICZ[1]
Anna WACHOWICZ-PYZIK[2]
Marcin KRÓLIKOWSKI[3]

POTENCJALNE MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA CZWARTORZĘDOWYCH WÓD PODZIEMNYCH W INSTALACJACH NISKOTEMPERATUROWYCH

Praca przedstawia potencjalne możliwości wykorzystania wód podziemnych z poziomu czwartorzędowego w instalacjach niskotemperaturowych dwuotworowych i jednootworowych wspomaganych pompami ciepła typu woda/woda na obszarze Nowego Sącza. Takie instalacje umożliwiają zagospodarowanie zwykłych wód podziemnych, występujących na niewielkich głębokościach, których temperatura na wypływie jest mniejsza niż 20°C. Obowiązujące regulacje prawne w jasny sposób nie definiują pojęcia wody niskotemperaturowej. Zatem, odnosząc się do definicji wody termalnej określonej przez Prawo geologiczne i górnicze (PGG, Dz.U. Z 2011 Nr 163 poz. 981), wodą niskotemperaturową jest woda posiadająca na wypływie z ujęcia temperaturę mniejszą niż 20°C. Woda jako dolne źródło ciepła musi spełniać odpowiednie wymagania dotyczące parametrów fizykochemicznych. W niniejszej pracy szczególnej ocenie poddano wyniki oznaczeń wybranych parametrów fizykochemicznych istotnych w przypadku wykorzystania tych wód w instalacjach niskotemperaturowych: pH, przewodności elektrolitycznej właściwej oraz chlorków, siarczanów, azotanów, żelaza i manganu. Dane do analizy pozyskano z Centralnej Bazy Danych Hydrogeologicznej (CBDH tzw. BankuHydro) oraz baz danych Monitoringu Wód Podziemnych (MWP). Z bazy wybrano te ujęcia, w których oznaczony został przynajmniej podstawowy skład chemiczny wód podziemnych. Dane poddano analizie statystycznej – wyznaczono podstawowe statystyki opisowe i przedstawiono je na wykresach skrzynkowych. Na ich podstawie można stwierdzić, że stężenia chlorków, azotanów, wartości pH i przewodności elektrolitycznej właściwej nie przekraczają wartości granicznych podanych przez producenta urządzeń (firma Nibe–Biawar sp. z o.o.), natomiast stężenia żelaza, manganu i siarczanów w pojedynczych ujęciach przekraczają te wartości. Wykorzystywanie wód niespełniających wymogów stawianych przez producenta pompy jest możliwe w sposób pośredni, za pomocą dobranego indywidualnie wymiennika pośredniego.

[1] Autor do korespondencji: Justyna Mazurkiewicz, AGH Akademia Górniczo–Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, al. Mickiewicza 30, 30–059 Kraków, e-mail: mazurkiewicz@geol.agh.edu.pl
[2] Anna Wachowicz-Pyzik, AGH Akademia Górniczo–Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, al. Mickiewicza 30, 30–059 Kraków, e-mail: amwachowicz@poczta.fm
[3] Marcin Królikowski, AGH Akademia Górniczo–Hutnicza, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, al. Mickiewicza 30, 30–059 Kraków, e-mail: mkr@agh.edu.pl

Słowa kluczowe: geotermia niskotemperaturowa, wody podziemne, pompy ciepła, Nowy Sącz

1. Wprowadzenie

1.1. Informacje ogólne

Środowisko przyrodnicze posiada olbrzymie naturalne źródła energii o niskiej temperaturze. Ich wykorzystanie jest możliwe w celach grzewczych, poprzez zastosowanie pomp ciepła. Takie systemy mogą być stosowane do ogrzewania budynków oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej. Realizacja instalacji niskotemperaturowych wspomaganych pompami ciepła może przyczynić się także do wzrostu udziału energii odnawialnej w całkowitym zużyciu energii, co stanowi jeden z elementów założeń polityki ekologicznej państwa [10,11,22].

Obowiązujące regulacje prawne w jasny sposób nie definiują pojęcia wody niskotemperaturowej. Zatem, odnosząc się do definicji wody termalnej określonej przez Prawo geologiczne i górnicze (Dz.U. z 2011 Nr 163 poz. 981)[21], wodą niskotemperaturową nazwiemy wodę posiadającą na wypływie z ujęcia temperaturę mniejszą niż 20°C [17,21]. Zwykle wody te występują na głębokościach do ok. 500 m p.p.t. [17].

Wykorzystanie zasobów wód podziemnych w instalacjach niskotemperaturowych odnosi się zarówno do systemów otwartych, w których nośnikiem energii jest woda, jak i systemów zamkniętych, w których wymiennik ciepła umiejscowiony zostaje w utworach zawodnionych [8]. Otwarte systemy niskotemperaturowe obejmują instalacji dwuotworowe i jednootworowe wspomagane pompami ciepła typu woda/woda.

W skład instalacji dwuotworowych wchodzą dwie studnie (eksploatacyjna i chłonna) ujmujące tę samą warstwę wodonośną. Woda za pomocą pompy umieszczonej w odwiercie eksploatacyjnym (produkcyjnym), pobierana jest i tłoczona do pompy ciepła, a po oddaniu ciepła (schłodzenie wody o ok. 5–7°C) wtłaczana z powrotem do warstwy, z której została pobrana (za pomocą studni chłonnych)[6,8,24,26]. Instalacje tego typu są najbardziej efektywne pod względem wydajności energetycznej z uwagi na stałość temperatury wód podziemnych występujących na głębokościach do kilkudziesięciu metrów [8].

W instalacjach jednootworowych woda pobrana ze studni eksploatacyjnej, po oddaniu ciepła w pompie ciepła, nie zasila warstwy wodonośnej, lecz odprowadzana jest do cieków powierzchniowych, kanalizacji lub może zostać wykorzystana do innych celów (bezpośredniego spożycia, nawadniania, itp.) [8,24], jeśli spełnia wymagania określone rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 29 marca 2007 r. *w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi* (Dz.U. z 2007 r. Nr 61, Poz. 417 z późn. zm.)[33]. Wody odprowadzane do cieków powierzchniowych uznawane są jako ścieki, dlatego powinny spełniać wymagania przepisów o korzystaniu z wód określone rozporządzeniem Ministra Środowiska

z dnia 18 listopada 2014 r. *w sprawie warunków, jakie należy spełniać przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego* (Dz.U. z 2014 r., Poz. 1800) [32].

Woda jako dolne źródło ciepła dla pompy ciepła musi spełniać odpowiednie wymagania odnośnie parametrów fizykochemicznych (m.in. temperatury, pH, przewodności elektrolitycznej właściwej, twardości ogólnej, obecności agresywnego CO_2, stężenia chlorków, siarczanów, żelaza i manganu) [10,11,12]. Wymagania te wynikają głównie z uwarunkowań technicznych producentów pomp ciepła. Wartości te są zbliżone do wymagań dotyczących *jakości wód przeznaczonych do spożycia przez ludzi* określonych rozporządzeniem Ministra Zdrowia z dnia 29 marca 2007 r. [33]. Ocenę składu chemicznego oraz ocenę agresywności korozyjnej wody i możliwości wytrącania osadów wykonuje się na etapie projektowania systemu opartego na wodach podziemnych [29].

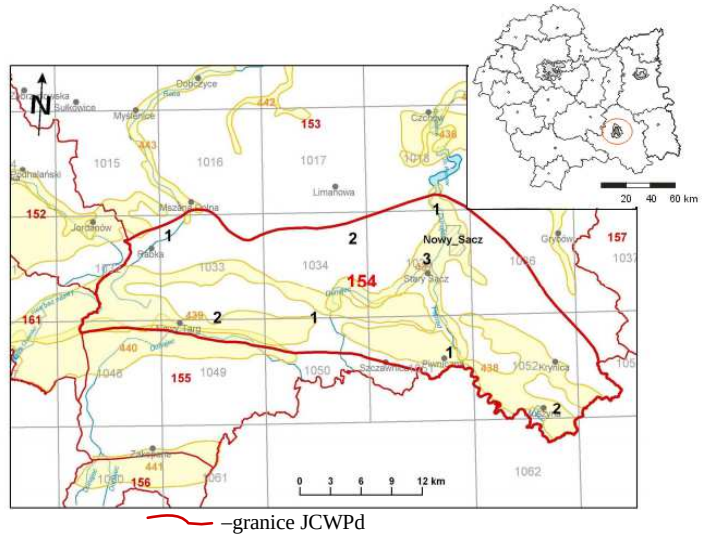
Przedmiotem niniejszej pracy jest analiza potencjalnych możliwości wykorzystania wód podziemnych na obszarze Nowego Sącza w instalacjach niskotemperaturowych dwuotworowych i jednootworowych wspomaganych pompami ciepła typu woda/woda. Szczególną uwagę skupiono na parametrach fizykochemicznych stawianym wodom wykorzystywanym w instalacjach niskotemperaturowych typu woda/woda podanych przez producenta pomp ciepła: pH, przewodności elektrolitycznej właściwej oraz zawartości chlorków, azotanów, siarczanów, żelaza i manganu [16]. Według informacji uzyskanych w Urzędzie Miasta, obecnie w obrębie Nowego Sącza nie funkcjonuje żadna instalacja niskotemperaturowa bazująca na wodach podziemnych.

2. Charakterystyka analizowanego obszaru

2.1. Informacje ogólne

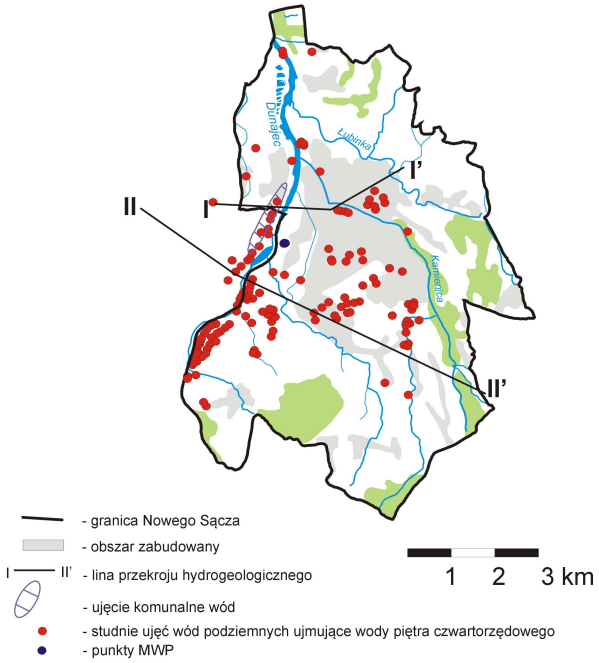
Nowy Sącz to trzecie pod względem liczby ludności i trzecie co do wielkości miasto w województwie małopolskim, zajmujące powierzchnię 58 km^2. Liczba ludności wg danych GUS z 2013 roku wyniosła 83 947 [2,13]. Od 1 stycznia 1999 roku miasto funkcjonuje na prawach powiatu grodzkiego [30]. Nowy Sącz położony jest w południowo–wschodniej części województwa małopolskiego, w obrębie 154 JCWPd (Jednolitej Części Wód Podziemnych – Rys. 1), w widłach dwóch rzek: Dunajca i Kamienicy (Rys. 2) [7].

Pod względem fizycznogeograficznym obszar ten położony jest w prowincji Zewnętrznych Karpat Zachodnich, podprowincji Beskidów Zachodnich i makroregionie Kotliny Sądeckiej, rozciągającej się pasmem o szerokości od 3 do 8 km w widłach Dunajca, Popradu i Kamiennej. Dno doliny obniża się od 340 do 270 m. Na obszarze Nowego Sącza dominują formy pochodzenia rzecznego [14]. We wschodniej części Kotliny Sądeckiej przeważają terasy erozyjno–akumulacyjne średnie (17–30 m n.p. rzeki) i niskie (6–12 m n.p. rzeki), natomiast w zachodniej szerokie terasy nadzalewowe (3–6 m n. p. rzeki) oraz terasy zalewowe i kamieńce rzeczne (1–3 m n. p. rzeki) [7,18,19].



Rys. 1. Położenie Nowego Sącza na tle JCWPd 154 [31]

Fig. 1. Location of the area of Nowy Sącz on the 154 GWB background [31]



Rys. 2. Położenie Nowego Sącza i lokalizacja punktów monitoringowych [1,3,7–zmienione]

Fig. 2. Location of Nowy Sącz and location of monitoring points[1,3,7–modified]

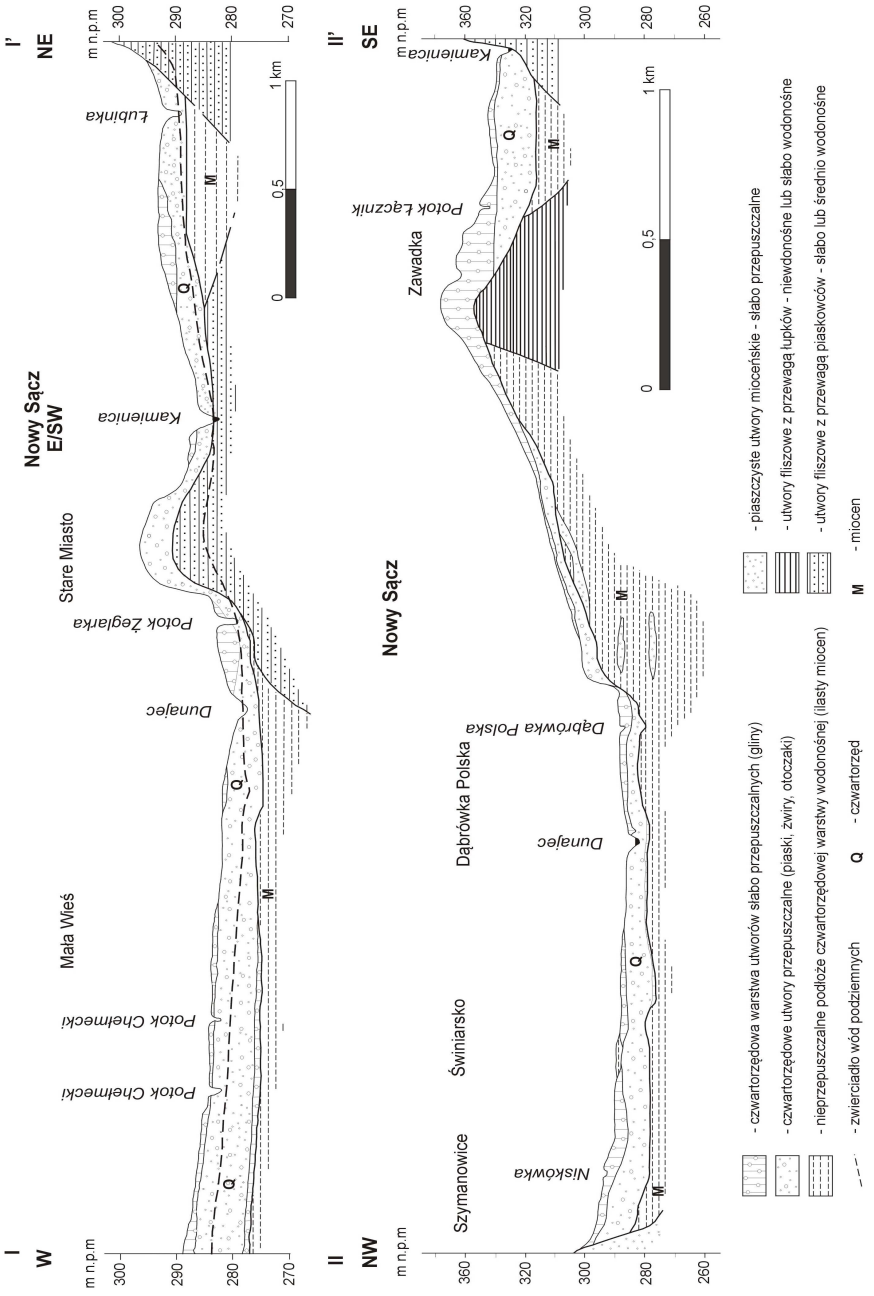
2.2 Zarys budowy geologicznej

Budowa geologiczna miasta Nowy Sącz obejmuje trzy piętra strukturalne. Najstarsze piętro strukturalne budują osady wieku kredowego i paleogeńskiego (po oligocen włącznie), środkowe osady miocenu środkowego, natomiast najmłodsze osady czwartorzędowe [18,19,23]. Utwory kredy górnej i paleogenu charakteryzują serię magurską, grybowską i dukielską. Na terenie miasta Nowy Sącz występują tylko utwory serii magurskiej (stref facjalnych bystrzyckiej i raczańskiej). Najstarsze utwory strefy facjalnej raczańskiej stanowią piaskowce gruboławicowe występujące w północno–zachodniej części miasta, w rejonie ujścia Kamienicy do Dunajca, na głębokości ok. 200 m p.p.t. Młodszymi utworami są piaskowce muskowitowe i glaukonitowe, margle globigerynowe z łupkami, piaskowce grubo– i cienkoławicowe oraz łupki pstre. Strefę facjalną bystrzycką budują piaskowce, łupki i margle [7,18,19]. Centralną część Kotliny Sądeckiej wypełniają osady mioceńskie (mułki, łupki ilaste, piaski oraz lignity warstw biegonickich). W rejonie miasta utwory czwartorzędowe budują utwory plejstoceńskie wykształcone w postaci żwirów i głazów rzecznych, piasków i glin terasów erozyjno–akumulacyjnuch [19,23]. Utwory najstarszego zlodowacenia podlaskiego tworzą terasy o wysokości 80–95 m n.p. rzeki (rejon osiedli Gołąbkowice, Biegonice, Bielowice), natomiast utwory pozostałych zlodowaceń wykształcone zostały w postaci żwirów i głazów rzecznych, glin i iłów. Utwory powstałe w okresie zlodowacenia południowopolskiego tworzą terasy o wysokości 30–80 m n.p. rzeki (rejon Nowego Sącza, Zabełcza i Biegonic), w okresie zlodowacenia środkowopolskiego o wysokości 17–30 m n.p. rzeki (centrum miasta Nowy Sącz, na południu od Biegonic i Dąbrówki, po ujście Kamienicy do Dunajca) oraz zlodowacenia północnopolskiego o wysokości 6–12 m n.p. rzeki (prawy brzeg rzeki Kamienicy). Najmłodsze utwory czwartorzędowe stanowią holoceńskie żwiry, głazy rzeczne, piaski, gliny oraz iły i pyły z domieszką piaskowców tarasów nadzalewowych występujące w dolinach Dunajca, Popradu i Kamienicy [7,19,23].

3. Charakterystyka hydrogeologiczna

3.1 Informacje ogólne

Obszar Nowego Sącza położony jest w obrębie prowincji górskiej, regionie Karpackim (XV), subregionie Karpat Zewnętrznych (XV_2)[20]. Na terenie miasta wody podziemne występują w utworach paleogeńsko–kredowych fliszu oraz osadach mioceńskich i czwartorzędowych. Wody w utworach fliszowych posiadają charakter szczelinowo–warstwowy, natomiast w osadach mioceńskich i czwartorzędowych charakter porowy (Rys. 3)[19]. Wody poziomu czwartorzędowego ze względu na dostępność i głębokość występowania, są najbardziej perspektywiczne pod względem wykorzystania w systemach niskotemperaturowych wspomaganych pompami ciepła.



Rys.3 Przekrój hydrogeologiczny I – I' i II – II' [27, zmieniony] – lokalizacja na Rys. 2

Fig. 3. Hydrogeological cross – section I – I' i II – II' [27, modified) – localization on Fig. 2

3.2 Charakterystyka czwartorzędowego poziomu wodonośnego

Największe rozprzestrzenienie i miąższość utwory czwartorzędowe w obrębie 154 JCWPd osiągają w Kotlinie Sądeckiej. Są to utwory pochodzenia rzecznego, zbudowane z osadów żwirowo–piaszczystych [31], częściowo zaglinionych, o miąższości ok. 10 m. Zasilanie piętra czwartorzędowego odbywa się przez infiltrację opadów atmosferycznych oraz poprzez dopływ boczny z utworów fliszu karpackiego i czwartorzędowych dolin rzecznych [4,5,7].

Wody podziemne poziomu czwartorzędowego występują w warstwach zbudowanych z otoczaków, żwirów i piasków akumulacji rzecznej [19]. Poziom ten zalega płytko pod powierzchnią terenu, na głębokości ok. 1–6 m. Współczynnik filtracji w obrębie utworów budujących tarasy niskie i najniższe w dolinie Dunajca i Popradu, waha się od 8,64 do 864 m/d. Najwyższy współczynnik filtracji charakteryzuje żwiry w rejonie współczesnego i zasypanego koryta Dunajca i Popradu [27]. Poziom wodonośny w obrębie niskich tarasów rzecznych posiada korzystne warunki zasilania związane z zasilaniem ze wszystkich poziomów położonych wyżej morfologicznie (głównie przez wody podziemne terasu średniego). Tylko lokalnie zasilany jest wodami rzek zwłaszcza w najniższym tarasie [27]. Warstwę wodonośną terasów średnich cechuje miąższość w granicach 2–5 m oraz wartość współczynnika filtracji wahająca się w granicach 0,86–86,4 m/d. Poziom wodonośny charakteryzuje silny drenaż związany ze stosunkowo wysokim położeniem nad dnem kotliny [4,5]. Poziom wód gruntowych nie związany hydraulicznie z wodami powierzchniowymi rzek występuje w żwirach terasów wysokich i najwyższych. Warstwę wodonośną budują dobrze przemyte żwiry i otoczaki, o miąższości w granicach od 2 do 6 m i współczynniku filtracji rzędu 8,64–864 m/d [4,5,27]. Spąg warstwy wodonośnej stanowią najczęściej iły mioceńskie, rzadziej osady fliszowe. Zwierciadło wód gruntowych ma charakter swobodny. Najzasobniejszy poziom wodonośny związany jest z utworami aluwialnymi rzeki Dunajec i występuje w zachodniej części miasta (437 GZWP – Główne Zbiorniki Wód Podziemnych) [9,23].

4. Wartości graniczne parametrów fizykochemicznych wód wykorzystywanych w systemach niskotemperaturowych

Woda wykorzystywana jako dolne źródło ciepła w systemach niskotemperaturowych wspomaganych pompami ciepła typu woda/woda nie powinna przekraczać wartości granicznych podanych przez producenta pomp ciepła. Poniżej przedstawiono wartości graniczne wybranych parametrów fizykochemicznych jednego z producentów pomp ciepła [16]:

- odczyn pH od 6,5 do 8,5,
- stężenie chlorków – 300 mg/dm^3,
- stężenie azotanów NO_3 – 100 mg/dm^3,
- stężenie siarczanów SO_4 – 70 mg/dm^3,

- stężenie żelaza i manganu – 3 mg/dm^{3} *),
- przewodność elektrolityczna właściwa – 50 mS/cm.

Przekroczenie dopuszczalnych stężeń substancji chemicznych zawartych w wodach podziemnych może powodować m.in.: narastanie szlamu na ściankach studni, wytrącanie żelaza, ograniczenie dopływu świeżej wody, zanieczyszczenia biologiczne, zamulenie (kolmatację) oraz uszkodzenie obramowania studni zrzutowej [25,26], prowadząc (w określonych warunkach pH i temperatury) do skalingu i/lub korozji poszczególnych elementów, przez które przepływa woda podziemna [17]. Korozja i kolmatacja stanowią jeden z najistotniejszych problemów związanych z eksploatacją wód podziemnych, mających bezpośredni wpływ na koszty pozyskania energii [29]. Wskazanie potencjalnych zagrożeń, wynikających ze specyfiki ujmowanych wód podziemnych pozwala na podejmowanie odpowiednich decyzji z zakresu technicznego doboru elementów instalacji, odpornych na potencjalne zagrożenia [17] przyczyniających się do niewłaściwej pracy instalacji oraz wdrażania rozwiązań technicznych ograniczających ich negatywne skutki (m.in. zmniejszenie produkcyjności i chłonności otworów)[29]. Oceny składu chemicznego wód oraz oceny agresywności korozyjnej wody i możliwości wytrącania osadów dokonuje się na etapie projektowania systemu opartego na wodach podziemnych [29].

Jeżeli stopień mineralizacji wody nie jest zbyt wysoki i wody nie są agresywne względem materiałów, z których zbudowany jest parowacz, to mogą być one tłoczone bezpośrednio do parowacza pompy [25,26]. Natomiast wykorzystanie wód zanieczyszczonych, w przypadku kiedy woda nie spełnia wymogów stawianych przez producenta pompy, jest możliwe w sposób pośredni, za pomocą wymiennika pośredniego (np. płytowego) [11,25,26].

5. Metodyka badań i analiza danych

W niniejszej pracy analizie poddano wyniki oznaczeń wybranych parametrów fizykochemicznych (chlorków, azotanów, siarczanów, żelaza, manganu, pH i przewodności elektrolitycznej właściwej) w ujęciach wód podziemnych poziomu czwartorzędowego w obrębie miasta Nowy Sącz (Rys. 2, Tabela 1). Dane do analizy pozyskano z Centralnej Bazy Danych Hydrogeologicznych (CBDH, tzw. BankuHydro) oraz bazy danych Monitoringu Wód Podziemnych (MWP). Do analizy wytypowano te ujęcia, w których oznaczony został przynajmniej podstawowy skład chemiczny wód podziemnych. Zakres analiz nie był taki sam we wszystkich ujęciach, zatem liczby wyników dla poszczególnych wskaźników są różne. Analizy te wykonywane były w latach 1958–2009. W bazach brak jest danych o metodyce oznaczeń i laboratoriach wykonujących

*) W przypadku żelaza i manganu podana wartość obowiązuje, gdy na drodze pomiędzy studnią eksploatacyjną, pompą ciepła i studnią zatłaczającą nie dostaje się tlen przez nieszczelności w systemie. Tlen prowadzi do wytrącania żelaza, tym samym powodując zamulenie studni zatłaczającej. Jest to główny powód położenia rur zasysania i odprowadzania wody wystarczająco głęboko poniżej lustra wody studni [16].

Tabela 1 Wartości graniczne parametrów fizykochemicznych wód stosowanych jako dolne źródło dla pomp ciepła wraz z charakterystyką parametrów fizykochemicznych wód podziemnych piętra czwartorzędowego na obszarze Nowego Sącza (na podstawie bazy danych PSH i materiałów firmy Nibe–Biawar)[1,16]

Table 1 Boundary values of physical – chemical parameters of waters used as a lower source for the heat pump (based on Nibe–Biwar Technical Materials) and physicochemical composition of quaternary groundwater in the area of Nowy Sacz (based on PSH Materials)[1,16]

Składnik	Jednostka	Liczba analiz	Wartość średnia	Minimum	Maksimum	Wartości graniczne**
pH	-	1482	7,39	6,57	8,32	6,5–8,5
chlorki	mg/dm^3	97	27,16	3,55	140	300
azotany NO_3	mg/dm^3	6	22,99	3,5	36,46	100
siarczany SO_4	mg/dm^3	26	61,08	26,3	**87,63**	70
żelazo	mg/dm^3	102	0,35	<DL*	**12**	3
mangan	mg/dm^3	103	0,12	<DL*	**3,5**	3
przewodność elektrolityczna właściwa	mS/cm	60	0,9	0,46	2,01	50

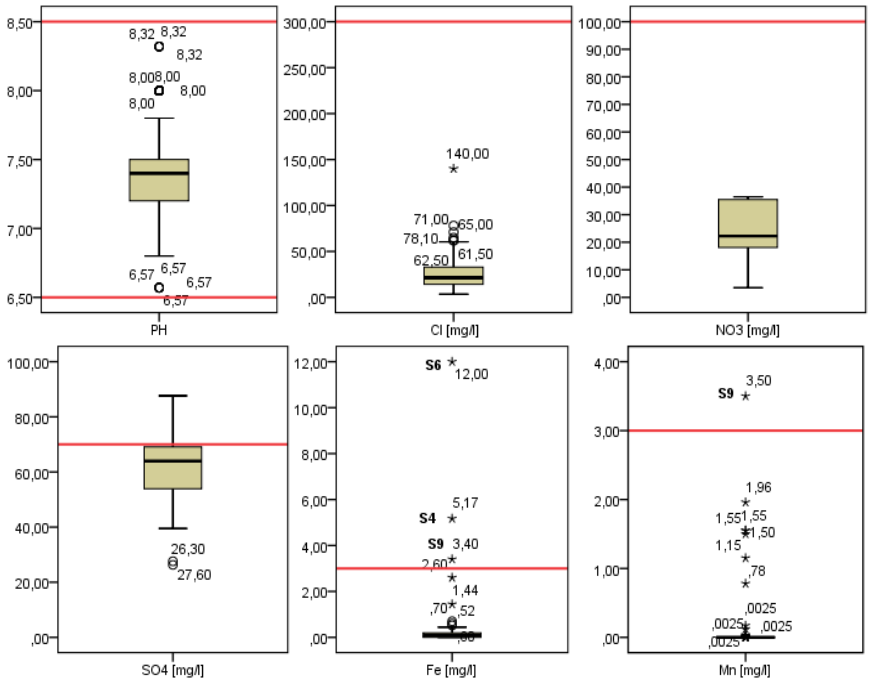
* Granica oznaczalności ** Materiały techniczne firmy Nibe–Biawar Sp. z o.o.

oznaczenia. W tabeli 1 zestawiono podstawowe statystyki opisowe dla analizowanych wskaźników. Wartości te odniesiono do wartości granicznych dla wód wykorzystywanych w systemach niskotemperaturowych podanych przez producenta pomp ciepła [16].

Do zaprezentowania zmienności analizowanych parametrów fizykochemicznych w odniesieniu do wartości granicznych wykorzystano wykresy skrzynkowe (Box–and–Whisker Plots)[4] (rys. 4).

W niniejszej pracy poddano analizie wyniki oznaczeń parametrów fizykochemicznych, które mogą mieć wpływ na funkcjonowanie przyszłych instalacji niskotemperaturowych. Analiza wykresów skrzynkowych wykazała, że wartości stężeń chlorków i azotanów oraz pH i przewodności elektrolitycznej właściwej w wodach poziomu czwartorzędowego nie przekraczają wartości granicznych podanych przez producenta urządzeń [16]. Przekroczenie stężeń manganu ma miejsce tylko w jednym punkcie monitoringowym (S9), stężeń żelaza w trzech (S4, S6, S9), natomiast stężeń siarczanów w czterech otworach (S2, H5, H6, M). W punkcie S9 obserwuje się przekroczenie zarówno stężeń manganu, jak i żelaza. Lokalizację tych punktów przedstawiono na rysunku 5. W pozostałych punktach nie obserwuje się przekroczeń stężeń parametrów fizykochemicznych wód z poziomu czwartorzędowego względem wymagań stawianych przez producenta pomp ciepła [16], zatem na tym obszarze można stosować instalacje bezpośrednie.

[4] W obrębie skrzynki znajduje się 50% wartości cech. Górę i dół skrzynki (zawiasy) wyznacza wartość pierwszego i trzeciego kwartyla, natomiast linię w środku skrzynki wyznacza mediana. Wąsy leżą w zakresie 1,5 długości skrzyni od zawiasów i reprezentują rozstęp wartości. Obserwacje położone poza zasięgiem wąsów traktowane są jako obserwacje odstające [15, 28].

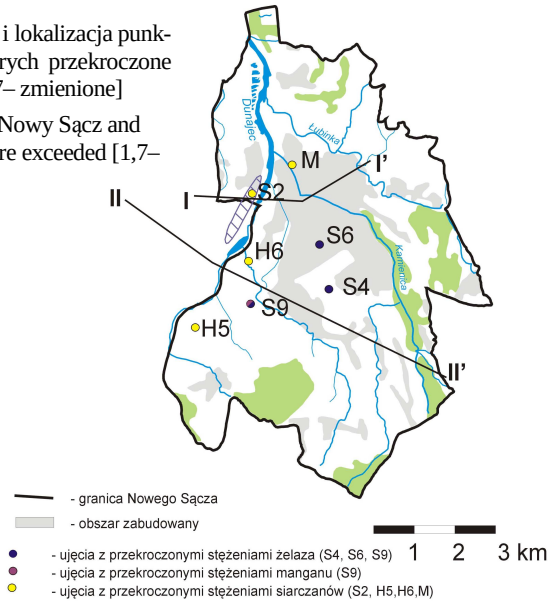


Rys. 4. Wykresy skrzynkowe parametrów fizykochemicznych wód czwartorzędowych na obszarze Nowego Sącza (ciągłą linią oznaczono wartości graniczne wg firmy Nibe–Biawar, na podstawie [16])

Fig. 4. Box–and–Whisker Plot for physicochemical parameters in the quaternary groundwater in the area of Nowy Sacz (solid line indicates the limit values according to Nibe–Biawar, based on [16])

Rys. 5. Obszar Nowego Sącza i lokalizacja punktów monitoringowych, w których przekroczone zostały wartości graniczne [1,7– zmienione]

Fig. 5. Location of the area of Nowy Sącz and points where the limit values are exceeded [1,7– modified]



Biorąc pod uwagę plan zagospodarowania przestrzennego Miasta Nowy Sącz przedstawionego w *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Miasta Nowego Sącza* z dnia 6 września 2011 r. (Uchwała Nr XIV/133/2011 z późn. zm.), ujęcia S2 i M położone są na obszarach osiedleńczych niskiej zabudowy mieszkaniowej realizowanej w formie zabudowy indywidualnej i osiedli zorganizowanych (S2) oraz różnej zabudowy mieszkaniowej: wielorodzinnej, jednorodzinnej i usług (M)[34], a zatem mogą to być ujęcia perspektywiczne w kontekście instalacji niskotemperaturowych, z zastosowaniem wymienników pośrednich.

Pozostałe ujęcia, w których stwierdzono przekroczenie wartości granicznych wybranych parametrów chemicznych położone są na obszarach przyrodniczych (H6 – tereny zielone, ogródki działkowe i H5 – lasy i zadrzewienia), obszarach osiedleńczych z dominacją działalności usługowej (S4) i obszarach infrastruktury technicznej (S9). Mogą być to również ujęcia perspektywiczne pod względem wykorzystania w systemach instalacji niskotemperaturowych, jednak ich położenie (ogródki działkowe, lasy zadrzewienia, obszary niezamieszkałe) w chwili obecnej nie jest atrakcyjne w kontekście wykorzystania w instalacjach niskotemperaturowych (brak infrastruktury mieszkaniowej), a istniejący stan zabudowy (osiedla mieszkaniowe-blokowiska) może uniemożliwiać wykonanie tego typu instalacji.

6. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę funkcjonujące na świecie instalacje niskotemperaturowe wspomagane pompami ciepła (otwarte systemy niskotemperaturowe), można stwierdzić, że stanowią one alternatywne rozwiązanie mogące w przyszłości zastąpić konwencjonalne nośniki energii.

W niniejszej pracy przeanalizowano ujęcia wód podziemnych z poziomu czwartorzędowego w obrębie powiatu grodzkiego Miasta Nowy Sącz, pod względem możliwości wykorzystania w instalacjach niskotemperaturowych dwuotworowych i jednootworowych wspomaganych pompami ciepła typu woda/woda. Przeprowadzona analiza wykazała iż wartości stężeń chlorków i azotanów oraz pH i przewodności elektrolitycznej właściwej w wodach poziomu czwartorzędowego nie przekraczają wartości granicznych podanych przez producenta urządzeń, natomiast stężenia żelaza, manganu i siarczanów w pojedynczych ujęciach przekraczają te wartości. Wstępna analiza uzyskanych wyników pozwala zatem stwierdzić, że pod względem parametrów fizykochemicznych, Miasto Nowy Sącz (powiat grodzki) posiada potencjalne możliwości wykorzystania wód z poziomu czwartorzędowego w instalacjach niskotemperaturowych bazujących na wodach podziemnych typu woda/woda na całym obszarze. Jednak w przypadku wód niespełniających wymogów stawianych przez producenta pompy będzie zachodziła konieczność zastosowania dobranego indywidualnie wymiennika pośredniego.

Z uwagi na to, że przedstawione wyniki analiz zostały wykonane w różnych latach i przez różne laboratoria, na etapie projektowania instalacji wskazane jest wykonanie kompleksowej analizy składu chemicznego wód, oceny jej agresywności korozyjnej i oceny możliwości wytrącania osadów. Analizy te najlepiej wykonywać w akredytowanych laboratoriach badawczych. Parametry te w dużej mierze będą decydowały o doborze poszczególnych elementów instalacji odpornych na potencjalne zagrożenia skalingu i/lub korozji.

Kompleksowe rozpoznanie możliwych do zagospodarowania niskotemperaturowych zasobów wód podziemnych na obszarze Nowego Sącza może przyczynić się do wzrostu zainteresowania potencjalnych inwestorów ich wykorzystaniem i zwiększyć udział OZE w bilansie energetycznym omawianego regionu.

Praca częściowo finansowana w ramach umowy AGH 15.11.140.477

Literatura

[1] Baza danych PSH, http://spdpsh.pgi.gov.pl/PSHv7/, 2014.

[2] Budzyński I. (pod kier.), Kacperczyk E., Korczak–Żydaczewska K., Milusz M., Wójcikowska J., Sznejder A., Marczak M.: Powierzchnia i ludność w przekroju terytorialnym w 2013 r., Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2001, http://www.stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/gus/l_powierzchnia_i_ludnosc_przekroj_terytorialny_2013.pdf.

[3] Cabalska J., Galczak M., Kazimierski B.(red.), Kostka A., Mikołajczyk A., Palak–Mazur P.: Rocznik Hydrogeologiczny Państwowej Służby Hydrogeologicznej Rok hydrologiczny 2013, PIG – PIB, Warszawa 2014.

[4] Chowaniec J., Witek K.: Mapa hydrogeologiczna Polski w skali 1: 50 000, ark. Nowy Sącz, Centralne Archiwum Geologiczne, PIG, Warszawa 1997.

[5] Chowaniec J., Witek K.: Objaśnienia do Mapy hydrogeologicznej Polski w skali 1: 50 000, ark. Nowy Sącz, Centralne Archiwum Geologiczne, PIG, Warszawa 1997.

[6] Eugster W.J., Sanner B.: Technological Status of Shallow Geothermal Energy in Europe. Proceedings World Geothermal Congress 2007, Unterhaching, Germany, 30 May–1 June 2007, 2007, p. 1–8, https://pangea.stanford.edu/ERE/pdf/IGAstandard/EGC/2007/174.pdf.

[7] Gryczko–Gostyńska A., Olędzka D.: Nowy Sącz w: Wody Podziemne miast Polskich. Miasta powyżej 50 000 mieszkańców (pod red. Z. Nowickiego), Informator Państwowej Służby Hydrogeologicznej, PIG, Warszawa 2009, s. 259–274.

[8] Kapuściński J., Rodzoch A.: Geotermia niskotemperaturowa w Polsce i na świecie. Stan aktualny i perspektywy rozwoju. Uwarunkowania techniczne, środowiskowe i techniczne, Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2010.

[9] Kleczkowski A.S.(red.): Objaśnienia do Mapy obszarów głównych zbiorników wód podziemnych (GZWP) w Polsce wymagających szczególnej ochrony: 1:500 000, Instytut Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej AGH, Kraków 1990.

[10] Klojzy–Kaczmarczyk B., Kaczmarczyk A.: Systemy grzewcze z pompą ciepła jako element realizacji założeń programów ochrony środowiska, Polityka Energetyczna, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2005, t. 8, z. spec., s. 517–525.

[11] Klojzy–Kaczmarczyk B., Kaczmarczyk A.: Zanieczyszczone wody podziemne jako niskotemperaturowe źródło ciepła w systemach grzewczych, Polityka Energetyczna, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2006, t. 9, z.1, s. 73–80.

[12] Klojzy–Kaczmarczyk B.: Jakość wód podziemnyh wybranych pięter makroregionu środkowopolskiego w aspekcie ich wykorzystania w systemach z pompą ciepła, Polityka energetyczna, Wyd. IGSMiE PAN, Kraków 2008, t.11, z. 1, s. 201–210.

[13] Kłósek M., Łacic M., Marczak W., Sienniak H. (pod kier), Stachańczyk A.: Informator Statystyczny miasto Nowy Sącz, Urząd Statystyczny w Krakowie, Kraków 2013, http://old.stat.gov.pl/cps/rde/xbcr/krak/ASSETS_2013_informator_Nowy_Sacz.pdf.

[14] Kondracki J.: Geografia regionalna Polski, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2013.

[15] Malarska A.: Statystyczna analiza danych wspomagana programem SPSS, Predictive Solutions, Kraków 2005.

[16] Materiały techniczne firmy Nibe–Biawar sp. z o. o.

[17] Mazurkiewicz J., Tomaszewska B., Kmiecik E.: Program badań do określenia potencjału geotermii niskotemperaturowej bazującej na wodach podziemnych Małopolski, Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój, IGSMiE PAN, Kraków 2013, z. 2, s. 45–58.

[18] Oszczypko N., Wójcik A.: Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1: 50 000, ark. Nowy Sącz, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1993.

[19] Oszczypko N., Wójcik A.: Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski 1:50 000, ark. Nowy Sącz, Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa 1993.

[20] Paczyński B.: Podstawy regionalizacji hydrogeologicznej, Hydrogeologia regionalna Polski, T. I, Wody słodkie (pod red. Paczyński B., Sadurski A.), PIG, Warszawa 2007, s. 56–69.

[21] PGG: Prawo geologiczne i górnicze, Dz.U. Z 2011r., Nr 163, poz. 981.

[22] Prognoza Oddziaływania na Środowisko projektu „Aktualizacji Programu Ochrony Środowiska dla miasta Nowego Sącza na lata 2013–2016 z perspektywą na lata 2017–2020", Nowy Sącz 2013, http://www.nowysacz.pl/content/resources/miasto/ /informacje/komunikaty/2013/WO%C5%9A/program%20ochrony%20%C5%9Brodowiska.pdf.

[23] Program Ochrony Środowiska i Plan Gospodarki Odpadami dla miasta Nowego Sącz, cz. I. Program ochrony środowiska na lata 2005–2012, Nowy Sącz 2005, http://www.nowysacz.pl/content/resources/sesje/U_XLVIII_597_2005.pdf.

[24] Rafferty K.: Design issues in the commercial application of GSHP systems in the U.S.. Geo–Heat Center Quarterly Bulletin, Klamath Falls 2000, OR, p. 6–1 (http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull21-1/bull21-1-all.pdf).

[25] Rubik M.: Pompy ciepła w systemach geotermii niskotemperaturowej, Monografia, wyd. MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2011.

[26] Sanner B.: Shallow geothermal energy. Geo–Heat Center Quarterly Bulletin, Klamath Falls 2001, OR, p. 19–25, http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull22-2/art4.pdf.

[27] Skąpski K., Szklarczyk T., Patorski R., Garecki J.: Dokumentacja hydrogeologiczna zasobów wód podziemnych z utworów czwartorzędowych na obszarze Kotliny Sądeckiej,Centralne Archiwum Geologiczne, PIG, Warszawa 1997.

[28] Szczepańska J., Kmiecik E.: Ocena stanu chemicznego wód podziemnych w oparciu o wyniki badań monitoringowych, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2005.

[29] Tomaszewska B.: Prognozowanie kolmatacji instalacji geotermalnych metodą modelowania geochemicznego, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, IGSMiE PAN, Kraków 2008, t. 24, z.2/3 s. 399–407.

[30] Portal Nowy Sącz, http://www.nowysacz.pl/, maj 2014.
[31] Charakterystyka JCWPd nr 154, http://www.psh.gov.pl/plik/id,4958,v,artykul_5576.pd, maj 2014.
[32] RMZ, 2014 - Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. *w sprawie warunków, jakie należy spełniać przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi, oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego* (Dz. U. z 2014 r., Poz. 1800).
[33] RMZ, 2007 - Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 29 marca 2007 r. *w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi* (Dz. U. z 2007 r. Nr 61, Poz. 417), zmienione przez Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 20 kwietnia 2010 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. z 2010 r. Nr 72, Poz. 466).
[34] Uchwała Nr XIV/133/2011 w sprawie uchwalenia zmiany *Studium uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego Miasta Nowego Sącza* z dna 6 września 2011 r. (Uchwała Nr XIV/133/2011 z późn. zm.).

POSSIBILITIES OF UTILIZATION OF QUATERNARY GROUNDWATER IN LOW–TEMPERATURE GEOTHERMAL SYSTEMS

S u m m a r y

The paper presents the possibilities of utilization of quaternary groundwater in low – temperature geothermal systems by assisted by geothermal heat pumps (water/warter type, open loop heat pumps) in the area of Nowy Sacz. Low – temperature geothermal systems can be based on one (single well) or two wells (production well and injection well). These installation allows the use of groundwater occurring at shallow depths, where the temperature at the outlet is less than 20°C. Existing regulations do not clearly define the concept of low-temperature water. Referring to the definition of thermal water specified by the Geological and Mining Law (PGG, Journal of Laws of 2011 No. 163, item. 981), low – temperature water has at the outlet of the intake temperature less than 20°C. Water as a heat source must fulfill the relevant requirements for physicochemical parameters. In this paper, physicochemical parameters of water used in low temperature systems: temperature, pH, chloride, sulphate, iron and manganese have been evaluated. Data for this study were obtained from the Polish Hydrogeological Survey (PSH is carried out by the Polish Geological Institute – National Research Institute). For further analysis from all the intakes, only those in which chemical composition of groundwater, were marked. The results are shown in the graphs of Box – and – Whisker Plot. For the obtained results it can be concluded that concentration of chloride, nitrates, pH and electrical conductivity not exceed the limit values (threshold) specified by the devices manufacturer (Nibe–Biwar Technical Materials). The concentration of iron and manganese exceed the threshold in single well. The use of polluted waters which do not fulfill requirements set by the manufacturers of heat pumps is possible indirectly by using an intermediate heat exchanger.

Keywords: low–temperature geothermal, underground water, heat pumps, Nowy Sącz

Przesłano do redakcji: 23.02.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.59

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 311-322

Martyna MOKRZECKA[1]

MIĘDZYNARODOWE SYSTEMY CERTYFIKACJI LEED, BREEAM I DGNB. WSTĘPNA ANALIZA PORÓWNAWCZA POPARTA STUDIUM PRZYPADKU

Artykuł podejmuje zagadnienie certyfikacji budynków za pomocą międzynarodowych systemów certyfikacji LEED, BREEAM, DGNB.W Polsce jak i w całej Unii Europejskiej sektor budowlany pochłania najwięcej energii – około 40% całkowitego zużycia. W związku ze zmieniającymi się przepisami Unii Europejskiej, a także z rosnącą świadomością ekologiczną społeczeństw coraz częściej porusza się temat zmiany podejścia do projektowania i realizacji obiektów budowlanych. Nowoczesne budynki powinny być obiektami, przy których w każdej fazie procesu powstawania – od wyboru działki, poprzez projekt i realizację, kończąc na użytkowaniu ogranicza się zużycie surowców to znaczy energii i wody, ogranicza się ilość odpadów, ale także stosuje się nowoczesne technologie i materiały. Opierając się na przeprowadzonych studiach literaturowych, oraz wykonanych analizach komparatywnych, autor opracował podstawowe zestawienie powyższych certyfikatów pod katem powszechności stosowania, a także rodzajów kryteriów, którymi się kierują, oraz wagą tych kryteriów. Na przykładzie budynku biurowego, który w procesie symulacji, został certyfikowany za pomocą każdego z systemów, wykazano, iż, certyfikaty mimo pozornych różnic, posiadają pewne cechy wspólne - w każdym systemie budynek uzyskałby certyfikat, jednak na różnym poziomie. W finalnej części artykułu, zostały sformułowane wstępne wnioski dotyczące aspektów ekonomicznych, społecznych i ekologicznych w systemach certyfikacji. Artykuł ma na celu syntezę informacji i dotychczasowych badań dotyczących najważniejszych cech systemów certyfikacji LEED, BREEAM I DGNB

Słowa kluczowe: certyfikacja, architektura, zrównoważony rozwój, energia

1. Wprowadzenie

Koncepcja zrównoważonego rozwoju, zaczęła być poważnie brana pod uwagę w rozwoju poszczególnych krajów od lat dziewięćdziesiątych dwudziestego wieku, umownie od przyjęcia deklaracji z Rio z w roku 1994 [1]. W tym okresie pojawiło się wiele definicji dotyczących tego modelu rozwoju, każda

[1] Martyna Mokrzecka Politechnika Wrocławska, Wydział Architektury ul. B. Prusa 53-55, 50-317 Wrocław, martyna.mokrzecka@pwr.edu.pl

z nich bazuje jednak na trzech głównych aspektach tj. ekonomii, środowisku i aspekcie społecznym. Systemy certyfikacji wielokryterialnej budynków są w tym kontekście rozważane, jako narzędzia pozwalające na zmierzenie stopnia zaawansowania obiektów w spełnianiu przez nie zasad zrównoważonego rozwoju. Certyfikaty, które zostały wybrane do analizy charakteryzują się przede wszystkim dużym zasięgiem terytorialnym ich stosowania, a także popularnością. Pomimo, że w Polsce są dosyć nowym rozwiązaniem – pierwszy certyfikat został przyznany w 2010 roku, z roku na rok zdecydowanie zwiększa się ich popularność – obecnie jest ich 152 i ich liczba stale rośnie [2].

2. Omówienie poszczególnych systemów certyfikacji

2.1. System LEED

W chwili obecnej LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) jest najpopularniejszym systemem certyfikacji na świecie. Ponad 30 000 obiektów uzyskało certyfikat, z czego ok 3800 na poziomie Platinum [3]. Jest też drugim, co do popularności systemem w Polsce, 21 obiektów zostało już certyfikowanych, natomiast 64 obiekty są w procesie certyfikacji [2]. LEED jest systemem amerykańskim, powstałym w 1993 roku. Organem odpowiedzialnym za procesy i przyznawanie certyfikatów jest U.S Green Building Council. Oceną objęte są głównie budynki komercyjne, ale też mieszkalne, wnętrza itp. zarówno nowopowstające, jaki i istniejące. Jego głównymi celami są: zwiększenie wydajności budynków, obniżenie kosztów eksploatacji i zapotrzebowania na energię oraz zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych. Obiekty są oceniane w pięciu kategoriach, w każdej kategorii przyznawana jest określona ilość punktów. Kategorie to: Zrównoważona lokalizacja (26 pkt), Efektywne wykorzystanie zasobów wodnych (10 pkt), Energia i atmosfera (35 pkt), Materiały i zasoby (14 pkt), Jakość środowiska wewnętrznego (15 pkt). Oprócz punktów podstawowych (100 pkt), mogą być też przyznane punkty dodatkowe – za innowacyjność (6 pkt) i regionalne priorytety (4 pkt). Obiekty w zależności od przyznanych punktów, mogą zostać odznaczone certyfikatem na czterech poziomach: Certified (40-49 pkt), Silver (50-59 pkt), Gold (60 -79 pkt), Platinum (80 pkt. i więcej)

Aby otrzymać certyfikat należy spełnić osiem punktów krytycznych tj. zmniejszenie wpływu działalności budowlanej na otoczenie, poprzez erozję gleby i emisję płynów, zmniejszenie zużycia wody, weryfikacja systemów związanych z energią w budynku i ich kalibracja zgodnie z wartościami zamieszczonymi przez inwestora, minimalne wymagania dot. charakterystyki energetycznej budynku, podstawowe wymagania dot. systemów chłodniczych, zapewnienie miejsca do zbierania i przechowywania materiałów z recyclingu, minimalna, jakość środowiska wewnętrznego, kontrola środowiskowego dymu tytoniowego.

2.2. System BREEAM

BREEAM (British Research Establishment Environmental Assesment Method) jest drugim, co do popularności certyfikatem na świecie. Ponad 250 000 budynków jest certyfikowanych w tym systemie w 50 krajach świata. 40 000 Kolejnych jest w trakcie realizacji. [4]. Jest także najpopularniejszym systemem certyfikacji w Polsce. Pierwszy obiekt otrzymał go w 2009 roku, a obecnie posiada go 128 obiektów [2]. BREEAM jest systemem brytyjskim, najstarszym z omawianych w artykule certyfikatów – jest przyznawany od 1990 roku. Instytucja koordynująca i przyznająca certyfikat to BRE (Building Research Establishment) Podstawowym podziałem przy jego przyznawaniu jest rozróżnienie na budynki i zespoły urbanistyczne będące w użyciu, oraz nowopowstające. Od 2013 roku BREEAM funkcjonuje w wersji International, czyli dostosowanej do lokalnych warunków i przepisów. Obiekty oceniane są w następujących kategoriach: zarządzanie (do 12% pkt.), Zdrowie i samopoczucie (do 15% pkt.), energia (do 19% pkt.), transport (do 8% pkt.), woda (do 6% pkt.), materiały (do 12,5% pkt), Odpady (do 7,5% pkt), zanieczyszczenia (do 10% pkt.), Użycie terenu i ekologia (do 10% pkt.), innowacja (do 10% dodatkowo). W zależności od ilości punktów budynki mogą zostać ocenione w pięciostopniowej skali dla budynków projektowanych i sześciostopniowej dla istniejących: Pass>25% + 1 pkt. krytyczny, Good>40% + 2 pkt. krytyczne, Very good >55% + 4 pkt. krytyczne, Excellent>70% + 11 pkt. krytycznych Outstanding >85% +11 pkt. krytycznych Istnieje 11 punktów krytycznych i są to: oprawy oświetleniowe o wysokiej częstotliwości, instrukcja użytkowania budynku, kontrola zużycia energii przez najemców, zużycie wody, środowiskowy i społeczny kodeks postępowania wykonawców, rozruch, wydajność energetyczna, technologie bez lub niskowęglowe, monitorowanie zużycia wody, składowanie materiałów do recyclingu, ograniczenie wpływu na środowisko.

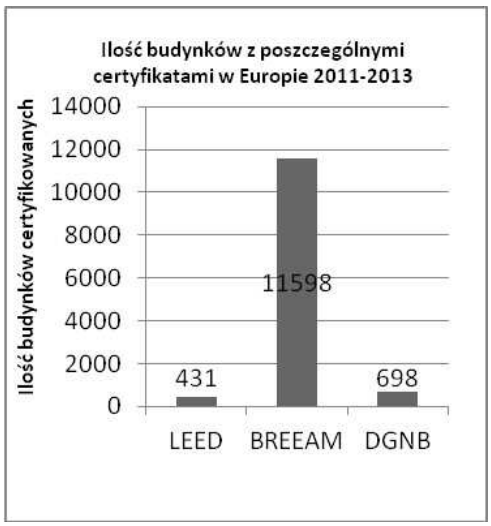
2.3. System DGNB

DNGB jest certyfikatem opracowanym przez Deutche Gesellschaft fur Nachhaltiges Bauen, czyli niemieckie stowarzyszenie budownictwa zrównoważonego (DGNB) we współpracy z Federalnym Ministerstwem Transportu, Budownictwa i Rozwoju Miasta. DGNB jest najmłodszym z certyfikatów - powstał w 2009 roku i do tej pory nie ma jeszcze obiektu certyfikowanego nim w Polsce. Na całym świecie do roku 2013 zostało nim certyfikowanych ok 1600 obiektów [5]. DGNB obejmuje 6 aspektów budynku: Aspekt ekologiczny (15 kategorii) 23% punktów, Aspekt ekonomiczny (2 kategorie) 22% punktów, Aspekt społeczno – kulturowy (17 kategorii) 23% punktów, Aspekt technologiczny (10 kategorii) 23%, Aspekt jakości procesu (13 podkategorii) 10%, Aspekt lokalizacji (8 podkategorii) – dodatkowy aspekt. W zależności od ilości punktów budynek lub zespół urbanistyczny może otrzymać ocenę: Bronze (50%-64,9% pkt.), Silver (Bronze + 65-79,9% pkt.), Gold (Bronze + Silver + 80% pkt. i więcej).

Warunkiem koniecznym do otrzymania certyfikatu na każdym poziomie jest spełnienie dwóch punktów krytycznych Są to: zawartość LZO w wybranych pomieszczeniach, nieprzekraczająca 3000 mikro g/m^3, oraz zawartość formaldehydu nieprzekraczająca 120 mikro g/m^3; Konieczność posiadania przez budynek udogodnień dla osób niepełnosprawnych we wszystkich ogólnodostępnych przestrzeniach. Popularność DNGB rośnie jednak w tym momencie, jest certyfikatem dużo mniej rozpowszechnionym niż LEED czy BREEAM.

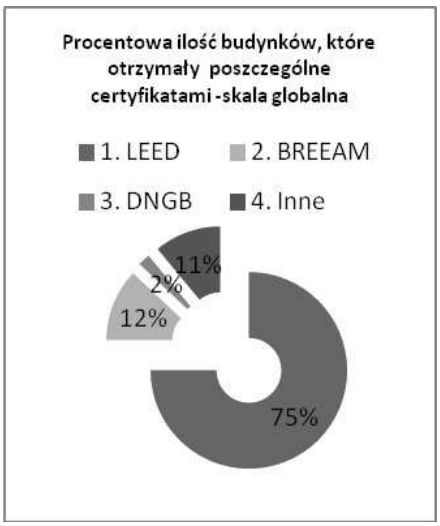
3. Porównanie certyfikatów LEED, BREEAM, DGNB

3.1. Porównanie popularności



Rys. 1. Proporcje ilości przyznanych certyfikatów Europie, na podstawie [6]

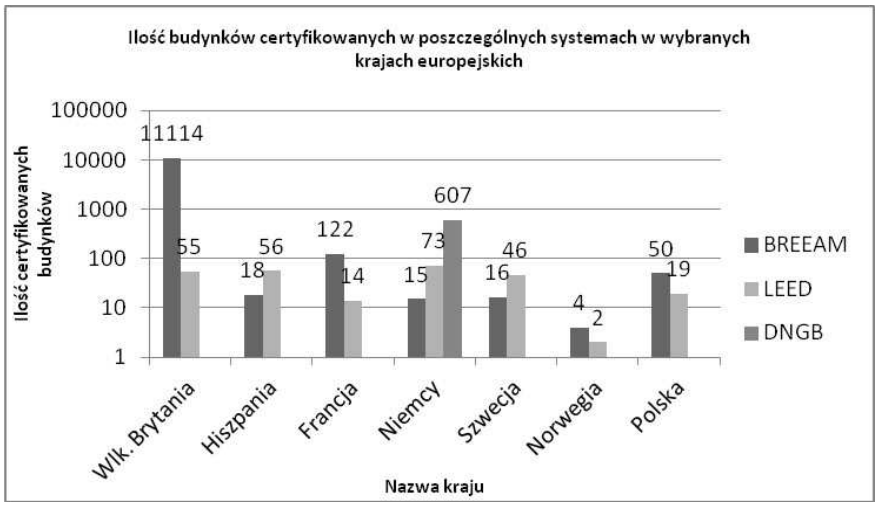
Fig. 1. Amount of cert. buildings in Europe, based on [6]



Rys. 2. Proporcje ilości przyznanych certyfikatów na świecie, na podstawie [6]

Fig. 2. Amount of cert. buildings worldwide, based on [6]

Z powyższych zestawień można wywnioskować, iż popularność danego certyfikatu jest największa na obszarze, na którym został opracowany. W związku z tym, globalnie najbardziej rozpowszechniony jest LEED, który dominuje przede wszystkim w Ameryce Pn., natomiast w Europie, a zwłaszcza w Wielkiej Brytanii najpowszechniejszy jest BREEAM. Jest to zasadne, głównie ze względu na fakt, iż certyfikaty powstawały przede wszystkim w nawiązaniu do specyfiki swojej lokalizacji. W procesie ich rozwoju, wykształcały się ich kolejne odmiany, dostosowane do Państw, w których powstawały, jednak ich centra ze sztabami specjalistów i konsultantów rozwijały się przede wszystkim w krajach macierzystych i najbliżej z nimi powiązanych (LEED Kanada – najwięcej certyfikatów poza USA) [3].



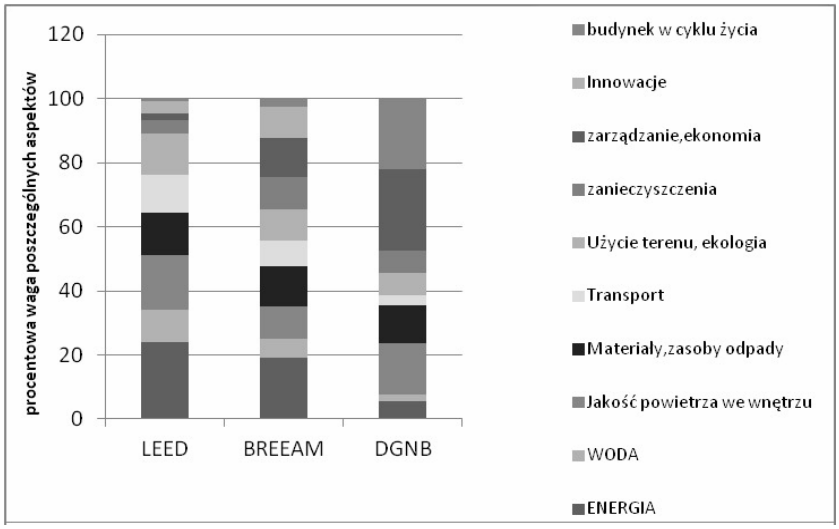
Rys. 3. Zestawienie ilości budynków certyfikowanych w systemach LEED, BREEAM I DGNB w wybranych krajach europejskich

Fig. 3. Amount of buildings certified by LEED, BREEAM or DGNB in selected European countries

W powyższym porównaniu, zdecydowano się na zestawienie krajów o zróżnicowanym nominalnym PKB w latach analogicznych do lat, w których powstawały dane budynki [7]. Na tej podstawie można zaobserwować, iż kraje z najwyższym PKB-, czyli Niemcy, Francja i Wielka Brytania, mają także największą ilość budynków certyfikowanych. Co ciekawe, obydwa te kraje wypracowały i rozwinęły własny system certyfikacji (Nieuwzględniony w artykule HQE). Kraje oscylujące w okolicach średniej wartości PKB, – czyli Szwecja, Hiszpania, czy Polska mają odpowiednio zbliżone ilości budynków certyfikowanych, w żadnym z tych krajów nie występuje certyfikat DGNB. Ciekawym przykładem jest Norwegia, która pod względem PKB plasuje się na podobnych miejscach jak Szwecja czy Polska, natomiast pod względem ilości certyfikatów jest na jednym z ostatnich miejsc w Europie, pomimo tego, że jako jeden z niewielu krajów posiada własną wersję certyfikatu BREEAM- BREEAM Norway.

3.2 Kryteria oceny

Jak można zaobserwować (rys. 4) BREEAM posiada najwięcej składowych na poziomie aspektów. Wartości każdej z nich oscylują wokół podobnych wartości, nieznacznie większy nacisk jest położony na aspekt energii oraz środowiska wewnętrznego i komfortu użytkowników. W aspekcie energii mieści się przede wszystkim poziom zużycia energii oraz kwestie związane z emisją CO_2. W aspekcie komfortu poruszany jest problem światła dziennego, jakości powietrza, komfortu termicznego, akustycznego obecności legionelli itp.



Rys. 4. Wagi poszczególnych aspektów

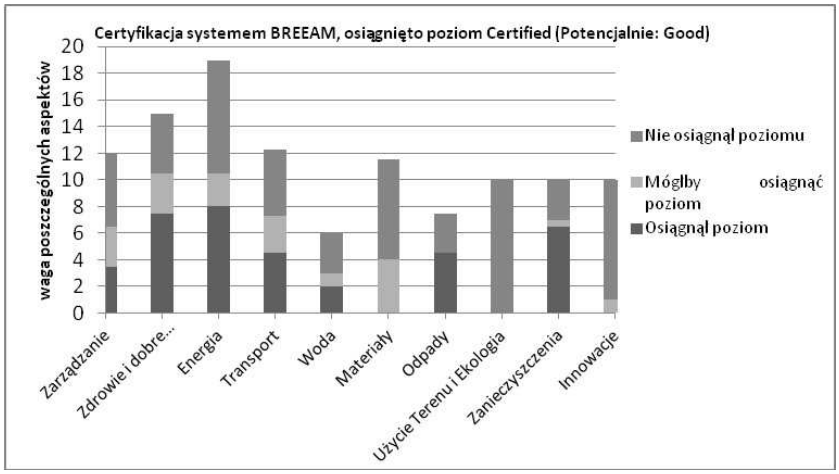
Fig. 4. Importance of particular aspects

Problemem może być zbyt duże rozdrobnienie, utrudniające sformułowanie jasnych zasad certyfikacji.), BREEAM bazuje na prawodawstwie brytyjskim i unijnym, pozwala jednak na uwzględnienie lokalnej specyfiki rynków nieruchomości. W kontekście zrównoważonego rozwoju, także brakuje mu filaru ekonomicznego, jednak uwzględnia zarządzanie procesem, jako osobny aspekt. LEED z kolei kładzie zdecydowanie większy nacisk na aspekt energii i atmosfery, w którym zawiera się przede wszystkim optymalizacja zużycia energii, a także użycie odnawialnych źródeł energii. Kolejnym ważnym aspektem jest zrównoważona lokalizacja, która zawiera w sobie kryteria związanie z wyborem lokalizacji, transportem, ochroną ekosystemów. LEED jest uważany za certyfikat najbardziej ukierunkowany na ekologię i tzw. Zielone budynki. Mniej można go rozpatrywać w kategoriach zrównoważonego rozwoju, ze względu na zdecydowany brak jednego z filarów tegoż rozwoju, czyli aspektu ekonomicznego. W odróżnieniu od BREEAMU przyznaje jednak punkty za aspekty regionalne bazuje jednak na wiedzy i doświadczeniu Amerykańskiego Stowarzyszenia Inżynierów Ogrzewnictwa, Chłodnictwa i Klimatyzacji.

Twórcy DNGB w związku z tym, że powstał on najpóźniej, mieli możliwość obserwacji pozostałych dwóch systemów certyfikacji i wyciągnięcia wniosków przy tworzeniu własnego. DGNB charakteryzuje się najbardziej zrównoważonym podziałem aspektów, ale jednocześnie dużą przekrojowością przez zagadnienia, które porusza. Ma właściwie cztery porównywalnie istotne aspekty, tj. ekologia, zagadnienia społeczne, technologia i ekonomia. Jako jedyny w znaczący sposób obejmuje aspekt ekonomiczny, w którym zawiera m.in. koszty budynku w jego cyklu życia. Istotny w tym systemie jest także aspekt, jakości powietrza we wnętrzu, do niego też odnosi się jeden z wymogów krytycznych.

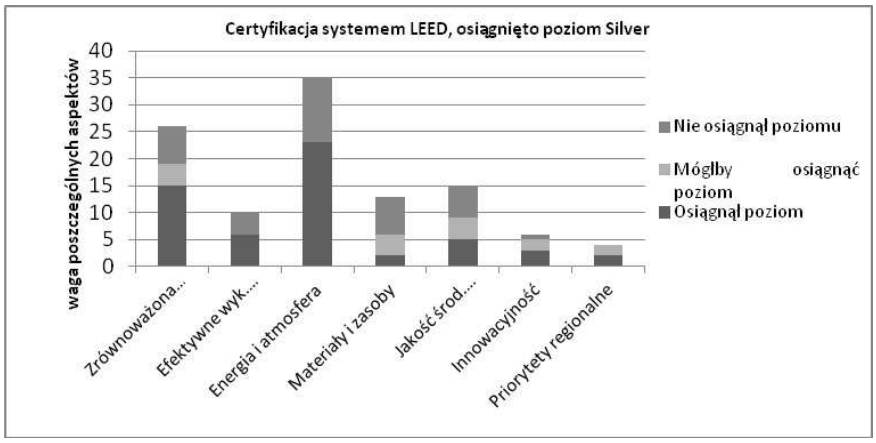
3.3. Symulacja implementacji każdego z systemów w tym samym obiekcie

Pod koniec 2010 roku duński instytut rozwoju i badań nad budownictwem przeprowadził eksperyment, w którym zespół specjalistów reprezentujących każdy z czterech systemów certyfikacji (LEED, BREEAM, DNGB, HQE), przeprowadził niezależną certyfikację tego samego obiektu w danym systemie. Wybrany obiekt to budynek biurowy, o powierzchni 6000 m^2, którego budowa została zakończona w 2009 roku. Przyjęto kryteria dla budynków nowopowstających. Budynek nie był budowany pod kątem wymagań któregokolwiek systemu. Wyniki pokazały, że obiekt uzyskałby certyfikat w każdym systemie, z tym, że na różnych poziomach. Instytut rozwoju nad budownictwem wykazał, że każdy z certyfikatów na poziomie pewnej ogólności porusza zbliżone zagadnienia. Różnice pojawiają się w detalach, podejściu do określonych zagadnień. oraz kwestiach formalnych (dokumentacji). Budynki osiągnęły dość wysokie wyniki w kryteriach związanych z energią, środowiskiem wewnętrznym, odpadami i transportem, natomiast gorszą pod względem wody, materiałów, otoczenia i innowacji. Autorzy podkreślili konieczność adaptacji każdego z systemów do warunków regionalnych. Duńskie badanie pokazuje, iż na pewnym poziomie jest możliwe uzyskanie każdego z certyfikatów, bez konieczności wybitnego dostosowania się do ich wymogów na każdym poziomie realizacji obiektu. Jednakże, w przypadku chęci otrzymania certyfikatów na najwyższych poziomach, nie jest to możliwe bez odpowiednich konsultacji i dostosowań, od fazy projektowej do końcowej.

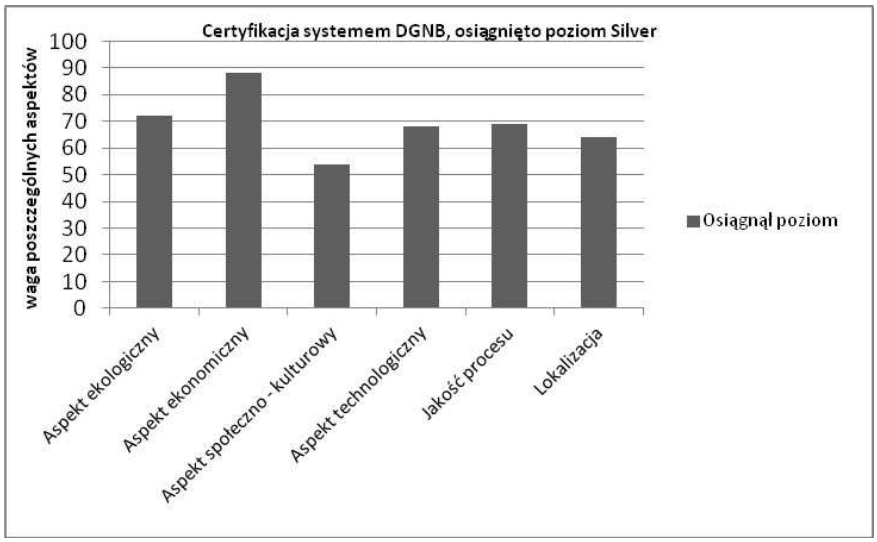


Rys. 5. Certyfikacja budynku biurowego przy pomocy systemu BREEAM, na podstawie [8]

Rys. 5. Certification of office building, using BREEAM system, based on [8]



Rys. 6. Certyfikacja budynku biurowego przy pomocy systemu LEED, na podstawie [8]
Rys. 6. Certification of office building, using LEED system, based on [8]



Rys. 7. Certyfikacja budynku biurowego przy pomocy systemu DGNB, na podstawie [8]
Rys. 7. Certification of office building, using DGNB system, based on [8]



Rys. 8. Budynek biurowy, poddany trzem systemom certyfikacji, Company house w Danii [13]

Rys.8. Office building, on which certification systems were simulated, Company house in Denmark [13]

4. Podsumowanie

4.1. Zasadność stosowania

Zasadność stosowania certyfikatów można rozpatrywać w kilku aspektach. W kontekście oszczędności surowców w eksploatacji, czyli np. oszczędności energii, zakłada się, że budynki certyfikowane zużywają jej mniej. Każdy z certyfikatów przyznaje odpowiednie ilości punktów za zmniejszenie zużycia energii w stosunku do standardowego budynku. Najmniej, bo tylko 10% punktów przyznaje DGNB, co jednak może wynikać z wysokich wymagań dot. Ograniczenia zużycia energii w Niemczech, niezależnie od certyfikacji. Najwięcej punktów z kolei za oszczędności w energii przyznaje LEED, jednak zgodnie z badaniami [6] średnio 100 budynków w Stanach Zjednoczonych certyfikowanych LEEDEM zużywa ok. 18-39% mniej energii na m^2 niż standardowe budynki. Jednak z tych samych badań wynika, że 28 -35% budynków zużywa więcej energii, niż standardowe. Oznacza to, że inwestorzy są w stanie uzyskać wymagane progi punktowe, pomijając aspekt energetyczny. Analogicznie w BREEAM, wymagania energetyczne są niezbędne tylko przy dwóch najwyższych stopniach certyfikatu. Są to bez wątpienia słabe punkty certyfikacji. W kontekście ekonomicznym, z analiz wynikają często sprzeczne informacje, spowodowane tym, że na wielu rynkach światowych są to wciąż rozwiąza-

nia nowe i mało popularne. Źródła podają, iż osiągnięcie najniższych not w certyfikacji to wzrost kosztu budynku od 0 do 3%, natomiast najwyższych nawet do 7% [9]. Koszty można jednak zoptymalizować, jeżeli przystąpi się do procesu certyfikacji odpowiednio wcześniej i pod jego kątem przeprowadzi się cały proces inwestycyjny [10]. Kolejnym aspektem związanym z obiektami komercyjnymi jest fakt, iż w „zielonych" budynkach, stawki czynszów są wyższe szacunkowo o 2-6%, i rosną szybciej niż w standardowych obiektach. Charakteryzują się także większym stopniem powierzchni wynajętych, co także generuje zysk [9]. Wartość rynkową, którą zyskują dzięki certyfikatom zielone budynki określa się, jako „green value", czyli zieloną wartość dodaną do standardowej wartości obiektu [11]. Jest to nie tylko wyższy koszt czynszu i jego szybszy wzrost, ale także dużo wyższe ceny sprzedaży obiektów z certyfikatami – nawet o 16% przewyższające ceny standardowych obiektów [12]. Uzasadnienie opłacalności finansowej obiektów certyfikowanych opiera się, więc na podstawowym założeniu, kalkulacji kosztów w całkowitym procesie użytkowania obiektu, a nie jedynie kosztu budowy i pierwszych lat eksploatacji. W aspekcie społecznym, także ciężko jest jednoznacznie ocenić korzyści i wady. Bez wątpienia pozytywnym zjawiskiem, jest to, że komfort użytkowników jest brany pod uwagę w wielu aspektach. Budynki certyfikowane poprawiają środowisko pracy i życia. Zgodnie z raportem UE pracownicy „zielonych" budynków biorą zwolnienia lekarskie o 30-50% rzadziej niż ich koledzy w innych biurowcach.

4.2. Wnioski

Sektor budownictwa został zdefiniowany przez UE, jako posiadający największy potencjał w zmniejszeniu zużycia energii, ale także – jak wspomniano na początku artykułu, jako zużywający 40% energii w Unii. Z tego względu. Istotnym jest, aby próbować minimalizować jego negatywny wpływ na środowisko. Certyfikaty wielokryterialne, pomimo wątpliwości, które budzą, mają jedną niewątpliwą zaletę- zwracają uwagę na zrównoważony rozwój i prowokują do dyskusji. Faktem jest, że obecnie, każdy z systemów posiada wiele minusów i niedociągnięć, a także prowadzi do zwiększenia biurokracji w cyklu inwestycji, jednak niewątpliwie wpływa także, na jakość budynku, podkreślając zużycie surowców, komfort użytkowników, czy materiały, z których jest zbudowany. Być może w przyszłości należałoby skoncentrować się na unifikacji systemów certyfikacji, tworząc zamiast kilku systemów o trudnych do porównania kryteriach, jeden wiodący, który łączyłby w sobie najlepsze cechy każdego z nich. Pozwoliłoby to na dynamiczniejszy rozwój systemów certyfikacji i możliwość łatwego porównywania budynków na rynkach nieruchomości. Ciekawym rozwiązaniem było by także stworzenie certyfikatu, który dokładnie odpowiadałby na wymogi dyrektywy EPBD wprowadzonej przez Unię Europejską i który mógłby rozwijać się wraz z rozwojem przepisów unijnych. Pozwoliłoby to bezpośrednio powiązać cele Unii dotyczące zmniejszenia zużycia energii w budynkach i dążenia inwestorów, którzy dostrzegają liczne korzyści ekonomiczne związane z certyfikacją obiektów.

Literatura

[1] Deklaracja z Rio w sprawie środowiska i rozwoju , Konferencja NZ Środowisko i Rozwój, Rio de Janeiro, Brazylia 1992 http://www.mipe.oswiata.org.pl/rozwoj/doc/deklaracja_z_rio.pdf. [dostęp 20.04.2014].

[2] Gutowski A;Wójcik J; Wypych R: Zielone Budynki w Polsce, Raport 2014, Colliers international ,www.propertynews.pl/media/plik/15405.html [dostęp 29.04.2014].

[3] U. S Green building council http://www.usgbc.org/projects [dostęp 29.04.2014].

[4] BREEAM http://www.breeam.org/page.jsp?id=559 [dostęp 29.04.2014].

[5] DGNB http://www.dgnb-system.de/en/projects/ [dostęp: 06.05.2014].

[6] Colliers international, http://www.colliers.com [dostęp 05.2014].

[7] http://wdi.worldbank.org/tables [dostęp 06.05.2014].

[8] Birgisdóttir H. Lesson learned from testing four different certification methods for buildings, LEED, BREEAM, DGNB, HQE, Raport 2010, Danish Building Research Institute http://www.vbr.is/files/HarpaBirgisdottir120511.pdf [dostęp 29.04.2014].

[9] Who Pays for Going Green? The Economics of Sustainable Buildings, Raport Richard Ellis, 2009, portal.cbre.eu/.../emea_economics_of_sustainable_buildings/report [dostęp 29.04.2014].

[10] Janicka K. Zielone budynki biurowe na rynku nieruchomości w Polsce, Kwartalnik nauk o przedsiębiorstwie nr 1/2014, str.57-65.

[11] A comparison of green building certifications in Europe: How does it apply to practice [W]:Lux real forum of sustainability 2013, http://www.oai.lu/files/ actualites/2013/2013_01_31_PwC_LRouach_Presenttion_LuxReal_FORUM_Sustainability_January_2013.pdf [dostęp 29.04.2014].

[12] Eichholtz P. Doing Well by Doing Good? An Analysis of the Financial Performance of the Green Office Buildings in the USA, Maastricht University and California University raport 2009 http://www.ucei.berkeley.edu/PDF/seminar20090130.pdf [dostęp 29.04.2014].

[13] http://www.ncc.se/press/cision-page/c4768724147b29ce/ncc-f%C3%83%C2%B6rst-med-breeam-certifierad-kontorsbyggnad-i-danmark/ [dostęp: 05.2015].

INTERNATIONAL CERTIFICATION SYSTEMS LEED, BREEAM, DGNB. PRELIMINARY COMPARATIVE ANALYSIS, FOLLOWED BY CASE STUDY

S u m m a r y

Paper concerns the issue of international building certification systems, LEED, BREEAM, DGNB. In Poland, the same as in other European union's countries, building sector consumes the biggest amount of energy – about 40% of whole usage. Due to changes in European Union law regulations, but also because of rising ecological awareness of the society, the topic of changing the attitude to designing and realization process is being held more often than before. New buildings should be designed, constructed and used with respect to environment and natural resources. Furthermore, the highest class technical solutions and materials should be used. Based on literature studies, as well as comparative analysis, author prepare the summary of mentioned systems. Analysis of popularity, criteria types, and importance of particular criteria are presented and

summarized. The case study is the office building, on which was made a simulation of each certification process. It was proved, that despite of some differences, systems have some common features – in each system building achieved the certificate, but on different level. In the final part of the paper some preliminary conclusions were formulated – concerning economic, ecological and social aspects in certification systems. The aim of the paper is to synthesis information and researches on LEED, BREEAM and DGNB.

Keywords: certification, architecture, sustainable development, energy

Przesłano do redakcji: 26.01.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.60

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 323-334

Witold NIEMIEC[1]
Feliks STACHOWICZ[2]
Tomasz TRZEPIECIŃSKI[3]
Marcin JURGILEWICZ[4]

SANITACJA OBSZARÓW WIEJSKICH POPRZEZ ROLNICZE WYKORZYSTANIE OSADÓW ŚCIEKOWYCH

Sanitacja obszarów wiejskich polega na działaniach technicznych, organizacyjnych, ekonomicznych oraz kulturowych, których celem jest podniesienie jakości życia i standardu sanitarnego miejsca zamieszkania. Podstawowymi środkami technicznymi umożliwiającymi sanitację są instalacje do zaopatrzenia w wodę, kanalizacja, składowiska odpadów pochodzenia gospodarczego oraz rolniczego. Rozwój turystyki na terenach wiejskich w Polsce jest zależny przede wszystkim od szybkiego rozwoju infrastruktury kanalizacyjnej oraz przydomowych oczyszczalni ścieków. Przedstawiono podstawowe możliwości przeróbki i wykorzystania osadów z przydomowych oczyszczalni ścieków w gospodarstwach agroturystycznych, a także omówiono główne elementy przydomowych oczyszczalni ścieków takie jak osadnik gnilny, złoża gruntowo-roślinne, złoża biologiczne, filtry piaskowe oraz drenaż rozsączający. Jedną z metod utylizacji osadów ściekowych jest ich rolnicze wykorzystanie m.in. do nawożenia plantacji roślin energetycznych. Opracowane urządzenie według wynalazku PL 382062 służy do iniekcyjnego dawkowania nawozów, w szczególności osadów ściekowych. Zaletą urządzenia jest wprowadzanie do gruntu na żądaną głębokość stałych nawozów mineralnych i organicznych z równoczesnym ich przykryciem glebą, co obniża intensywność zapachową i ogranicza utratę lotnych składników nawozowych. Prototyp urządzenia wykonano w ramach współpracy Politechniki Rzeszowskiej oraz SGPRE „Agroenergia" w Boguchwale z R&D Centre Inventor Sp. z o.o. w Lublinie. Zaprezentowane innowacyjne urządzenie do iniekcyjnego dawkowania nawozów organicznych zapewnia spełnienie wymagań prawnych i agrotechnicznych rolniczego wykorzystania odpadów komunalnych, a także wymogi ustawy o transporcie drogowym.

Słowa kluczowe:, oczyszczalnie przydomowe, osadnik gnilny, osady ściekowe, sanitacja, turystyka

[1] Autor do korespondencji: Witold Niemiec, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 12, tel. (17) 8651504, e-mail: wniemiec@prz.edu.pl
[2] Feliks Stachowicz, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 12, tel. (17) 8651538, e-mail: stafel@prz.edu.pl
[3] Tomasz Trzepieciński, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 12, tel. (17) 8651714, e-mail: tomtrz@prz.edu.pl
[4] Marcin Jurgilewicz, Wyższa Szkoła Informatyki, Zarządzania i Administracji w Warszawie, tel. (22) 6161566, e-mail: b.bukowska@dobrauczelnia.pl

1. Wprowadzenie

Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w Polsce na koniec 2010 roku z kanalizacji korzystało 62,1% ogółu ludności (w miastach 86,1% ludności miast, natomiast na wsi 24,8% ludności wsi), przy 87,5% ogółu ludności korzystających z wodociągów sieciowych . Z danych tych wynika, że większość mieszkańców polskich wsi nadal korzysta ze zbiorników bezodpływowych (szamb), które powinny być zastąpione przez przydomowe oczyszczalnie ścieków lub sieć kanalizacyjną. Dynamiczny wzrost instalowanych przydomowych oczyszczalni ścieków spowodowany jest dotacjami z funduszy strukturalnych Unii Europejskiej lub z Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej oraz ze środków gminnych.

Sanitacja to program wspólnych działań technicznych, organizacyjnych, ekonomicznych i kulturowych, którego celem jest podniesienie jakości życia, higieny oraz standardu sanitarnego siedliska ludzi [1]. Sanitacja polega więc na odpowiednim rozmieszczeniu i zagospodarowaniu poszczególnych elementów zagrody wiejskiej w sposób zapewniający higieniczne i komfortowe w niej przebywanie. Głównymi środkami technicznymi umożliwiającymi sanitację siedzib są instalacje służące zaopatrzeniu w wodę, kanalizacja, składowiska odpadów pochodzenia bytowo-gospodarczego oraz z produkcji rolniczej [1]. Konieczność sanitacji produkcji żywności jest nieodłącznym elementem życia na obszarach wiejskich. Podstawowym środowiskiem produkcji zdrowej żywności jest wysokiej jakości gleba, a szczególnie jej biologicznie czynna część. Do elementarnych zasad prawidłowej eksploatacji gleby należy zaliczyć m.in. [2, 3]:

- uporządkowaną gospodarkę odpadami zwierzęcymi, roślinnymi i socjalnymi,
- optymalizację nawożenia mineralnego i odkwaszania gleb,
- prawidłowe stosowanie środków chemicznych w każdym rodzaju produkcji zwierzęcej i roślinnej,
- racjonalizacja gospodarki biomasą w celach żywieniowych i nawozowych,
- dostosowanie upraw i użytkowania roślin do zanieczyszczenia atmosfery i gleby.

2. Przydomowe oczyszczalnie ścieków

Oczyszczalnia przydomowa to zespół urządzeń służących do oczyszczania ścieków bytowych z gospodarstwa domowego, tak by możliwe było ich odprowadzenie już jako oczyszczonych do środowiska (do wód powierzchniowych lub do gruntu) [4]. Instalacje biologiczne pozwalają na odprowadzenie ścieków oczyszczonych bezpośrednio do gruntu lub cieku wodnego, a także ich magazynowanie w celu ponownego użycia na cele gospodarcze. Na terenie wsi pozostaje ponad 11 mln osób nieobsługiwanych przez sieciowe systemy kanaliza-

cyjne oraz przydomowe oczyszczalnie ścieków. Dysproporcja pomiędzy długością sieci wodociągowej i kanalizacyjnej na obszarach wiejskich może świadczyć o dużej ilości nieoczyszczonych ścieków trafiających w niekontrolowany sposób do gruntu i do wód. Brak zrównoważenia gospodarki wodno-ściekowej stanowi zagrożenie zarówno dla wód powierzchniowych jak i podziemnych.

Jednym z rozwiązań mających na celu zahamowanie nielegalnych zrzutów ścieków nieoczyszczonych do środowiska są przydomowe oczyszczalnie ścieków. Chociaż ilość ścieków odprowadzanych z terenów wiejskich jest stosunkowo niewielka, to wymagają one oczyszczenia w takim samym stopniu jak ścieki z terenów zurbanizowanych [6]. Jakość ścieków odprowadzanych do różnych odbiorników reguluje rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006 r. w sprawie warunków jakie należy spełnić przyprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego [5]. Jeśli odbiornikiem ścieków oczyszczonych jest grunt lub wody płynące to wymagania jakościowe są następujące [6]:

- $BZT_5 < 40\ mgO_2 \cdot dm^{-3}$,
- $ChZT_{Cr} < 150\ mgO_2 \cdot dm^{-3}$,
- zawiesina ogólna $< 50\ mg \cdot dm^{-3}$.

Wybór sposobu unieszkodliwiania ścieków w przydomowej oczyszczalni ścieków zależy od kilku czynników [6]:

- ilości doprowadzonych ścieków i zawartych w nich zanieczyszczeń,
- warunków gruntowo-wodnych,
- dostępnej powierzchni terenu,
- aspektów ekonomicznych.

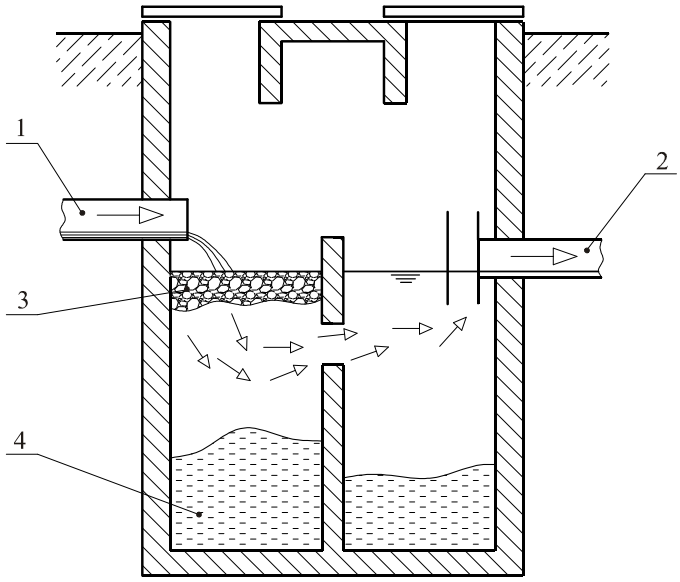
3. Elementy przydomowych oczyszczalni ścieków

3.1. Osadnik gnilny

Osadniki gnilne są wodoszczelnymi zbiornikami jedno- lub wielokomorowymi, które zapewniają wstępną obróbkę ścieków w typowych małych przydomowych oczyszczalniach ścieków. Osadniki podobnie jak szamba są zbiornikami wykonywanymi najczęściej z prefabrykatów betonowych. W ostatnich latach coraz częściej stosuje się gotowe zbiorniki z tworzyw sztucznych. Zadaniem osadnika jest zatrzymanie zawiesin opadających (sedymentujących) oraz zanieczyszczeń pływających (flotujących) (Rys.1). Z cząstek uniesionych na powierzchnię ścieków powstaje kożuch, a cząstki opadłe na dno osadnika tworzą osad, który ulega powolnej fermentacji. W czasie procesu fermentacji cząstki zanieczyszczeń ulegają rozłożeniu na substancje rozpuszczalne i nierozpuszczalne oraz substancje mineralne.

Oferowane w handlu oczyszczalnie ścieków w rzeczywistości są osadnikami gnilnymi, w których ścieki poddawane są fermentacji w warunkach bez-

tlenowych z użyciem środków chemicznych [7]. W efekcie ścieki nie spełniają norm ścieków oczyszczonych i muszą zostać odprowadzone na dodatkowe oczyszczanie za pomocą drenażu w gruncie.



Rys. 1. Osadnik gnilny: 1 - dopływ z instalacji w budynku, 2 - odpływ do biologicznej oczyszczalni ścieków, 3 - części pływające, 4 - osad

Fig. 1. Septic tank; 1 - supply conduit from the installation in the building, 2 - outflow to biological sewage-treatment plant, 3 - float elements, 4 - sludge

Wykonanie drenażu rozsączającego często jest ograniczone warunkami glebowymi (nieprzepuszczalna gleba) oraz wysokim poziom wód gruntowych. Dodatkowo należy liczyć się z wyłączeniem dużej powierzchni terenu z normalnej eksploatacji, a także koniecznością regularnego dosypywania środków biochemicznych do osadnika oraz okresowego wywożenia jego zawartości do zbiorczej oczyszczalni ścieków.

3.2. Złoża gruntowo-roślinne

Oczyszczanie w złożach gruntowo-roślinnych wykorzystuje procesy, jakie zachodzą w warunkach naturalnych na terenach podmokłych oraz bagiennych i polega na redukcji zanieczyszczeń ze ścieków dzięki aktywności biologicznej roślin oraz mikroorganizmów znajdujących się w specjalnie skonstruowanym złożu z wypełnieniem gruntowym (piaskowo-żwirowym) [4]. Oczyszczalnie roślinne można podzielić na systemy z powierzchniowym oraz podpowierzchniowym przepływem ścieków. W pierwszym z systemów poziom ścieków utrzymywany jest ponad powierzchnią gruntu, z kolei rośliny rosną ponad po-

wierzchnią zwierciadła ścieków. Złoża tego typu składają się z układu do rozlewania ścieków oraz warstwy drenażowej do odprowadzania ścieków. Rośliny są zakorzenione w warstwie mułu, który stanowi znaczną część złoża. W złożach gruntowo-roślinnych z podpowierzchniowym przepływem ścieki przepływają przez warstwę złoża gruntowego lub żwirowego, w której rosną rośliny wspomagające proces oczyszczania. Złoże wyposażone jest w warstwę drenażową rozsączającą i drenaż odbierający ścieki oczyszczone.

Rośliny wykorzystywane w oczyszczalniach gruntowo-roślinnych posiadają tkankę powietrzną, która umożliwia dostarczanie tlenu do znajdujących się pod wodą korzeni. W ten sposób tlen przenika do wierzchniej warstwy złoża i w miarę wzrostu głębokości jego zawartość stopniowo maleje zapewniając występowanie w złożu stref tlenowych i beztlenowych, powodując sprawne usuwanie substancji organicznych oraz związków biogennych [4]. Zanieczyszczenia zawarte w ściekach stają się substancją pokarmową dla drobnoustrojów złoża oraz roślin zielonych, których zadaniem jest dostarczanie tlenu do złoża. Większość zanieczyszczeń zawartych w ściekach jest rozkładana i pochłaniana przez mikroorganizmy żyjące w złożu. Skuteczność usuwania zanieczyszczeń w oczyszczalniach gruntowo-roślinnych sięga [4]:

– 80÷90% zawiesiny i zanieczyszczeń organicznych,
– 50÷70% biogenów.

3.3. Oczyszczalnie z osadem czynnym

Oczyszczanie ścieków metodą osadu czynnego polega na oczyszczaniu ich w objętości osadu biologicznego zawierającego mikroorganizmy. Podczas procesu oczyszczania w komorze prowadzi się intensywne napowietrzanie i mieszanie prowadząc do szybkiego przyrostu masy mikroorganizmów, które są odprowadzane dalej z oczyszczonymi ściekami do osadnika w celu oddzielenia masy osadu od oczyszczonych ścieków. Nadmiar osadu jest usuwany do unieszkodliwienia lub w przypadku małych oczyszczalni trafia do osadnika gnilnego, gdzie jest poddawany procesowi fermentacji [4]. W porównaniu do innych metod oczyszczania instalacja oczyszczalni z osadem czynnym mieści się zwykle w jednej komorze i nie wymaga dużego terenu pod zabudowę. Zastosowanie odpowiedniej technologii oczyszczania z osadem czynnym umożliwia usuwanie, poza związkami organicznymi, również azotu i fosforu.

3.4. Złoża biologiczne

Złoża biologiczne według definicji są to urządzenia techniczne wykorzystujące naturalne zjawisko rozwoju mikroorganizmów na danym podłożu (wypełnieniu) podczas rozkładu związków organicznych [8]. Zasada działania złoża biologicznego opiera się na dopływie zanieczyszczeń, które w trakcie natleniania np. przez ruch obrotowy złoża, (lub dodatkowo zainstalowane aeratory) oraz przez procesy enzymatyczne mikroorganizmów zanieczyszczenia są rozkładane

i immobilizowane wewnątrz struktury biofilmu [9].W przydomowych oczyszczalniach ścieków najczęściej wykorzystuje się złoża zraszane, w których rozlewane cyklicznie na powierzchni złoża ścieki przepływają przez plastikowe kształtki lub żwir o odpowiedniej granulacji. W warstwie złoża występują obszary napowietrzone oraz strefy o niedoborze tlenu, w których rozwijają się różne gatunki mikroorganizmów żywiących się zanieczyszczeniami organicznymi. Złoża biologiczne stosowane są głównie do usuwania zanieczyszczeń organicznych oraz nitryfikacji związków azotu do azotanów [4]. W zależności od efektywności złoża, odprowadzane ścieki oczyszczone są kierowane bezpośrednio do odbiornika lub mogą być poddane doczyszczaniu na złożu gruntowo-roślinnym lub rozsączone w gruncie.

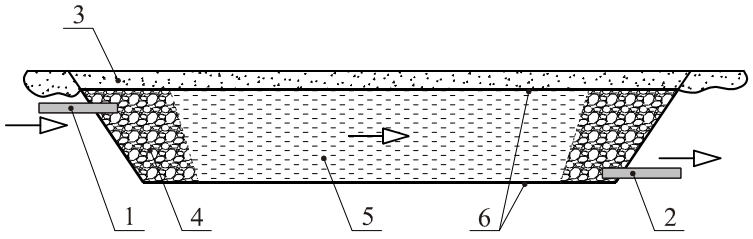
3.5. Filtry piaskowe

Idea działania filtra piaskowego polega na biologicznym i fizykochemicznym oczyszczaniu ścieków w złożu żwirowo-piaskowym. Drobne zawiesiny zatrzymywane są na złożu, a materia organiczna rozkładana jest przez mikroorganizmy rozwijające się na materiale złoża. W filtrach piaskowych następuje znaczne usunięcie zawiesiny, materii organicznej oraz również związków azotu i fosforu. Filtry zapewniają skuteczne doczyszczenie ścieków na złożach biologicznych lub złożach roślinnych, przed ich odprowadzeniem do wód powierzchniowych.

Filtry piaskowe dzieli się ze względu na przepływ ścieków na:

- filtry o pionowym przepływie ścieków, w tym filtry pionowe zakryte i filtry pionowe odkryte z jednorazowym i wielokrotnym przepływem ścieków oraz wielokrotnym przepływem ścieków
- filtry o poziomym przepływie ścieków.

W filtrach piaskowych proces oczyszczania zachodzi wyłącznie w gruncie, a całość złoża może być przekryta gruntem rodzimym (Rys. 2). Grubość warstwy filtracyjnej wynosi 0,6÷0,9 m [4]. Powierzchnia złoża to około 7÷8 m^2.



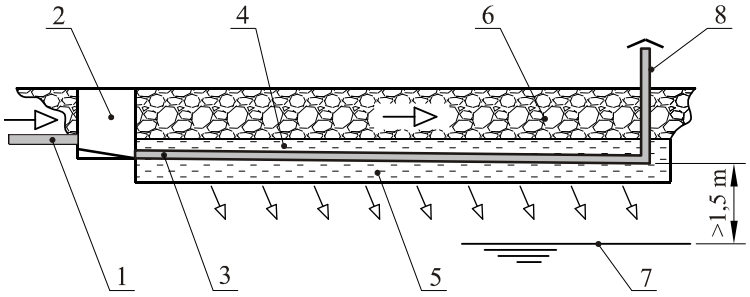
Rys. 2. Filtr piaskowy z poziomym przepływem ścieków: dopływ ścieków z osadnika gnilnego, 2 - odpływ ścieków oczyszczonych, 3 - grunt, 4 - żwir, 5 - złoże piaskowe, 6 - folia (geomembrana)

Fig. 2. Sand filter with horizontal sewage flow: 1 - supply conduit of sewage from the septic tank, 2 - outflow of purifying sewage, 3 - soil, 4 - gravel, 5 - sand filter, 6 - foil (geomembrane)

Filtry piaskowe stosowane są głównie jako drugi stopień oczyszczania ścieków po osadnikach gnilnych lub osadnikach Imhoffa, jak również jako trzeci stopień po biologicznych procesach oczyszczania, gdy wymagany jest dopływ ustabilizowany i o wysokiej jakości. Ścieki po filtrze piaskowym najczęściej odprowadzane są do wód powierzchniowych, ale mogą być również odprowadzane do gruntu przez studnię chłonną [5].

3.6. Drenaż rozsączający

Zadaniem drenażu rozsączającego jest równomierne wprowadzenie do systemu wstępnie oczyszczonych ścieków wypływających z osadnika gnilnego. Drenaż składa się z układu rur rozsączających umieszczonych w rowach wypełnionych specjalnie dobraną warstwą filtracyjną (Rys. 3). Całość przykryta jest warstwą gleby. Odległość dna drenażu od wód gruntowych powinna wynosić minimum 1,5 m [4].



Rys. 3. Drenaż rozsączający: 1 - dopływ ścieków, 2 - studnia rozdzielcza, 3 - przewód rozsączający (drenaż), 4 - warstwa izolacyjna, 5 - warstwa rozsączająca (żwir), 6 - grunt, 7 - poziom wód gruntowych, 8 - wywietrznik

Fig. 3. Infiltrative drainage: supply conduit of sewage, 2 - cubicle well, 3 - infiltrative pipe (drainage), 4 - insulating layer, 5 - infiltrative layer (gravel), 6 - soil, 7 - underground water level, 8 – ventilator

Pod powierzchnią filtracyjną, wytwarza się błona biologiczna będąca wynikiem rozwoju mikroorganizmów, które dokonują rozkładu zanieczyszczeń zawartych w ściekach na substancje stałe i gazowe. Drenaż rozsączający ma ograniczoną zdolność do oczyszczania ścieków, dlatego nie może być stosowany jako samodzielne urządzenie do oczyszczania ścieków. Powinien być wykorzystywany jako końcowy element po osadniku gnilnym i oczyszczalni biologicznej.

4. Zagospodarowanie osadów ściekowych

Podczas użytkowania każdej przydomowej oczyszczalni ścieków powstaje osad, który należy zagospodarować. Osad powstaje w osadniku gnilnym w wyniku gromadzenia zawiesiny na dnie zbiornika i pomimo długiego czasu fer-

mentacji w osadniku zawiera znaczne ilości substancji organicznej oraz mikroorganizmów niebezpiecznych dla zdrowia. Osady ściekowe są poddawane odpowiednim zabiegom technologicznym takim jak wapnowanie, kompostowanie, hydrofitowe odwadnianie, mineralizacja i suszenie, aby spełniały określone normy związane z ich wykorzystaniem lub składowaniem [10, 11]. Spośród wszystkich sposobów sanitacji i stabilizacji biologicznej kompostowanie masy organicznej jest najprostsze i najtańsze. Osad usuwany jest z osadnika gnilnego z częstotliwością zależną od ilości obsługiwanych mieszkańców i pojemności osadnika - zwykle raz na kilka miesięcy. Zbyt rzadkie usuwanie osadu może doprowadzić do przepełnienia zbiornika i wypływania osadu do części biologicznej oczyszczalni, doprowadzając do jej zniszczenia [4].

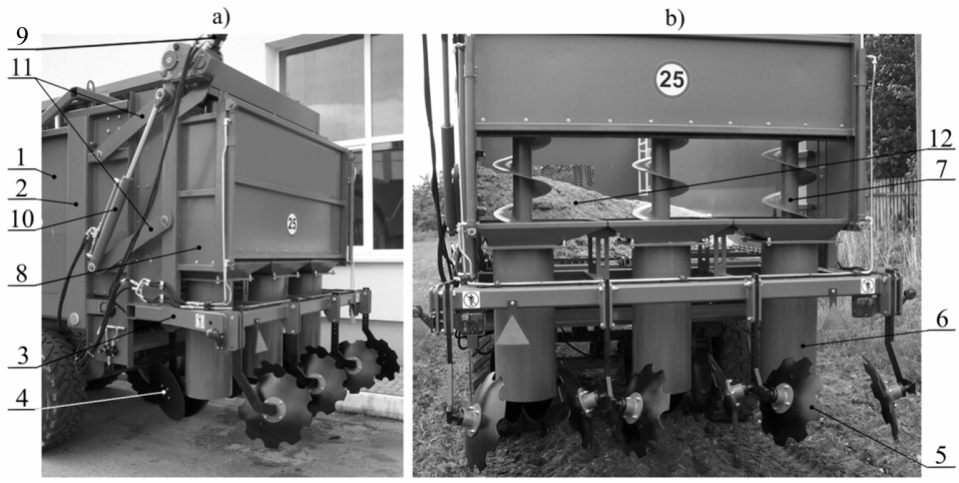
Zakaz możliwości składowania osadów ściekowych po 1 stycznia 2013 roku [12] zmusza do poszukiwania nowych sposobów ich zagospodarowania. Jedną z metod utylizacji, wykorzystującą własności nawozowe osadów jest ich przyrodnicze, m.in. rolnicze użytkowanie. Pod pojęciem przyrodniczego użytkowania osadów ściekowych rozumie się stosowanie tych osadów do nawożenia gleb i roślin, rekultywacji gleb zdegradowanych, utrwalania bezglebowych gruntów narażonych na erozyjne działanie wody i wiatru, produkcji kompostu na wyżej wymienione cele oraz do uprawy roślin nieprzeznaczonych do spożycia i do produkcji pasz. Osady ściekowe można także wykorzystać do upraw leśnych i rolniczych w celu produkcji drewna i sadzonek.

Wieloletnie rośliny energetyczne (o różnej budowie oraz różnych systemach korzeniowych) do prawidłowego rozwoju potrzebują odpowiedniej ilości składników pokarmowych, których w wystarczającej ilości na dłuższy okres podczas zakładania plantacji nie można dostarczyć do gleby [13, 14]. Plantacje roślin energetycznych w trakcie eksploatacji nawożone są powierzchniowo sztucznymi nawozami mineralnymi przy użyciu powszechnie znanych specjalistycznych maszyn zwanych rozrzutnikami nawozów. Efektywność wzbogacania pokarmowego plantacji uzależniona jest od właściwego dawkowania nawozów, głębokości nawożenia oraz bezzwłocznego przykrycia nawozu glebą, czego nie zapewniają klasyczne rozrzutniki nawozów. Proces ten nabiera szczególnego znaczenia w związku z wykorzystywaniem do nawożenia odpowiednio przygotowanego osadu komunalnego z oczyszczalni ścieków, którego zastosowanie jest warunkowane bezzwłocznym przykryciem glebą [15, 16].

Opracowane urządzenie według wynalazku PL 382062 (rys. 4) [17] służy do iniekcyjnego dawkowania nawozów, w szczególności osadów ściekowych i wchodzi w skład parku maszyn opracowywanych w Politechnice Rzeszowskiej w ramach rozwoju technologii zakładania plantacji oraz zbioru i przetwarzania biomasy [18, 19]. Zaletą urządzenia jest wprowadzanie do gruntu na żądaną głębokość stałych nawozów mineralnych i organicznych o konsystencji sypkiej z równoczesnym ich przykryciem glebą, co obniża intensywność zapachową i ogranicza utratę lotnych składników nawozowych. Nawóz dostarczany

jest w pobliże masy korzeniowej bez jej uszkodzenia, co ułatwia przyswajanie składników pokarmowych przez rośliny.

Prototyp urządzenia do iniekcyjnego dawkowania do gleby sypkich nawozów organicznych i mineralnych (rys. 4) wykonano w ramach współpracy Politechniki Rzeszowskiej oraz SGPRE „Agroenergia" Boguchwała z R&D Centre Inventor Sp. z o.o. Lublin.



Rys. 4. Prototyp urządzenia do iniekcyjnego dawkowania do gleby sypkich nawozów organicznych i mineralnych wykonany przez R&D Centre Inventor sp. z o.o. (Lublin) - widok z boku (a) oraz z tyłu (b): 1- rozrzutnik nawozów, 2 - rama nośna, 3 - belka, 4 - krój tarczowy, 5 - obsypnik talerzowy, 6 - cylindryczna obudowa ślimaka, 7 - podajnik ślimakowy, 8 - komora zasypowa, 9 - silnik hydrauliczny, 10 - siłownik hydrauliczny, 11 - ramiona, 12 - nawóz

Fig. 4. Prototype of the device for injection dosage into soil of loose organic and mineral fertilizers built by R&D Centre Inventor Ltd. (Lublin) - one of the side view (a) and the back view (b): 1 - fertilizer spreader, 2 - base frame, 3 - beam, 4 - disk coulter, 5 - ridging plough, 6 - cylindrical housing of worm, 7 - feeding screw, 8 - loading chamber, 9 - hydraulic engine, 10 - hydraulic cylinder, 11- arms, 12 - fertilizer

Urządzenie mocowane jest do rozrzutnika nawozów 1 i posiada zamocowane do ramy nośnej 2 kroje tarczowe 4, za którymi są usytuowane obsypniki talerzowe 5. Z ramą przystawki sprzężone są cylindryczne obudowy 6 z pracującymi wewnątrz podajnikami ślimakowymi 7. Podajniki ślimakowe posiadają w górnej części, ponad strefą roboczą koła zębate stożkowe odbierające poprzez reduktor napęd z silnika hydraulicznego 9. Każdy z trzech podajników ślimakowych może być alternatywnie indywidualnie wyposażony w silnik hydrauliczny zasilany z układu hydraulicznego ciągnika. Położenie krojów względem belek może być ustalane bezstopniowo poprzez układ hydrauliczny. Do ustawienia urządzenia w pozycję transportową służą ramiona 11 sprzężone z siłownikiem hydraulicznym 10.

Głębokość rowków do zasypywania nawozem ustalana jest przez zmianę położenia krojów oraz obsypników talerzowych względem podłoża. W czasie pracy masa nawozu w komorze transportowej rozrzutnika jest przesuwana w kierunku przestrzeni zasypowej za pomocą przenośnika podłogowego. Z przestrzeni zasypowej nawóz podawany jest podajnikami ślimakowymi do wykonanych przez kroje rowków w glebie. Wypełnione osadem ściekowym rowki są zasypywane usytuowanymi za krojami talerzowymi obsypnikami.

5. Podsumowanie

Podczas oczyszczania ścieków zarówno w przydomowych, jak i zbiorczych oczyszczalniach ścieków powstają osady ściekowe, które mogą stanowić cenny materiał do wykorzystania przyrodniczego i rolniczego. Osady z przydomowych oczyszczalni ścieków są najczęściej transportowane do oczyszczalni zbiorczych, dlatego problem przeróbki i wykorzystania osadów pochodzących z przydomowych oczyszczalni ścieków będzie narastał, powodując problemy eksploatacyjne zbiorczych oczyszczalni ścieków

Jednym ze sposobów zwiększenia areałów roślin energetycznych jest zagospodarowanie wzrastającej ilości gruntów odłogowanych, nieużytków, terenów zdegradowanych lub terenów do tej pory nieeksploatowanych rolniczo, co związane jest z możliwością wykorzystania osadów ściekowych jako nawozu. Osady pochodzące z procesu biologicznego oczyszczania ścieków wymagają stabilizacji i higienizacji. Tak przygotowany osad zastosowany jako nawóz nie stanowi dla gleby zagrożenia bakteriologicznego. Prezentowane innowacyjne urządzenie do iniekcyjnego dawkowania nawozów organicznych zapewnia spełnienie wymagań prawnych i agrotechnicznych rolniczego wykorzystania odpadów komunalnych oraz wymogi ustawy o transporcie drogowym.

Literatura

[1] Sikorski M.: Stan i zamierzenia w zakresie sanitacji wsi. Wiadomości Melioracyjne i Łąkarskie, tom 38, nr 4, 1995, s. 167-170.

[2] Siuta J., Wasiak G.: zasady wykorzystania osadów ściekowych na cele nieprzemysłowe (przyrodnicze), Inżynieria Ekologiczna, nr 3, 2001, s. 13-42.

[3] Siuta J.: Ochrona powierzchni Ziemi, stan i niezbędne działania, Aura, nr 3, 2000, s. 7-9.

[4] http://www.pkegliwice.pl/pliki/technologie_oczyszczalni.pdf [dostęp: 25 maja 2014 r.].

[5] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 24 lipca 2006r. w sprawie warunków jakie należy spełnić przyprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego Dz.U. 2006 nr 137 poz. 984.

[6] Chmielowski K., Ślizowski R., Pęgiel K.: Ocena działania przydomowej oczyszczalni ścieków z filtrem piaskowym o przepływie poziomym, Infrastruktura i ekologia obszarów wiejskich, nr 2, 2011, s. 215-223.

[7] http://www.ekoservis.pl/przydomowe,11,p.html [dostęp: 25 maja 2014 r.].
[8] Kempa E.S.: Oczyszczalnie ścieków na obrotowych złożach tarczowych z samorzutnym napowietrzaniem, Ekotechnika, nr 3, 2001, s. 14-17.
[9] Kania-Surowiec I.: Złoża biologiczne w oczyszczaniu ścieków z recyklingu tworzyw sztucznych, Inżynieria Ekologiczna, nr 32, 2013, s. 74-84.
[10] Szwedziak K.: Charakterystyka osadów ściekowych i rolnicze wykorzystanie, Inżynieria Rolnicza, nr 4, 2006, s. 297-302.
[11] Ślizowski R.: Osady ściekowe, ich stabilizacja i wykorzystanie w rolnictwie, Inżynieria Rolnicza 3, 2002, s. 151-161.
[12] Gromiec M.J., Gromiec T.M.: Podstawy strategii zagospodarowania komunalnych osadów ściekowych w Polsce. W: Kierunki przeróbki i zagospodarowania osadów ściekowych. Red. Z. Heindrich. Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2010, s. 7-14.
[13] Niemiec W., Stachowicz F., Szewczyk M., Trzepieciński T.: Technological progress in production, logging and processing of the biomass, SSP – Journal of Civil Engineering, no 2, 2011, s. 85-92.
[14] Niemiec W., Stachowicz F., Szewczyk M., Trzepieciński T.: Production technology and management of energetic plants with lignified shoots. Econtechmod: An International Quaterly Journal on Economics of Technology and Modelling Processes, no 1, 2012, s. 31-34.
[15] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 13 lipca 2010 r. w sprawie komunalnych osadów ściekowych. Dz.U. 2010 nr 137 poz. 924.
[16] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach. Dz.U. 2013 poz. 21.
[17] Niemiec W.: Urządzenie do iniekcyjnego dawkowania do gleby sypkich nawozów organicznych i mineralnych. Politechnika Rzeszowska. Rzeszów. Polska. Opis patentowy, 214031. Zgłosz. P. 382062 z 26.03.2007. Opubl. 29.09.2008.
[18] Niemiec W., Stachowicz F., Szewczyk M., Trzepieciński T.: Technologia wykorzystania biomasy w gospodarstwach małoobszarowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej. Budownictwo i Inżynieria Środowiska, z. 59, 2012, s. 493-500.
[19] Niemiec W., Stachowicz F., Trzepieciński T.: Rozwój technologii produkcji, zbioru i przetwarzania roślin energetycznych o zdrewniałych pędach, Ekologia i Technika, tom 20, 2012, s. 186-191.

AGRICULTURAL USAGE OF SEWAGE SLUDGE FOR RURAL SANITATION

S u m m a r y

Rural sanitation involves technical, organizational, economic, and cultural actions, which the aim is to improve the quality of life and sanitary standard of a place of residence. The enabling sanitation are installations for water supply, sewerage system. Installations for water supply, sewerage system and landfill sites are the basic technical means that enable sanitation. Development of tourism on rural areas in Poland first of all depends on fast development of sewage systems and small wastewater treatment plants. The basic sources of biotope pollution of a village and the possibility of processing and utilization of sludge from sewage treatment plants are pre-

sented. Furthermore, the main elements of the sewage treatment plants such as septic tank, soil-plant sludge, biological sludge, sand filters and infiltrative drainage are discussed. One of the methods of utilization of sewage sludge is its agricultural use, among others, to fertilize energy plant plantations. The developed device according to the PL 382062 patent is used to injection dosing of fertilizers, in particular sewage sludge. The main feature is the introduction into the soil to the desired depth of solid mineral and organic fertilizers with their cover of the soil, which reduces the intensity of the odour and also reduces the loss of volatile constituents of the fertilizer. The prototype device was performed in the framework of the Rzeszow University of Technology and SGPRE "Agroenergia" in Boguchwala and R&D Centre Inventor Ltd in Lublin.

Keywords: household sewage plant, septic tank, sewage sludge, sanitation, tourism

Przesłano do redakcji: 22.05.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.61

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 335-346

Tadeusz NOCH[1]

UKŁAD KOGENERACYJNY PRZY WSPÓŁPRACY POMP CIEPŁA Z KOTŁOWNIĄ OLEJOWĄ I SIECIĄ CIEPŁOWNICZĄ

W niniejszym opracowaniu przedstawiono możliwość zastosowania układu kogeneracyjnego przy współpracy pomp ciepła z kotłownią olejową i siecią ciepłowniczą. W procesie badawczym objęto odzysk ciepła odpadowego z silnikiem Stirlinga. Odzyskane ciepło odpadowe ze spalin kotłowych zużyte jest do napędu silnika Stirlinga, który napędza prądnicę. Wykonano obliczenia bilansu energetycznego. Obliczone wartości średniej temperatury spalin T_{sr} i temperatury otoczenia T_{ot} pozwalają wyznaczyć aktualną sprawność silnika Stirlinga. Wykonany bilans energetyczny oszacowuje ilość możliwej do wytworzenia energii elektrycznej. Ilość ta jest mocno zróżnicowana dla różnych wartości zewnętrznej temperatury otoczenia. Opisano bilans energetyczny dla przypadku, gdy kotłownia sama w całości pokrywa zapotrzebowanie na ciepło. Scharakteryzowano współpracę kotłowni z pompami ciepła. Rozpatrzono pięć wariantów współpracy, wyznaczonych mocą cieplną zainstalowanych pomp ciepła. W każdym z tych wariantów inne są wartości wytworzonej mocy oraz energii elektrycznej z odzysku ciepła. Moc i energia elektryczna może być wykorzystana do napędu pomp ciepła, ewentualnie do pokrycia innych potrzeb. Przeprowadzono analizę wyników obliczeń dotyczących mocy i energii elektrycznej wytworzonych z odzysku ciepła odpadowego ze spalin kotłowych oraz mocy i energii elektrycznej potrzebnych do napędu pomp ciepła. Z analizy wyników obliczeń zawartych w tabeli 1 dotyczącej wytworzonej mocy i energii elektrycznej w sezonie grzewczym, wynika, że ogółem energia elektryczna z odzysku ciepła odpadowego ze spalin wynosi E_{el} = 18 238,88 kWh/a. Natomiast największa, uzyskana z odzysku ciepła odpadowego ze spalin, moc mechaniczna silnika Stirlinga jest równa N_{mstir} = 8,04 kW. Wartość ta pozwala określić moc znamionową silnika do zastosowania w badanym obiekcie.

Słowa kluczowe: bilans energetyczny, silnik Stirlinga, odzysk ciepła, spaliny kotłowe, moc, energia, sprawność.

1. Wprowadzenie

Badaniem objęto zastosowanie silnika Stirlinga do wykorzystania ciepła odpadowego ze spalin w kotłowni GWSA w celu wytworzenia energii elektrycznej, która może być wykorzystana na potrzeby własne obiektów szkoły.

[1] Tadeusz Noch, Katedra Nauk Technicznych Gdańskiej Szkoły Wyższej, 80-656 Gdańsk, ul. Wydmy 3, tel. 602 130 709, e-mail: gsw@gsw.gda.pl

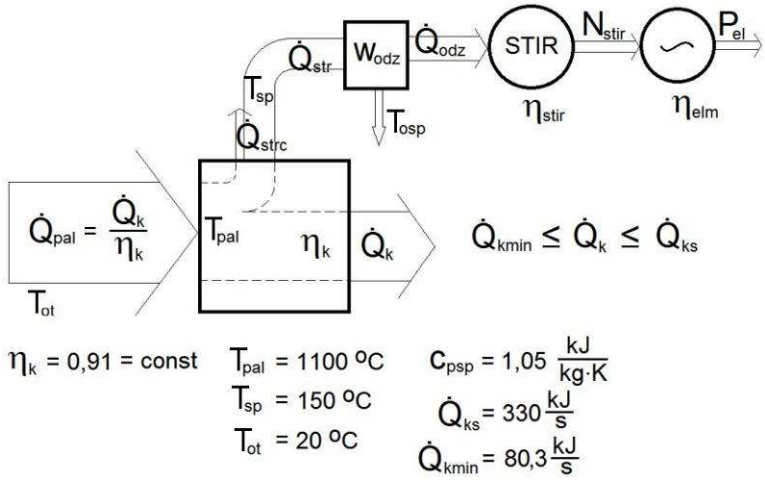
Jedną z koncepcji modernizacji układu ogrzewania pomieszczeń w budynkach jest zastosowanie pomp ciepła współpracujących z kotłownią i siecią ciepłowniczą. Energia elektryczna wytworzona za pośrednictwem silnika Stirlinga mogłaby zostać wykorzystana do napędu silników elektrycznych w pompach ciepła.

Wykonano bilans energetyczny instalacji wytwarzającej energię elektryczną uzyskaną z odzysku ciepła ze spalin kotłowych. W obliczeniach oszacowano możliwą do uzyskania moc silnika Stirlinga, moc elektryczną prądnicy oraz wytworzoną w sezonie grzewczym energię elektryczną. Podstawą do obliczeń jest obliczona w okresie grzewczym moc cieplna kotłowni: moc szczytowa i moc zmienna w czasie.

Dodatkowo w bilansie uwzględniono możliwość współpracy kotłowni z pompami ciepła w założonych wariantach współpracy. Do obliczeń wykorzystano, między innymi program symulacyjny współpracy kotłowni i lokalnej sieci ciepłowniczej z pompami ciepła, opisany w [1].

2. Odzysk ciepła odpadowego z silnikiem Stirlinga

W kotłowni GWSA pracują kotły wodne opalane olejem opałowym. Odzyskane ciepło odpadowe ze spalin kotłowych zużyte jest do napędu silnika Stirlinga, który napędza prądnicę. Schemat przepływów energetycznych przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Schemat przepływów energetycznych w układzie produkcji energii elektrycznej z odzysku ciepła odpadowego ze spalin kotłowych z wykorzystaniem silnika Stirlinga

Fig. 1. Scheme of energy flows in the electricity production system based on waste heat recovery from boiler fumes using the Stirling engine

W dokonanych badaniach do sformułowanego algorytmu i do wykonanych obliczeń przyjmuje się opisane w opracowaniu poniższe założenia.

1. Moc cieplna kotła – $\dot{Q}_k$ – zmienia się w zakresie wartości

$$\dot{Q}_{kmin} \leq \dot{Q}_k \leq \dot{Q}_{ks} \qquad (1)$$
$$\dot{Q}_{ks} = 330\ kW, \quad \dot{Q}_{kmin} = 82{,}5\ kW$$

2. Sprawność kotła jest założona jako stała, niezależna od jego obciążenia cieplnego:

$$\eta_k = 0{,}91 = const \qquad (2)$$

W kotłowni zainstalowane są kotły wodne Viessmanna opalane olejem opałowym. Sprawność kotłów zmienia się ze zmianą obciążenia, ale zmiany te są stosunkowo nieduże. Ilustracja zmian sprawności kotłów Viessmanna przedstawiono w publikacjach [2, 3]. Sprawności kotłów są wyższe, niż opisana powyżej przyjęta wartość do obliczeń. Założono taką sprawność na podstawie danych w katalogach GWSA [4], przyjmując dodatkowe założenie, że w trakcie eksploatacji pomiędzy przeglądami, sprawność tych kotłów będzie nieznacznie niższa od danych katalogowych.

3. Temperatura spalin w palenisku kotłowym jest równa:

$$T_{pal} = 1100^{o}C = const \qquad (3)$$

Wartość tę przyjęto po przeanalizowaniu danych zawartych w publikacjach [2, 3].

4. W obliczeniach założono, że wysokotemperaturowy wymiennik silnika Stirlinga będzie zainstalowany w strumieniu spalin na wylocie z kotła, bez dokonywania jakichkolwiek zmian konstrukcyjnych w ciągu spalin w kotle. Podobnie jak w założeniu 3 przyjęto kolejne założenie dla uproszczenia algorytmu obliczeniowego, że temperatura spalin na wylocie z kotła – T_{sp} – jest stała, niezależna od cieplnego obciążenia kotła:

$$T_{sp} = 150^{o}C = const \qquad (4)$$

5. Ciepło właściwe spalin jest równe $c_{psp} = 1{,}05\ \frac{kJ}{kg \cdot K}$.

6. Zewnętrzna temperatura otoczenia – T_{ot} – jest zmienna w sezonie grzewczym. Zakres tej zmienności wyznaczają: minimalna temperatura obliczeniowa dla pierwszej strefy klimatycznej – równa -16°C oraz temperatura kończąca sezon grzewczy, której wartość wybrano 12°C:

$$-16^{o}C \leq T_{ot} \leq 12^{o}C \qquad (5)$$

Poszczególne wartości temperatury z podanego zakresu zmienności mają w strefie klimatycznej Trójmiasta zadany czas trwania.

7. Stopień odzysku ciepła odpadowego ze spalin w wysokotemperaturowym wymienniku silnika Stirlinga:

$$w_{odz} = 0{,}8 = const \qquad (6)$$

8. Sprawność silnika Stirlinga – η_{stir} – jest uzależniona od danych konstrukcyjnych silnika oraz od danych eksploatacyjnych: stopnia obciążenia silnika, a także od wartości temperatury gorącego i zimnego źródła, na których pracuje silnik.
   W procesie odbioru ciepła wartość temperatury spalin w wymienniku ulega zmianie. Przyjęto, że temperatura gorącego źródła – T_{sr} – jest średnią arytmetyczną z wartości temperatury spalin na wlocie do wymiennika – T_{sp} i temperatury na wylocie z wymiennika – T_{osp}:

$$T_{sr} = \frac{T_{sp} + T_{osp}}{2} \tag{7}$$

   Do obliczeń przyjęto dane konstrukcyjne silnika Stirlinga według informacji z literatury przedmiotu [5 oraz 6÷15].
   a) czynnikiem roboczym jest hel, dla którego wykładnik adiabaty przyjmuje wartość $\kappa = 1{,}66$;
   b) stopień sprężania w silniku założono $\varepsilon = 20$;
   c) stopień regeneracji ciepła w obiegu cieplnym silnika założono $\rho = 0{,}7$.

   Powyższe dane są włączone do przedstawionej niżej zależności opisującej sprawność silnika Stirlinga [5]:

$$\eta_{stir} = \frac{(\kappa - 1)\cdot(1 - c_x)\cdot \ln\varepsilon}{(\kappa - 1)\cdot \ln\varepsilon + (1 - c_x)\cdot(1 - \rho)} \tag{8}$$

   gdzie: $c_x = \dfrac{T_{ot} + 273{,}15}{T_{sr} + 273{,}15}$;

   T_{ot} – temperatura otoczenia, [ºC];
   T_{sr} – średnia wartość temperatury spalin w wysokotemperaturowym wymienniku ciepła silnika, opisana wzorem (7), [ºC];
   ε – stopień sprężania helu;
   ρ – stopień regeneracji ciepła w obiegu cieplnym silnika.

3. Obliczenia i wyniki obliczeń bilansu energetycznego

Kocioł wodny oddaje do lokalnej sieci ciepłowniczej moc cieplną – $\dot{Q}_k$ – zmienną w czasie, zależną od zewnętrznej temperatury otoczenia w okresie sezonu grzewczego. Zgodnie z algorytmem obliczeń i wynikami obliczeń bilansu energetycznego [1] analizie poddano otrzymaną moc elektryczną P_{el} [kW] oraz wytworzoną energię elektryczną E_{el} [kWh/a]. Obliczone wartości średniej temperatury spalin T_{sr} i temperatury otoczenia T_{ot} pozwalają wyznaczyć aktualną sprawność silnika Stirlinga – według zależności (8). Moc mechaniczną silnika obliczono według wzoru:

$$N_{stir} = \dot{Q}_{odz} \cdot \eta_{stir} = \frac{w_{odz} \cdot u_{str} \cdot m \cdot \dot{Q}_{ks} \cdot (1-\eta_k)}{\eta_k} \cdot \eta_{stir} \tag{9}$$

gdzie:

u_{str} – udział strat cieplnych (mocy cieplnej) w spalinach w odniesieniu do całkowitych strat kotła – przyjęto: $u_{str} = 0{,}98$.

Moc elektryczna, przy założeniu sprawności elektromechanicznej prądnicy – $\eta_{elm} = 0{,}95$:

$$P_{el} = N_{stir} \cdot \eta_{elm} = \frac{w_{odz} \cdot u_{str} \cdot m \cdot \dot{Q}_{ks} \cdot (1-\eta_k)}{\eta_k} \cdot \eta_{stir} \cdot \eta_{elm} \tag{10}$$

Powyższe zależności dotyczą jednej z wybranych wartości zewnętrznej temperatury otoczenia w sezonie grzewczym. Do obliczeń bilansu energetycznego przyjęto zmienność tej temperatury, jak pokazano w (5), a każda z tych wartości ma zadany czas trwania. Zewnętrzna temperatura otoczenia narzuca moc cieplną kotła – $\dot{Q}_k$, wynikającą z zapotrzebowania na ogrzewanie pomieszczeń. Moc cieplna kotła może być obliczana z wykorzystaniem chwilowego stopnia obciążenia – wskaźnika eksploatacyjnego szeroko stosowanego w energetyce. Moc cieplną kotła dla poszczególnych wartości temperatury otoczenia oraz wartości stopnia obciążenia uwzględniono w obliczeniach bilansu energetycznego. Wartości mocy cieplnej kotła i wartości chwilowego stopnia obciążenia cieplnego kotła dla zadanych wartości zewnętrznej temperatury otoczenia kształtują się następująco:

1. moc cieplna kotła Q_k od 330 do 80 kW;
2. stopień obciążenia m od 1,0 do 0,243;
3. zewnętrzna temperatura otoczenia od T_{ot} = -16 do 12ºC.

W obliczeniach bilansu energetycznego wyróżnionych jest 29 przedziałów czasowych; w każdym z nich wytwarzana jest energia elektryczna. Całkowita ilość wytworzonej energii elektrycznej w sezonie grzewczym ostatecznie opisana jest wzorem:

$$E_{elc} = \sum_{j=1}^{29} E_{el\,j} = \sum_{j=1}^{29} P_{el\,j} \cdot \Delta\tau_j \tag{11}$$

gdzie wartość mocy – $P_{el\,j}$ – w każdym z 29 przedziałów czasowych opisana jest wzorem (10). Końcowe wyniki obliczeń wytworzonej mocy elektrycznej i energii elektrycznej w sezonie grzewczym zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wytworzona moc i energia elektryczna w sezonie grzewczym

Table 1. Power and electricity created during the heating season

Temperatura otoczenia [ºC]	Moc silnika Stirlinga N_{stir} [kW]	Moc elektryczna z odzysku ciepła odpadowego ze spalin [kW]	Wytworzona energia elektryczna z odzysku ciepła odpadowego ze spalin [kWh/a]
-16	8,04	7,64	183,43
-15	7,77	7,38	177,16
-14	7,49	7,12	170,97
-13	7,23	6,87	164,84
-12	6,96	6,62	158,79
-11	6,70	6,37	152,81
-10	6,44	6,12	293,81
-9	6,18	5,88	352,67
-8	5,93	5,64	202,96
-7	5,68	5,40	388,85
-6	5,44	5,17	372,00
-5	5,19	4,94	473,82
-4	4,95	4,71	564,91
-3	4,72	4,48	645,50
-2	4,48	4,26	715,80
-1	4,25	4,04	776,03
0	4,02	3,83	1 010,06
1	3,80	3,61	1 127,32
2	3,58	3,40	1 225,24
3	3,36	3,20	1 380,98
4	3,15	2,99	1 508,50
5	2,94	2,79	1 943,55
6	2,73	2,59	1 183,28
7	2,53	2,40	806,54
8	2,32	2,21	583,17
9	2,13	2,02	484,94
10	1,93	1,84	440,47
11	1,74	1,65	396,73
12	1,56	1,47	363,73
		Σ =	**18 238,88**

Z analizy wyników obliczeń zawartych w tabeli 1 dotyczącej wytworzonej mocy i energii elektrycznej w sezonie grzewczym, wynika, że ogółem energia elektryczna z odzysku ciepła odpadowego ze spalin wynosi E_{el} = 18 238,88 kWh/a. Z przeprowadzonych badań uzyskano istotne informacje w zastosowaniu praktycznym silnika Stirlinga.

1. Największa, uzyskana z odzysku ciepła odpadowego ze spalin, moc mechaniczna silnika Stirlinga jest równa N_{mstir} = 8,04 kW. Ta wartość liczbowa pozwala określić moc znamionową silnika Stirlinga, który można zamówić u wybranego producenta.
2. Silnik Stirlinga w zaproponowanym układzie ogrzewania pracuje na stosunkowo małych wartościach temperatury źródła gorącego. Uzyskanie znacznego odzysku ciepła ze spalin wymaga zastosowania wymiennika ciepła o stosunkowo dużej powierzchni wymiany ciepła.
3. Wykonany bilans energetyczny oszacowuje ilość możliwej do wytworzenia energii elektrycznej. Ilość ta jest mocno zróżnicowana dla różnych wartości zewnętrznej temperatury otoczenia. Zróżnicowanie to wynika z niżej opisanych powodów:
   a) czas trwania poszczególnych wartości zewnętrznej temperatury otoczenia jest zróżnicowany. Najdłuższy czas trwania przypada dla temperatury T_{ot} = 5ºC; jest to 696 godzin w roku i w tych warunkach, ze względu na czas trwania, jest największa produkcja energii elektrycznej (1 943 kWh/a). Drugi co do wielkości czas trwania – 504 godziny w roku przypada dla temperatury T_{ot} = 4ºC i tu oszacowana produkcja energii elektrycznej jest równa 1 508 kWh/a (tabela 1);
   b) zmieniają się wartości temperatury źródła zimnego i źródła gorącego. Im większa jest ta różnica, tym jest lepsza sprawność silnika Stirlinga i, w rezultacie, tym lepszy stopień wykorzystania ciepła odpadowego ze spalin.
4. Złożenie czasu trwania poszczególnych wartości zewnętrznej temperatury otoczenia oraz oszacowanej produkcji energii elektrycznej może zasugerować przyjęcia poziomu odniesienia w projektowaniu urządzeń instalacji odzyskowej. Optymalny dobór urządzeń (na przykład powierzchnia wymiany ciepła i lokalizacja wymienników ciepła) przypadnie dla warunków panujących w temperaturze otoczenia T_{ot} = 5 lub 4ºC.

4. Współpraca kotłowni z pompami ciepła

W opracowaniu opisano bilans energetyczny dla przypadku, gdy kotłownia sama w całości pokrywa zapotrzebowanie na ciepło. W badaniach nad modernizacją układu ogrzewania w GWSA uwzględnione są warianty współpracy kotłowni z pompami ciepła. W takich przypadkach część mocy cieplnej dostarczanej do odbiorcy przejmują pompy ciepła, a kotłownia pracuje zmniejszoną mocą cieplną. W rezultacie w kotłowni zmniejszone jest zapotrzebowanie na paliwo, zmniejszona jest ilość strat cieplnych w spalinach i w ostateczności zmniejszona jest ilość wytworzonej energii elektrycznej z odzysku ciepła odpadowego.

Rozpatrzono pięć wariantów współpracy, wyznaczonych mocą cieplną zainstalowanych pomp ciepła. Moc pompy ciepła: Q_{pc} = 13,5; 27; 40,5; 54 i 67,5 kW. Natomiast w zestawieniu tabelarycznym zostały uwzględnione trzy warianty, tj. dla mocy pomp ciepła Q_{pc} = 13,5; 27 i 40,5 kW.

W każdym z tych wariantów inne są wartości wytworzonej mocy oraz energii elektrycznej z odzysku ciepła. Moc i energia elektryczna może być wykorzystana do napędu pomp ciepła, ewentualnie do pokrycia innych potrzeb własnych GWSA. Wyniki obliczeń, wykonanych według opisanego wyżej algorytmu matematycznego oraz wykonanych z wykorzystaniem programu symulacyjnego [1], zestawiono w tabelach 2 i 3.

Tabela 2. Moc elektryczna wytworzona z odzysku ciepła odpadowego ze spalin kotłowych oraz moc elektryczna potrzebna do napędu pomp ciepła

Table 2. Electric power produced from the recovery of waste heat from boiler fumes and electric power necessary to propel a heat pump

Temperatura zewnętrzna otoczenia t_{ot} [ºC]	Q_{PC} = 13,5 kW		Q_{PC} = 27,0 kW		Q_{PC} = 40,5 kW	
	Moc wytworzona [kW]	Moc potrzebna (wartość rzeczywista) [kW]	Moc wytworzona [kW]	Moc potrzebna (wartość rzeczywista) [kW]	Moc wytworzona [kW]	Moc potrzebna (wartość rzeczywista) [kW]
-16	7,33	3,85	7,02	7,88	6,70	12,09
-15	7,07	3,79	6,76	7,76	6,45	11,91
-14	6,82	3,74	6,51	7,65	6,20	11,74
-13	6,56	3,69	6,26	7,54	5,95	11,57
-12	6,31	3,64	6,01	7,44	5,71	11,41
-11	6,07	3,59	5,76	7,34	5,46	11,25
-10	5,82	3,54	5,52	7,22	5,22	11,07
-9	5,58	3,49	5,28	7,12	4,99	10,91
-8	5,34	3,44	5,05	7,02	4,75	10,74
-7	5,11	3,39	4,82	6,91	4,52	10,59
-6	4,88	3,34	4,59	6,82	4,30	10,44
-5	4,65	3,29	4,36	6,72	4,07	10,28
-4	4,42	3,24	4,14	6,61	3,85	10,12
-3	4,20	3,20	3,92	6,52	3,63	9,97
-2	3,98	3,15	3,70	6,41	3,42	9,81
-1	3,76	3,10	3,49	6,32	3,21	9,65
0	3,55	3,05	3,27	6,21	3,00	9,49
1	3,34	3,00	3,07	6,10	2,79	9,32
2	3,13	2,95	2,86	6,00	2,59	9,16
3	2,93	2,90	2,66	5,89	2,39	8,99
4	2,73	2,85	2,46	5,79	2,19	8,84
5	2,53	2,80	2,26	5,69	2,00	8,68
6	2,33	2,75	2,07	5,59	1,81	8,52
7	2,14	2,70	1,88	5,49	1,62	8,37
8	1,95	2,65	1,69	5,39	1,44	8,21
9	1,77	2,60	1,51	5,29	1,26	8,06
10	1,58	2,56	1,33	5,20	1,08	7,92
11	1,40	2,51	1,15	5,10	0,90	7,76
12	1,23	2,47	0,98	5,00	0,73	7,62

Tabela 3. Energia elektryczna wytworzona z odzysku ciepła odpadowego ze spalin kotłowych oraz energia elektryczna potrzebna do napędu pomp ciepła

Table 3. Electricity produced from the recovery of waste heat from boiler fumes and electricity necessary to propel a heat pump

Czas trwania zewnętrznej temperatury otoczenia [h/a]	Temperatura zewnętrzna otoczenia T_{ot} [°C]	Q_{PC} = 13,5 kW		Q_{PC} = 27,0 kW		Q_{PC} = 40,5 kW	
		Energia wytworzona [kWh/a]	Energia potrzebna [kWh/a]	Energia wytworzona [kWh/a]	Energia potrzebna [kWh/a]	Energia wytworzona [kWh/a]	Energia potrzebna [kWh/a]
24	-16	176	92	168	189	161	290
24	-15	170	91	162	186	155	286
24	-14	164	90	156	184	149	282
24	-13	158	89	150	181	143	278
24	-12	152	87	144	179	137	274
24	-11	146	86	138	176	131	270
48	-10	279	170	265	347	251	531
60	-9	335	209	317	427	299	654
36	-8	192	124	182	253	171	387
72	-7	368	244	347	498	326	762
72	-6	351	241	330	491	309	751
96	-5	446	316	419	645	391	986
120	-4	531	389	497	794	462	1 214
144	-3	605	460	564	938	523	1 435
168	-2	669	529	622	1 078	574	1 647
192	-1	723	595	669	1 213	616	1 853
264	0	937	805	864	1 639	792	2 504
312	1	1 042	935	957	1 904	871	2 908
360	2	1 128	1 061	1 030	2 159	932	3 297
432	3	1 265	1 251	1 149	2 545	1 033	3 885
504	4	1 374	1 435	1 240	2 919	1 106	4 455
696	5	1 760	1 947	1 576	3 959	1 392	6 039
456	6	1 064	1 254	944	2 548	825	3 886
336	7	719	907	632	1 844	545	2 881
264	8	515	700	447	1 422	379	2 168
240	9	424	625	363	1 270	301	1 934
240	10	380	615	319	1 248	259	1 901
240	11	337	603	277	1 223	217	1 863
240	12	294	592	235	1 201	175	1 828
	Σ =	**16 701**	**16 542**	**15 164**	**33 659**	**13 626**	**51 379**
		U_{ePC} **= 1,010**		U_{ePC} **= 0,451**		U_{ePC} **= 0,265**	

gdzie: U_{ePC} – udział energii elektr. wytworzonej w sezonie grzewczym z odzysku ciepła odpadowego w pokryciu zapotrzebowania do napędu pomp ciepła.

Dla każdego wariantu współpracy kotłowni z pompami ciepła obliczono moc i energię elektryczną wytworzoną z odzysku ciepła za pośrednictwem silnika Stirlinga (w tabelach: kolumny zatytułowane: „Moc wytworzona" i „Energia wytworzona") oraz rzeczywistą moc i energię elektryczną potrzebną do napędu pomp ciepła (w tabelach: kolumny zatytułowane: „Moc potrzebna. Wartość rzeczywista" i „Energia potrzebna"). Obliczenia są wykonane dla całego zbioru wartości zewnętrznej temperatury otoczenia.

5. Podsumowanie

Analizując wyniki obliczeń zestawione w tabeli 2 i 3 dotyczących odpowiednio mocy i energii elektrycznej wytworzonych z odzysku ciepła odpadowego ze spalin kotłowych oraz mocy i energii elektrycznej potrzebnych do napędu pomp ciepła stwierdzono, że występują pewne zależności badanych parametrów technicznych. Porównując ich wielkości można scharakteryzować efektywność wariantów obliczeniowych z uwzględnieniem wykorzystania silnika Stirlinga.

1. Wzrost mocy zainstalowanej pomp ciepła powoduje:
   a) wzrost mocy elektrycznej oraz wzrost energii elektrycznej zużytej do napędu pomp ciepła;
   b) obniżenie wytworzonej mocy i energii elektrycznej uzyskanej z odzysku ciepła odpadowego.
2. We wszystkich wariantach obliczeniowych udział energii elektrycznej do napędu pomp ciepła, wytworzonej z odzysku ciepła odpadowego, liczony dla całego sezonu grzewczego, jest mniejszy od jedności. Wniosek jest taki, że do napędu pomp ciepła konieczny jest pobór energii elektrycznej z systemu elektroenergetycznego przez cały sezon grzewczy, a w wariancie z pompami ciepła o mocy zainstalowanej 13,5 kW – przez część sezonu grzewczego. Udziały energii elektrycznej maleją ze wzrostem mocy zainstalowanej pomp ciepła.
3. W wariancie współpracy kotłowni, w którym moc zainstalowana pomp ciepła jest równa 13,5 kW, w części sezonu grzewczego, w której zewnętrzna temperatura otoczenia jest nie wyższa niż 3ºC, wytworzona moc elektryczna z odzysku ciepła odpadowego jest większa niż moc zapotrzebowana do napędu pomp ciepła. Występuje tu nadwyżka wytworzonej mocy i energii elektrycznej, którą będą zasilane inne odbiorniki energii elektrycznej w GWSA. Gdy zewnętrzna temperatura otoczenia jest wyższa od 3ºC, wytworzona moc i energia elektryczna jest mniejsza od zapotrzebowanej do napędu pomp ciepła. Konieczny jest wówczas pobór energii z sieci elektroenergetycznej.
4. W wariantach współpracy o mocy zainstalowanej pomp ciepła równej 27,0 kW i większej wytworzona moc i energia elektryczna z odzysku ciepła odpadowego jest mniejsza od wartości zapotrzebowanych w całym sezonie grzewczym. Różnice pomiędzy mocą i energią wytworzoną a zapotrzebowaną wzrastają ze wzrostem zainstalowanej mocy pomp ciepła.

Przedstawiona problematyka układu kogeneracyjnego przy współpracy pomp ciepła z kotłownią olejową i siecią ciepłowniczą ma istotny wpływ na uwarunkowania ekonomiczne i ekologiczne. Do rozwoju nowych technologii wdrażanych w energetyce cieplnej uwzględniane są również źródła energii odnawialnej. Zastosowanie układu kogeneracyjnego ma szczególne znaczenie w systemach ciepłowniczych.

Literatura

[1] Kusto Z.: Uwarunkowania ekonomicznej efektywności pomp ciepła, Wyd. IMP PAN, Gdańsk 2006.

[2] INSTAL-ROGRA. Technika Grzewcza i Sanitarna; http://www.instalrogra.pl /index.php?page=produkty&kat=Viessmann, listopad 2011.

[3] Viessmann. Climate of innovation; http://www.viessmann.pl/pl/service/itemap. html, http://www.viessmann.pl/pl/obiekty-przemyslowe/systemy-grzewcze.html, http://www.viessmann.pl/pl/dom_wielorodzinny/systemy-grzewcze/kotly-olejowe.html, listopad 2011.

[4] Wytyczne projektowe: Paromat, Turbomat und Vitoplus Abgas/Wasser-Warmetauscher. VIESSMANN. 5811 046-4, 2/2000.

[5] Żmudzki S.: Silniki Stirlinga. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1993.

[6] American Stirling Company; http://www.stirlingengine.com/fullpower, http://stirlingengine.com/links, sierpień-październik 2011.

[7] Backhaus S., Swift G.: New varieties of thermoacoustic engines. LA-UR-02-2721, 9th International Congress on Sound and Vibration, Los Alamos NM 87545, July 2002.

[8] Dancette M., Wintrebert G.: Etude et realisation d'un modele sur table de moteur Stiring de 3 kW scelle a sortie electrique. Raport Final. Commission des Communautés Européennes. EUR 9444 FR, 1984.

[9] Micro-Cooling, Heating, and Power (m-CHP) Instructional Module. United States Department of Energy (DOE), Mississippi Cooling, Heating, and Power (micro-CHP) and Bio-fuel Center. Mississippi State, MS 39762. December 2005.

[10] Stirling DK; http://www.stirling.dk, wrzesień-listopad 2011.

[11] Stirling Leistungsmotoren; http://www.stirlingmotor.com/leistungsmot.html, październik 2011.

[12] Stirling Technology Inc; http://www.stirling-tech.com, listopad 2011.

[13] Technische Dokumentation SOLO STIRLING 161 microKWK-Modul. Version 1.9 für Planer. SOLO STIRLING GmbH, Sindelfingen Juli 2003.

[14] Thomas B.: Application of internal wave form heat exchangers to Stirling engines. Stirling-Engineering Karl Kocsisek. Reutlingen 29.07.05.

[15] Tyagi S.K., Kaushik S.C., Singhal M.K.: Parametric study of irreversible Stirling and Ericsson cryogenic refrigeration cycles. Energy Conversion and Management 43 (2002) 2297-2309.

CHP SYSTEM COMBINING HEAT PUMPS, OIL BOILER AND HEATING NETWORK

S u m m a r y

The article presents applicability of CHP system combining heat pumps, oil boilers and heating network. The research includes waste heat recovery by means of the Stirling engine. Recovered waste heat is used to propel Stirling engine, which propels a generator of electricity. Energy balance was calculated. Calculating average temperature of fumes T_{sr} and ambient temperature T_{ot} allowed to find actual efficiency of the Stirling engine. Calculated energy balance estimates the amount of electricity which is possible to generate. This amount varies significantly depending on the ambient temperature. In this case the energy balance is calculated for the situation in which a boiler is able on its own to fully cover the demand of heat. The cooperation between boilers and heat pumps was characterized. Five different variants of cooperation were considered, in each variant a heat pump has a different power. In each variant different parameters of electric power and energy from recovered heat were obtained. The energy produced in this way can be used either to propel the heat pump or to cover other needs. The author conducted the analysis of calculation results concerning the electric power and energy produced from the recovered waste heat from boiler fumes as well as electric power and energy necessary to propel heat pumps. The results of the analysis (Table 1) concerning the electric power and energy produced during a heating season show that the general electric energy obtained from the recovered waste heat from boiler fumes is E_{el} = 18 238,88 kWh/a. Moreover, the highest mechanic power of the Stirling engine, obtained from the waste heat from the fumes is N_{mstir} = 8,04 kW.

Keywords: energy balance, Stirling engine, heat recovery, boiler fumes, power, energy.

Przesłano do redakcji: 09.04.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.62

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 347-356

Katarzyna NOWAK – DZIESZKO[1]
Małgorzata ROJEWSKA – WARCHAŁ[2]
Jacek DĘBOWSKI[3]

WPŁYW DOCIEPLENIA BUDYNKU WIELKOPŁYTOWEGO NA KOMFORT CIEPLNY LOKALI MIESZKALNYCH

Przyjmuje się, że w Polsce w latach 1960-1990 wybudowano około 4-ech milionów budynków z elementów prefabrykowanych w różnych systemach. Co więcej szacuje się, że w budynkach tych mieszka obecnie ponad 10 mln Polaków, chociaż dane na ten temat nie są w pełni ścisłe. Niemniej jednak sprawia to, że problemy związane z właściwym utrzymaniem, poprawą izolacyjności, a przede wszystkim ograniczeniem energochłonności budynków prefabrykowanych stały się od jakiegoś czasu bardzo istotne i powszechne. Dominującym kryterium podczas tzw. termomodernizacji tego typu budynków jest poprawa charakterystyki energetycznej tych obiektów, w ramach której podejmowane są najczęściej działania dociepleniowepołączone z wymianą stolarki okiennej. Jednakże rozważając i projektując działania związane z termomodernizacją praktycznie nikt nie uwzględnia aspektu komfortu cieplnego i problemów związanych z przegrzaniem tychże budynków, co jest bardzo istotnym zagadnieniem z punktu widzenia mieszkańców. W artykule przedstawione zostały wyniki symulacji komputerowych warunków mikroklimatu przeprowadzonych dla budynku wielkopłytowego wzniesionego w systemie W70, zlokalizowanego w Krakowie. Symulacje zostały wykonane w programie Design Builder umożliwiającym analizę warunków mikroklimatu w budynkach oraz jego poszczególnych strefach. Przeprowadzone analizy wykazały, że docieplenie obudowy budynku niestety niekorzystnie wpływa na warunki komfortu cieplnego lokali mieszkalnych. W oparciu o przeprowadzone symulacje autorzy określili wpływ termomodernizacji oraz orientacji poszczególnych mieszkań w budynku wielkopłytowym na komfort cieplny.

Słowa kluczowe: wielka płyta, komfort cieplny, Design Builder, PMV, metoda Fangera

---

[1] Autor do korespondencji: mgr inż. Katarzyna Nowak – Dzieszko, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24 31 – 155 Kraków, tel. 12 628 23 17, knowakdzieszko@o2.pl

[2] mgr inż. Małgorzata Rojewska-Warchał, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24 31 – 155 Kraków, tel. 12 628 21 32, m_rojewska@wp.pl

[3] dr inż. Jacek Dębowski, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24 31 – 155 Kraków, tel. 12 628 23 17, jdebowski@pk.edu.pl. Artykuł przygotowano w ramach prac L-1/116/DS/2013

1. Komfort cieplny

Analizując pojęcie komfortu cieplnego należy założyć sytuację, w której organizm ludzki znajduje się w stanie zrównoważonego bilansu cieplnego. Na równowagę tę mają wpływ m.in. aktywność fizyczna, oporność cieplna odzieży oraz parametry środowiskowe: temperatura powietrza, średnia temperatura promieniowania, prędkość ruchu powietrza, wilgotność względna itd. Dlatego też w symulacjach i badaniach analiza komfortu cieplnego opiera się na syntezie dwóch podstawowych wskaźników:

1. PMV (Predicted Mean Vote) – przewiduje średnią ocenę dużej grupy użytkowników określających swe wrażenia w siedmiostopniowej skali ocen: + 3 – gorąco; + 2 – ciepło; + 1 – dość ciepło; 0 – obojętnie; (-1) – dość chłodno; (-2) – chłodno; (-3) – zimno. Wskaźnik PMV powinien mieścić się w przedziale -0,5 < PMV < +0,5;
2. PPD (Predicted Percentage of Dissatisfied) – opisuje przewidywaną liczbę osób niezadowolonych z panujących warunków.

Procedurę oraz sposób prowadzenia oceny opisuje międzynarodowa norma PN-EN ISO 7730 „Ergonomia środowiska termicznego. Analityczne wyznaczanie i interpretacja komfortu termicznego z zastosowaniem obliczenia wskaźników PMV i PPD oraz kryteriów lokalnego komfortu termicznego" [1], która opiera się na tzw. metodzie Fangera umożliwiającej obliczenie wskaźnika PMV na podstawie poniższego równania:

$$PMV = [0{,}303 \times e^{-0{,}036M} + 0{,}028] \times \{(M - W) \times -3{,}05 \times 10^{-3} \times [5733 - 6{,}99 \times (M - W) - p_a] - 0{,}42 \times [(M - W) - 58{,}15] - 1{,}7 \times 10^{-5} \times M \times (5867 - p_a) - 0{,}0014 \times M \times (34 - t_a) - 3{,}96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times (t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] - f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a)\} \quad (1)$$

$$t_{cl} = 35{,}7 - 0{,}028 \times (M - W) - I_{cl} \times \{3{,}96 \times 10^{-8} \times f_{cl} \times [(t_{cl} + 273)^4 - (t_r + 273)^4] + f_{cl} \times h_c \times (t_{cl} - t_a)\} \quad (2)$$

gdzie:

M – wielkość metabolizmu, W/m^2,
W – jest gęstością utraty energii w postaci pracy mechanicznej, W/m^2,
I_{cl} – izolacyjność odzieży, m^{2}K/W,
f_{cl} – powierzchnia ubrania, m^2,
t_a – temperatura powietrza, ^{o}C,
t_r – średnia temperatura promieniowania, ^{o}C,
t_{cl} – temperatura powierzchni ubrania, ^{o}C.

Tak duża ilość parametrów wpływających na wskaźniki komfortu oraz dyskomfortu cieplnego utrudnia projektantom zadanie oceny tych parametrów oraz zadanie analizy wpływu właściwości zewnętrznych przegród budynku na komfort cieplny projektowanych pomieszczeń.

2. Opis problemu i analizowanego budynku

Rozpoczęty w latach 90-tych wielki boom na termomodernizację, a ponadto wciąż zmieniające się wymagania termiczne powodują, że coraz częściej w „starych" budynkach podejmuje się zabiegi dociepleniowe. Bez wątpienia zabiegi te są jak najbardziej korzystne pod względem oszczędności energii, niemniej jednak pod względem komfortu cieplnego mieszkań stają się dość dyskusyjne. Świadczą o tym lokalne zgłoszenia mieszkańców o pogorszeniu się warunków mieszkaniowych tuż po zabiegach dociepleniowych. W celu wyjaśnienia tego problemu i określenia wpływu zewnętrznej izolacji cieplnej budynku na komfort użytkowania poszczególnych pomieszczeń autorzy niniejszego artykułu przeprowadzili własne analizy symulacyjne. Symulację oparto na rzeczywistym 11 kondygnacyjnym wielorodzinnym budynku mieszkalnym wykonanym w systemie W70, zlokalizowanym w Krakowie w dzielnicy Krowodrza (Rys.1). Obliczenia zostały przeprowadzone w programie Design Builder v.3., który pozwala na analizę termiczną obudowy budynku oraz mikroklimatu poszczególnych części wewnątrz budynku, n podstawie danych klimatycznych dla Krakowa-Balice.

Przyjęty reprezentacyjny budynek został wzniesiony w 1974 r. w technologii wielkopłytowej w systemie W70. Wymiary budynku to 21,5 m x 13,2 m, wysokość 25 m, powierzchnia użytkowa – 2279 m2, 11 kondygnacji nadziemnych. Budynek jest całkowicie podpiwniczony i zwieńczony stropodachem dwudzielnym przełazowym, posiada grawitacyjny systemem wentylacji i jest ogrzewany z miejskiej sieci ciepłowniczej. Na każdym piętrze budynku znajdują się cztery narożne mieszkania, korytarze oraz szyb windowy w centralnej jego części oraz klatka schodowa przy ścianie północnej. W roku 2004 w budynku została wymieniona stolarka, natomiast w 2006 została wykonana termomodernizacja ścian zewnętrznych budynku. Ściany zewnętrzne wykonane z płyt prefabrykowanych betonowych w systemie W70 o współczynniku U=0,75 [W/m2K]; po dociepleniu 10 cm warstwą styropianu wartość współczynnika U wynosi 0,25 [W/m2K], w budynku występują okna dwuszybowe o U =1,5 [W/m2K].

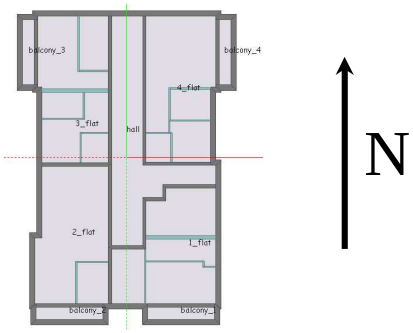
a)  b) 

Rys. 1. Analizowany budynek: a) widok budynku od strony zachodniej, b) wizualizacja budynku w programie Design Builder

Fig. 1. Analyzed building: a) view from the west side of the building, b) the visualization of the building in the Design Builder

3. Założenia do symulacji

Głównym celem prowadzonych analiz było określenie rozkładu temperatury i wartości wskaźnika PMV dla poszczególnych mieszkań (Rys. 2), zlokalizowanych na różnych piętrach w okresie letnim. Przyjęto założenie, że każde mieszkanie jest oddzielną strefą temperaturową oraz że wewnątrz pojedynczego lokalu nie występuje zmienność temperatury. Wynika to z faktu, iż ze względu na mały metraż lokale te najczęściej użytkowane są jako „przestrzenie otwarte". Orientacje przyjętych do symulacji mieszkań na poszczególnych poziomach kształtują się następująco: mieszkanie numer 1 – wschód-południe, mieszkanie numer 2 – południe-zachód, mieszkanie numer 3 – zachód-północ, mieszkanie numer 4 – północ-wschód.



Rys. 2. Wizualizacja rozkładu pomieszczeń

Fig. 2. Building zones visualization

W analizowanym budynku przeprowadzono dwa warianty symulacyjne przy założeniu typowych warunków użytkowych: 1) budynek w warunkach projektowych – przed termomodernizacją, 2) budynek po wykonaniu docieplenia. W kolejnym etapie porównano wyniki symulacji dla mieszkań zlokalizowanych na czterech wybranych poziomach: parter, trzecie, siódme i dziesiąte piętro. W analizach uwzględniono przede wszystkim okres pomiędzy 15 maja i 15 września, gdyż w okresie tym w Polsce występuje największe ryzyko przegrzewania pomieszczeń.

Ponadto do symulacji przyjęto dodatkowe założenia:

1) lokal jest ogrzewany od października do marca przez 7 dni w tygodniu, 24 godziny na dobę, przy średniej temperaturze w mieszkaniu 22°C;
2) gęstość zaludnienia pomieszczeń stanowi 0,08 osoby na m^2, co odpowiada średnio trzem osobom znajdującym się w każdym mieszkaniu;
3) sposób użytkowania mieszkania to 3 osoby w mieszkaniu pomiędzy 16:00 a 7:00 rano w dni robocze, oraz pomiędzy 18:00 i 9:00 rano w okresie weekendu; w pozostałym czasie liczbę użytkowników zredukowano o połowę (50%).
4) aktywność fizyczną użytkowników oraz izolacyjność odzieży przyjęto na

podstawie normy [1] na poziomie 1,2 met, w okresie zimowym = 1,0; clo w okresie letnim = 0,5 clo.

5) wymagania wentylacyjne przyjęto w oparciu o normę PN-83/B-03430 [2], wg której założono wymianę powietrza na poziomie 70 m^3/godzinę w kuchni oraz 50 m^3/godzinę w łazience.

4. Wyniki przeprowadzonych symulacji

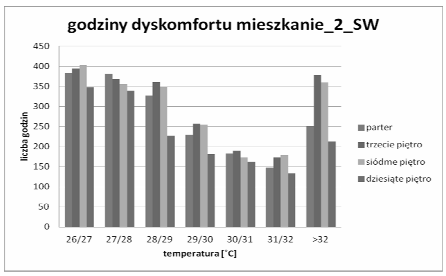
Przeprowadzone symulacje, których wyniki przedstawiono poniżej, wykazały, że w analizowanych mieszkaniach przez kilka dni, w okresie pomiędzy 15 maja, a 15 września, występują liczne przekroczenia średnich temperatur powietrza wewnętrznego. Zarejestrowano temperaturę powyżej 30°C oraz wskaźnik PMV większy od 2. Takie warunki mikroklimatu znaczne przekraczają zalecane maksymalne wartości temperatury (25°C) oraz zalecany przedział wartości wskaźnika PMV (-0,5 < PMV < +0,5).

Biorąc pod uwagę orientację mieszkań, co potwierdziły symulacje, najkorzystniejsze warunki pod względem komfortu cieplnego występują w mieszkaniu numer 4 (mieszkanie północno-wschodnie), natomiast najbardziej niekorzystne w mieszkaniu numer 2 (mieszkanie południowo-zachodnie). Rysunek 3a oraz 3b przedstawia ilość godzin przegrzania dla mieszkań numer 2 oraz 4 na wybranych piętrach budynku (parter, trzecie, siódme oraz dziesiąte piętro).

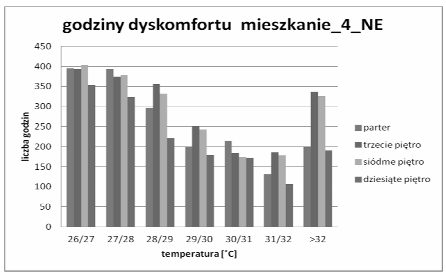
Co istotne, porównując wykresy, najwyższa liczba godzin przegrzania występuje w mieszkaniu na trzecim piętrze, a po wykonaniu docieplenia prawie dwukrotnie wzrasta. Ponadto mieszkanie najwyżej usytuowane zamienia się pozycją z mieszkaniem na parterze przed i po dociepleniu.

Rysunek 4a i 4b przedstawia wyniki dla tych samych mieszkań przed i po termomodernizacji. Maksymalna temperatura wewnętrzna wynosi 35,80°C, a liczba godzin przegrzania w analizowanym okresie czasu wynosi w mieszkaniu nr 2 przed termomodernizacją 2120, a po termomodernizacji wynosi 2553, natomiast w mieszkaniu nr 4 przed termomodernizacją liczba godzin wynosi 2081, a po termomodernizacji 2526.

a)

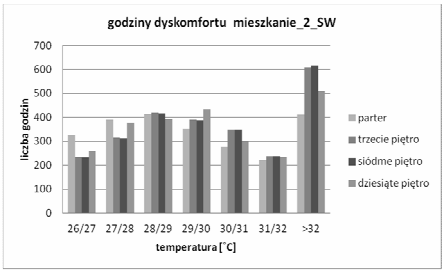


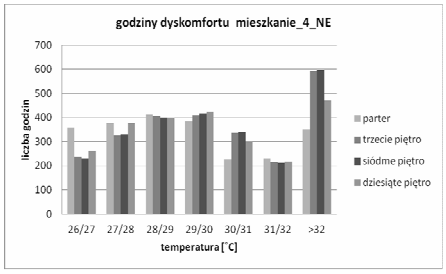
b)



Rys. 3. a) Liczba godzin przegrzania dla mieszkania numer 2 (pd-zach) – przed dociepleniem, b) Liczba godzin przegrzania dla mieszkania numer 4 (pn-wsch) – przed dociepleniem

Fig. 3. a) Number of discomfort hours for flat 2 (south-west) at four levels – base case, b) Number of discomfort hours for flat 4 (north-east) at four levels – base case

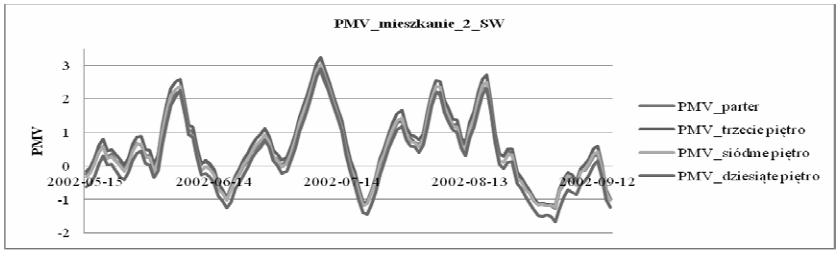
a) 

b) 

Rys. 4. a) Liczba godzin przegrzania dla mieszkania numer 2 (pd-zach) – po docieplenіu, b) Liczba godzin przegrzania dla mieszkania numer 4 (pn-wsch) – po docieplenіu

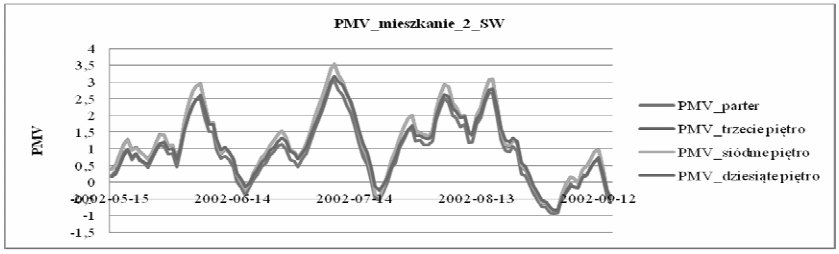
Fig. 4 a) Number of discomfort hours for flat 2 (south-west) at four levels – after thermal modernization, b) Number of discomfort hours for flat 4 (north-east) at four levels – after thermal modernization

Porównując wartości wskaźników PMV przed i po termomodernizacji okazało się, iż przekraczają one wartość 2, a w lipcu wartości te są nawet większe od 3 (Rys. 5 – porównanie dla południowo-zachodniego mieszkania na różnych poziomach w analizowanym okresie czasu pomiędzy 15 maja a 15 września). Wszystkie te wartości są znacznie wyższe po termomodernizacji.



Rys. 5.a. Wskaźnik PMV dla mieszkania nr 2 – południowo-zachodniego na czterech różnych poziomach przed termomodernizacja budynku

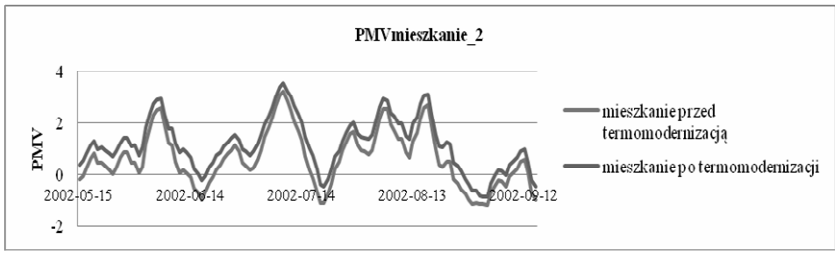
Fig. 5.a. PMV comfort indexes for south-west flat at different levels – before thermal modernization



Rys. 5.b. Wskaźnik PMV dla mieszkania nr 2 – południowo-zachodniego na czterech różnych poziomach po termomodernizacji budynku

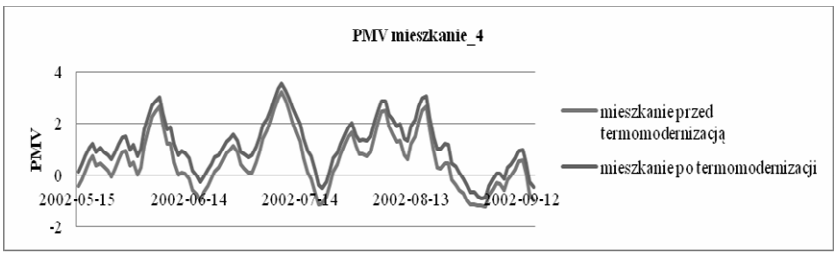
Fig. 5.b. PMV comfort indexes for south-west flat at different levels – after thermal modernization

We wszystkich mieszkaniach możemy także zaobserwować negatywny wpływ izolacji na mikroklimat pomieszczeń. W mieszkaniach zlokalizowanych na trzecim piętrze (numer 2 oraz numer 4), wartości wskaźników PMV po termomodernizacji są wyższe przez cały analizowany okres czasu (Rys 6a i 6b).



Rys. 6.a. Wskaźnik PMV dla mieszkania nr 2 – południowo-zachodniego na trzecim piętrze przed i po termomodernizacji

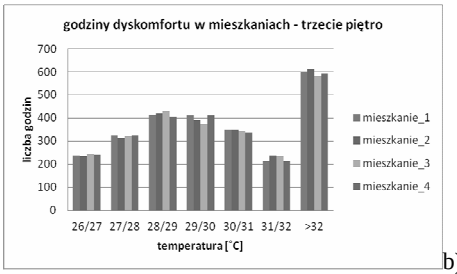
Fig. 6.a. PMV comfort indexes for south-west flat at third level – before and after thermal modernization

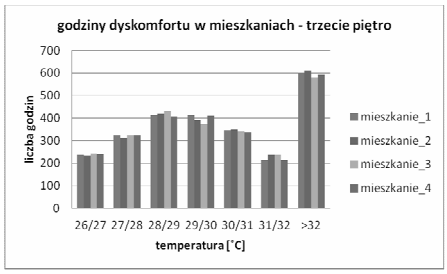


Rys. 6.b. Wskaźnik PMV dla mieszkania nr 4 – północno-wschodniego na trzecim piętrze przed i po termomodernizacji

Fig. 6.b. PMV comfort indexes for north-east flat at third level – before and after thermal modernization

Ponieważ na przegrzewanie mieszkań duży wpływ ma ilość oraz lokalizacja przeszklenia dlatego w analizie rozważono również różną orientację przeszkleń. Porównania dokonano na trzecim piętrze budynku, przed i po termomodernizacji. Rysunek 7a i 7b wskazuje niewielkie różnice pomiędzy wynikami dla różnych mieszkań, niemniej jednak ilość godzin dyskomfortu przed i po termomodernizacji oraz ilość godzin z temperaturą powyżej 32°C wzrosła z 350 godzin przed dociepleniem do prawie 600 godzin po dociepleniu.

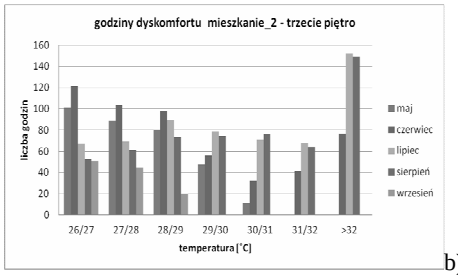
a) 

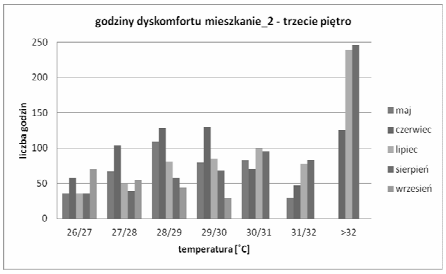
b) 

Rys. 7. a) Liczba godzin dyskomfortu dla mieszkań na trzecim piętrze – przed dociepleniem, b) Liczba godzin dyskomfortu dla mieszkań na trzecim piętrze – po dociepleniu

Fig. 7. a) Number of discomfort hours for flats at third level – before thermal modernization, b) Number of discomfort hours for flats at third level – after thermal modernization

Porównanie ilości godzin przegrzania w poszczególnych miesiącach dla mieszkania na trzecim piętrze, przed i po termomodernizacji, przedstawiają rysunki 8a oraz 8b. Dla budynku przed termomodernizacją w maju temperatury nie przekraczają wartości 30°C, chociaż wciąż występuje problem przegrzania mieszkań wiążący się z temperaturami przekraczającymi 25°C. Natomiast po dociepleniu przegród zewnętrznych już w maju pojawiają się temperatury wyższe od 30°C. Ponadto wszystkie wartości wzrosły po zabiegach termomodernizacyjnych, a wartości temperatur powyżej 32°C wzrosły prawie dwukrotnie.

a) 

b) 

Rys. 8. a) Liczba godzin przegrzania dla południowo - zachodniego mieszkania na trzecim piętrze budynku w analizowanych miesiącach – przed dociepleniem, b) Liczba godzin przegrzania dla południowo - zachodniego mieszkania na trzecim piętrze budynku w analizowanych miesiącach – po dociepleniu

Fig. 8. a) Number of discomfort hours for flat 2 (south-west) at the third level – before thermal modernization, b) Number of discomfort hours for flat 2 (south-west) at the third level – after thermal modernization

5. Wnioski

Wyniki z przeprowadzonych symulacji wykazały, że problem przegrzania występuje w budynkach wielkopłytowych zarówno przed jak i po termomodernizacji. Przeszklenia są źródłem znacznych zysków słonecznych i powodują przegrzanie w miesiącach letnich. Mikroklimat we wszystkich mieszkaniach analizowanego budynku wielorodzinnego jest niekorzystny, a parametry opisujące komfort cieplny przekraczają wartości dopuszczalne.

Najbardziej niekorzystne warunki występują w mieszkaniu południowo-zachodnim na trzecim piętrze. Wyliczone temperatury przez większość czasu są znacznie wyższe od zalecanej wartości maksymalnej 25°C. Maksymalna temperatura wewnętrzna wynosi 34,70°C, a wskaźnik PMV przekracza 3. Liczba godzin przegrzania w analizowanym okresie czasu wynosi 2553. W okresie letnim te niekorzystne warunki utrzymują się w ciągu dnia i tylko nieznacznie zmieniają w okresie nocnym kiedy mieszkania muszą być chłodzone.

Reasumując, modernizacja budynków wielkopłytowych powinna być poprzedzona analizą wpływu projektowanych zmian na komfort cieplny poszczególnych mieszkań. Priorytetem jest obniżenie zużycia energii na cele grzewcze w miesiącach zimowych, niemniej jednak nie należy zapominać, że komfort przebywania w tego typu budynkach nie może być pomijany. Przeprowadzone analizy wykazały że same zabiegi docieplenowe obudowy budynku niekorzystnie wpływają na komfort cieplny w okresie letnim, a w projektowaniu należałoby uwzględnić zastosowanie zewnętrznych oraz wewnętrznych osłon celem zminimalizowania efektu przegrzania. Rozwiązania tego typu będą kolejnym krokiem analiz przeprowadzanych przez autorów.

Literatura

[1] PN-EN ISO 7730 Ergonomics of the thermal environment. Analytical determination and interpretation of thermal comfort using calculation of the PMV and PPD indices and local thermal comfort criteria.

[2] PN-83/B-03430 “Wentylacja w budynkach mieszkalnych zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej - Wymagania”.

[3] Nouidui, T. S., K. Phalak, W. Zuo, and M. Wetter: Validation and Application of the Room Model of the Modelica Buildings Library. LBNL Report Number LBNL-5932E 2012.

[4] Orme M., Palme J.r, Irving S.: Control of Overheating in Well-Insulated Housing, CIBSE http://www.cibse.org/pdfs/7borme.pdf.

[5] Nowak K.: Modernizacja budynków a komfort cieplny pomieszczeń. Energia i Budynek, ISSN 1897-5879, 29-33 2011.

[6] Dębowski J.: Cała prawda o budynkach wielkopłytowych Przegląd budowlany 9/2012.

THE INFLUENCE OF ISULATION ON THE THERMAL COMFORT IN THE LARGE PANEL BUILDINGS

S u m m a r y

It is estimated that in Poland, between 1960-1990, more than 4 million buildings were built in different prefabrication systems. What is more, it is estimated that at present more than 10 million Poles live in those large panel buildings, however those data are not very precise and confirmed. Nevertheless it makes the problems connected with proper usage, thermal insulation and first of all with reducing of heating energy demand of prefabricated large panel buildings, to be very important and common. The dominant criterion in the process of thermal modernization is to improve the energy performance of those buildings, in which the most common are insulation of building envelope combined with replacement of windows. However in the analyzing and designing process of thermal modernization no one takes into consideration aspects connected with thermal comfort and overheating problems in those buildings, which appear to be very important from the occupants' point of view.

The paper presents the results of the annual computational simulations of microclimate conditions conducted for the W70 panel building located in Cracow. The calculations were carried out in the Design Builder program which allows the analysis of microclimate of entire building as well as of separate parts of the building. Conducted analysis proved that the insulation of building envelope unfavorable affects the internal microclimate conditions. Based on the conducted simulations authors determined the influence of building orientation, individual flat location and thermal insulation on the thermal comfort in the different flats of prefabricated panel building.

Keywords: large panel buildings, thermal comfort, Design Builder, PMV, Fanger's method

Przesłano do redakcji: 09.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.63

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 357-366

Marianna OLENETS[1]
Jerzy Zbigniew PIOTROWSKI[2]
Anatoliy STROY[3]

METODA OKREŚLENIA EMISYJNOŚCI NIEKTÓRYCH MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH

W artykule przedstawiono analizę dostępnych metodologii, służących do określenia emisyjności powierzchni materiałów w warunkach eksploatacyjnych i laboratoryjnych. Odnosząc się do nich krytycznie, zaproponowano prostą metodę określenia emisyjności niektórych materiałów budowlanych oraz przedstawiono algorytm określenia emisyjności termicznej wybranego materiału. Metoda polega na opracowaniu modelu konwekcyjnej i radiacyjnej wymiany ciepła, zachodzącej miedzy cylindrycznym źródłem ciepła a zamkniętą przestrzenią skrzynki badawczej (modelu pomieszczenia). W modelu o kształcie sześciościanu o wymiarach 1×1×1m, umieszczono wewnątrz źródło ciepła o znanym polu powierzchni i emisyjności. Do pomiaru temperatury i gęstości strumienia ciepła użyto termopar i czujników gęstości strumienia ciepła. Materiał budowlany o badanej zdolności emisyjnej (w tym wypadku wyprawę tynkarską) naniesiono na ścianki modelu pomieszczenia od wewnątrz. Na podstawie danych pomiarowych określono całkowity strumień ciepła, dopływający do ścianek modelu pomieszczenia od źródła ciepła oraz temperaturę poszczególnych powierzchni, źródła ciepła i powietrza wewnątrz skrzynki badawczej. Wartości temperatur pozwoliły określić konwekcyjny strumień ciepła na powierzchni ścianek modelu pomieszczenia i źródła ciepła. Radiacyjny strumień ciepła określono jako różnicę miedzy całkowitym i konwekcyjnym strumieniem ciepła. Wartość radiacyjnej składowej z kolei dała możliwość określenia zdolności emisyjnej badanego materiału, którym pokryto powierzchnię ścianek. Na podstawie wyprowadzonych zależności i przeprowadzonych pomiarów ostatecznie określono współczynnik emisyjność wewnętrznej wyprawy tynkarskiej o małej gęstości z dodatkiem aerogelu.

Słowa kluczowe: emisyjność, model pomieszczenia, wymiana ciepła, konwekcja, promieniowanie długofalowe, aerogel

---

[1] Autor do korespondencji: dr inż. Marianna Olenets, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, tel.: +48 508691335, mari_olensa@mail.ru

[2] prof. PŚk dr hab. inż. Jerzy Zbigniew Piotrowski, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, piotrowski@tu.kielce.pl

[3] prof. dr hab. inż. Anatoliy Stroy, Politechnika Świętokrzyska w Kielcach, al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, anatolii_stroi@mail.ru

1. Wprowadzenie

1.1. Sformułowanie zadania

Opracowując recepturę lub modyfikując skład materiałów budowlanych czy technologii wytwarzania istotne jest wyznaczenie ich charakterystyk fizykalnych. Niełatwym zadaniem jest określenie emisyjności z powodu złożoności procesu wymiany ciepła przez promieniowanie. Na intensywność radiacyjnej wymiany ciepła między ciałem a środowiskiem otaczającym, oprócz różnicy temperatur, ma także wpływ emisyjność i współczynnik konfiguracji, tj. wzajemnego rozmieszczenia materiałów. Dodatkowo miedzy materiałami i otoczeniem zachodzi również wymiana ciepła przez konwekcję.

1.2. Cel i przedmiot badania

Do określenia emisyjności dość często używa się termometrów infraczerwonych (pirometrów)[1, 2]. Istotną wadą pirometrów jest niewystarczająca dokładność pomiaru temperatury. Oprócz tego, o dokładności pirometru decyduje promieniowanie optyczne i określenie emisyjności obiektu. Dlatego ten sprzęt używany jest w przypadkach, gdy nie wymagana jest szczególna dokładność pomiarów, a obiekty znajdują się w pewnych odległościach. Praktycznie większość badań wyznaczających emisyjność wewnętrznych materiałów wykończeniowych [5, 6] polega na tym, iż badany materiał nanoszony jest na powietrznię promiennika (źródła ciepła), umieszczonego w modelu pomieszczenia. W takim przypadku dość trudno określić radiacyjny strumień ciepła, dopływający od źródła ciepła, jako oddzielną składową całkowitego strumienia ciepła. Oprócz tego gęstość strumienia ciepła ścianki jest dużo mniejsza niż gęstość strumienia ciepła źródła ciepła. By wyeliminować te mankamenty mające wpływ na dokładność obliczeń przy wykonywaniu badań emisyjności materiałów, w laboratorium fizyki budowli Politechniki Świętokrzyskiej przeprowadzono eksperyment w modelu pomieszczenia (skrzynce badawczej), w którym na wewnętrznej powierzchni naniesiono warstwę badanej wyprawy tynkarskiej, a źródło ciepła umieszczono wewnątrz modelu. Wykorzystując model obliczeniowy i badawczy przeprowadzono pomiary i określono emisyjność wewnętrznej wyprawy tynkarskiej o bardzo małej gęstości z dodatkiem aerogelu. Powietrze stanowiło ok. 90% całkowitej masy materiału.

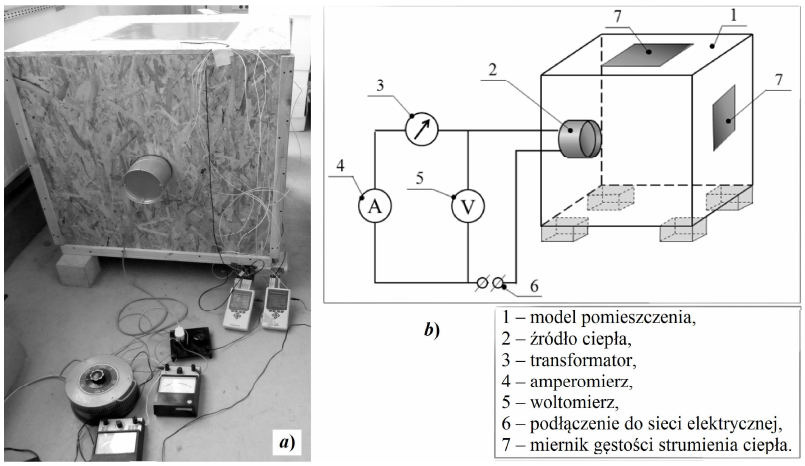
2. Opis stanowiska badawczego i przebiegu eksperymentu

2.1. Opis układu badawczego i sprzętu pomiarowego

Stanowisko badawcze i jego schemat pomiarowy przedstawiono na rys. 1. Model pomieszczenia wykonano w kształcie sześcianu 100×100×100cm. Zrezygnowano z kształtu kuli [3], dla której strumień ciepła od źródła ciepła jest

równomiernie dystrybuowany na gładkiej wewnętrznej powierzchni. Jednak ułożenie masy tynkarskiej na formie kulistej jest trudne do wykonania. Ścianki modelu badawczego wykonano z płyt OSB, które od wewnątrz pokryto warstwą badanego materiału. Źródło ciepła generowała żarówka elektryczna o mocy 100W.

Układ badawczy wyposażony został w urządzenia pomiarowe. Dla ułatwienia obliczenia powierzchni i prowadzenia pomiarów temperatury źródło ciepła osłonięto cylindrem o wymiarach: średnica d=0,16m, długość l=0,16m, z polem powierzchni $F_{źc}$=0,1095m^2. Do określenia całkowitego strumienia ciepła, odpływającego od źródła ciepła prowadzono odczyty z amperomierza i woltomierza. Ponadto wartość strumienia ciepła kontrolowano za pomocą mierników gęstości strumienia ciepła, umieszczonych na zewnętrznej powierzchni ścianek modelu pomieszczenia. Do pomiarów wartości temperatur wykorzystano czujniki temperaturowe. W trakcie eksperymentu rejestrowano temperaturę powierzchni źródła ciepła $T_{źc}$ (osłony źródła ciepła), powietrza wewnątrz modelu pomieszczenia T_{pws} i na wszystkich wewnętrznych powierzchniach ścianek (na powierzchni warstwy masy tynkarskiej) $T_{1\text{-}4,pok,dół}$.



Rys. 1. Stanowisko badawcze (*a*) i schemat układu pomiarowego (*b*)

Fig. 1. General appearance (*a*) and scheme of the experimental set-up (*b*)

2.2. Metodologia przeprowadzenia badania

Przy przeprowadzeniu badania eksperymentalnego, w celu ustalenia stanu bliskiego do stacjonarnego, badany układ podłączono do sieci elektrycznej z wyprzedzeniem kilkugodzinnym przed rejestracją parametrów obliczeniowych.

Całkowity strumień ciepła dopływający do modelu pomieszczenia wynosi

$$Q_{\Sigma} = I \cdot U \tag{1}$$

gdzie: I – natężenie prądu w sieci elektrycznej, A,
U – napięcie elektryczne, V.

Uśrednioną gęstość strumienia ciepła przy powierzchni ścianek modelu pomieszczenia $q_{\Sigma}^{ść}$ i przy powierzchni źródła ciepła $q_{\Sigma}^{źc}$ określają wzory

$$q_{\Sigma}^{\text{ść}} = \frac{Q_{\Sigma}}{\mathrm{F}_{\text{ść}}} \tag{2}$$

$$q_{\Sigma}^{\text{źc}} = \frac{Q_{\Sigma}}{\mathrm{F}_{\text{źc}}} \tag{3}$$

gdzie: $\mathrm{F}_{źc}$ – pole powierzchni źródła ciepła (cylindra), m^2,
$\mathrm{F}_{ść}$ – pole wewnętrznej powierzchni ścianek modelu pomieszczenia, m^2.

Całkowity strumień ciepła przy powierzchni źródła ciepła jak również przy powierzchni ścianek skrzynki badawczej jest sumą konwekcyjnego i radiacyjnego strumienia ciepła

$$Q_{\Sigma} = Q_r + Q_k \tag{4}$$

gdzie: Q_r – radiacyjny strumień ciepła, W,
Q_k – konwekcyjny strumień ciepła, W

$$Q_k = \alpha(t_{źc} - t_{pws})F_{źc} \tag{5}$$

gdzie: t_{pws} – temperatura powietrza w skrzynce badawczej, ^{0}C,
$t_{źc}$ – temperatura powierzchni źródła ciepła, ^{0}C,
α – współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła, W/(m^2·K).

Równanie określające współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła ma postać

$$\alpha = Nu\lambda / h \tag{6}$$

gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła powietrza, W/(m·K),
h – wymiar charakterystyczny, m,
Nu – liczba Nusselta

$$Nu = C(GrPr)^{i} \tag{7}$$

gdzie: Gr – liczba Grashofa,
Pr – liczba Prandtla.

Współczynnik *C* i wykładnik *i* dla różnych zakresów konwekcji zostały przedstawione w tabelach 1 i 2.

Tabela 1. Wartość wykładnika *i* dla wzoru (7)

Table 1. The value of the exponent *i* for equation (7)

dla *GrPr* < 10^3	$i < 1/4$
dla *GrPr* = 10^3 do 10^9	$i = 1/4$
dla *GrPr* > 10^9	$i = 1/3$

Tabela 2. Wartość współczynnika *C* dla wzoru (7)

Table 2. The value of the coefficient *C* for equation (7)

Układ	**Zakresy stosowności *C* dla wartości *GrPr***				
	do 10^3	**do 10^9**	***C***	**powyżej 10^9**	***C***
ściana pionowa, cylinder pionowy	10^4 $5\cdot10^2$	10^9 $2\cdot10^7$	0,59 0,54	$>10^9$ $>2\cdot10^7$	0,13
rura pozioma, drut	10^3 10^3	10^9 10^9	0,53 0,47	$>10^9$	0,11
płyta pozioma, oddająca ciepło w górę	10^5	$2\cdot10^7$	0,54	$>2\cdot10^7$	0,14
płyta, oddająca ciepło w dół	10^3	10^9	0,35	$>10^9$	0,08

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \Delta T \cdot h^3 \cdot \rho^2}{\eta^2} \tag{8}$$

gdzie: g – przyspieszenie ziemskie g=9,81 m/s^2,
β – współczynnik rozszerzalności objętościowej, $\beta=1/273{,}2+t_w$, K^{-1},
t_w – temperatura warstwy przyściennej, $t_w = t_{źc}+t_{pws}/2$, ^{0}C,
ΔT – różnica temperatur między ścianą a powietrzem, ^{0}C,
η – lepkość dynamiczna, kg/(m·s),
ρ – gęstość powietrza, kg/m^3.

Liczba Prandtla może być określona ze wzoru

$$\mathrm{Pr} = \frac{\nu}{a} \tag{9}$$

gdzie: ν – współczynnik lepkości kinematycznej, m^2/s,
a – stała dyfuzji cieplnej, m^2/s.

Do obliczeń liczby Grashofa i Prandtla za pomocą równania (7) można określić liczbę Nusselta, a następnie – współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła z równania (6).

Podstawowym warunkiem poprawności obliczeń konwekcyjnych strumieni ciepła przy powierzchni źródła ciepła i ścianek modelu pomieszczenia jest spełnienie równości

$$Q_{k\,źc} = Q_{k\,pok} + Q_{k\,dół} + Q_{k1} + Q_{k2} + Q_{k3} + Q_{k3}, \tag{10}$$

gdzie: $Q_{kźc}$ – konwekcyjny strumień ciepła przy powierzchni źródła ciepła,W,
$Q_{k.pok}$, $Q_{k.dół}$, Q_{k1}, Q_{k2}, Q_{k3}, Q_{k4} – konwekcyjny strumień ciepła przy odpowiedniej powierzchni wewnątrz modelu pomieszczenia, W.

Po uwzględnieniu równania (10), na podstawie równania (11) można określić uśredniony strumień ciepła przez promieniowanie

$$Q_r = Q_{\sum} - Q_{k\,źc} \tag{11}$$

Emisyjność powierzchni ścianek modelu można określić z zależności (12) na radiacyjny strumień ciepła od źródła ciepła do ścianek modelu

$$Q_r^{1-2} = F \cdot \varepsilon_{źc} \cdot \varepsilon_{ść} \cdot c\left(T_{źc}{}^4 - T_{ść}{}^4\right) \cdot \varphi \tag{12}$$

gdzie: F – obliczeniowe pole powierzchni, m^2,
$\varepsilon_{ść}$, $\varepsilon_{źc}$ – emisyjność powierzchni ścianek modelu i źródła ciepła,
c – stała promieniowania ciała doskonale czarnego, $c=5{,}67\cdot10^{-8}$ $W/(m^2K^4)$,
$T_{ść}$,$T_{źc}$ – temperatura powierzchni ściany i źródła ciepła, K,
φ – współczynnik konfiguracji, charakteryzujący część strumienia ciepła, padającego od źródła ciepła do ścianek modelu.

Jeśli powierzchnię $F_{ść}$ przyjąć jako powierzchnie obliczeniową $F_{ść} = F$, to strumień ciepła od źródła ciepła całkowicie dopływa do powierzchni ścianek modelu pomieszczenia i φ=1,0. Jeśli $F_{źc} = F$, to φ jest równy $\varphi_{ść\text{-}źc}$, i określa się na podstawie związku, zwanego prawem wzajemności

$$F_{źc} \cdot \varphi_{ść-źc} = F_{ść} \cdot \varphi_{źc-ść}\,, \tag{13}$$

a po przekształceniach

$$\varphi_{ść-źc} = \varphi_{źc-ść}\,\frac{F_{ść}}{F_{źc}} \tag{13a}$$

Z równania (12) emisyjność materiału wyprawy wynosi

$$\varepsilon_{śc} = \frac{Q_r^{1-2}}{\varepsilon_{źc} \cdot F_{śc} \cdot c(T_{źc}{}^4 - T_{śc}{}^4) \cdot \varphi_{źc\text{-}śc}}. \tag{14}$$

3. Analiza wyników badania emisyjności materiału budowlanego

3.1. Wyniki pomiarów

Na stanowisku badawczym zostały przeprowadzone pomiary do określenia emisyjności tynku wewnętrznego z dodatkiem aerogelu. Wyniki pomiarów otrzymane w trakcie eksperymentu przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Dane pomiarowe

Table 3. Measurement data

Czas	Natężenie prądu, A	Napięcie, V	Średnia temperatura, ^{0}C		Średnia temperatura na wewnętrznej powierzchni modelu pomieszczenia, ^{0}C					
			Źródła ciepła T_{zc}	Powietrza w modelu pomieszczenia T_{pws}	T_{pok}	T_1	T_2	T_3	T_4	$T_{dół}$
09:50	0,5	200	19,9	20,3	20,3	20,0	21,7	20,5	20,4	19,2
10:20			40,7	23,3	25,3	22,1	23,8	22,4	22,3	20,5
10:50			42,6	24,6	27,0	23,4	25,0	23,7	23,4	21,4
11:20			43,3	25,3	27,9	24,1	25,3	24,3	23,9	22,0
11:50			43,5	25,5	28,2	24,4	25,3	24,6	24,2	22,2
12:20			42,4	26,0	28,8	24,8	26,0	25,0	24,8	22,6
12:50			42,5	26,2	29,0	25,1	26,4	25,2	25,0	22,8
13:20			42,4	26,3	29,0	25,1	26,0	25,4	25,0	23,0
13:50			42,5	26,3	29,1	25,1	25,9	25,3	25,0	23,0
14:20			42,5	26,2	29,0	25,1	25,8	25,4	25,0	23,0
14:50			42,5	26,3	29,0	25,1	25,8	25,4	25,0	23,1
15:20			42,5	26,2	29,0	25,1	25,7	25,4	25,0	23,1
15:50			42,4	26,2	29,0	25,1	25,7	25,3	25,0	23,1
16:15			42,6	26,2	29,1	25,1	25,7	25,4	25,0	23,1

3.2. Wyznaczenie emisyjności

Całkowity strumień ciepła dla układu badawczego od źródła ciepła określono na podstawie wzoru (1) oraz pomiarów natężenia I=0,5A i napięcia elektrycznego U=200V (tabela 3). Moc strumienia ciepła od źródła ciepła wyniosła:

$$Q_{\Sigma} = I \cdot U = 0{,}5 \cdot 200 = 100W$$

Gęstość strumienia ciepła przy powierzchni ścianek modelu $q_{\Sigma}^{śc}$ i przy powierzchni źródła ciepła $q_{\Sigma}^{źc}$:

$$q_{\Sigma}^{śc} = \frac{Q_{\Sigma}}{F_{śc}} = \frac{100}{6} = 16{,}7\ \frac{W}{m^2}$$

$$q_{\Sigma}^{źc} = \frac{Q_{\Sigma}}{F_{źc}} = \frac{100}{0{,}1095} = 913\ \frac{W}{m^2}$$

Temperatura powietrza w skrzynce badawczej i na powierzchni źródła ciepła do obliczania zależności (5) wyniosły t_{pws} = 26,3^{0}C i $t_{źc}$= 42,5^{0}C.
Równanie współczynnika konwekcyjnej wymiany ciepła (6) obliczono w oparciu o temperaturę warstwy przyściennej

$t_w = t_{źc}+t_{pws}/2$= 42,5+26,3/2=34,4^{0}C,

oraz na podstawie tabeli 15.2 [4]:
λ=0,0261 W/mK; ρ=1,112 kg/m^3; η= 18,876 ·10^{-6} kg(m·□); Pr=0,71, po określeniu współczynnika rozszerzalności objętościowej

$\beta=1/273{,}2+t_w$= 1/(273,2+34,4)=0,00325

oraz kryterialnej liczby Grashofa

$$Gr = \frac{g \cdot \beta \Delta T \cdot h^3 \cdot \rho^2}{\eta^2} = \frac{9{,}81 \cdot 0{,}00325 \cdot (42{,}5 - 26{,}3) \cdot 0{,}16^3 \cdot 1{,}112^2}{\left(18{,}876 \cdot 10^{-6}\right)^2} =$$

$$= 7{,}34 \cdot 10^6$$

$$Gr \cdot Pr = 7{,}34 \cdot 10^6 \cdot 0{,}71 = 5{,}21 \cdot 10^6.$$

Z tabeli 1 i 2 wynika, że gdy $Gr \cdot Pr = 5{,}21 \cdot 10^6 < 10^9$, wówczas C=0,53, i=0,25.

Po określeniu liczba Nusselta

$$Nu = C(GrPr)^i = 0{,}53(5{,}21 \cdot 10^6)^{0{,}25} = 25{,}32$$

współczynnik konwekcyjnej wymiany ciepła wyniósł

$$\alpha = Nu\,\lambda / h = 25{,}32 \cdot 0{,}0261 / 0{,}16 = 4{,}14\ \frac{W}{m^2 K}$$

Po podstawieniu do wzoru (5):

$$Q_k = \alpha(t_{żc} - t_{pws})F_{żc} = 4{,}14(42{,}5 - 26{,}3)0{,}1095 = 7{,}34W$$

ze wzoru (11) określono radiacyjny strumień ciepła, charakteryzujący ą wymianę ciepła w modelu

$$Q_r = Q_\Sigma - Q_k = 100 - 7{,}34 = 92{,}66W$$

Gęstość strumienia ciepła przy powierzchni ścianek modelu i przy powierzchni źródła ciepła

$$q_r^{śc} = \frac{Q_r}{F_{śc}} = \frac{92{,}66}{6} = 15{,}44\,\frac{W}{m^2} \text{ i } q_r^{żc} = \frac{Q_r}{F_{żc}} = \frac{92{,}66}{0{,}1095} = 846{,}2\,\frac{W}{m^2}.$$

Przyjmując i wyliczając wartości do określenia radiacyjnego strumienia ciepła od źródła ciepła do ścianek modelu otrzymano c=5,67 W/m^{2}K^4,$\varphi_{żc\text{-}śc}$=1,0. Na podstawie pomiarów temperatury źródła ciepła $T_{żc}$= 42,5^{0}C i średniej temperatury ścianek $T_{śc}$= 25,6^{0}C i odczytaniu emisyjności źródła ciepła z tabeli 15.8 [4] (ocynkowana blacha stalowa) emisyjność powierzchni badanej masy tynkarskiej z dodatkiem aerogelu z równania (14) wyniosła

$$\varepsilon_{śc} = \frac{92{,}66}{0{,}228 \cdot 6 \cdot 5{,}67 \cdot \left[(42{,}5 + 273)^4 - (25{,}6 + 273)^4\right] \cdot 1{,}0} = 0{,}64.$$

4. Wnioski

Sformułowano zależności do eksperymentalnego określenia emisyjności wybranego materiału budowlanego do wewnętrznych robót tynkarskich.

Przedstawiona metodologia powinna zostać zweryfikowana badaniami innych materiałów wykończeniowych.

Badania współfinansowane były z Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka – projekt POIG.01.01.02-10-106/09-00 „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportowej w strategii zrównoważonego rozwoju”.

Literatura

[1] Holman J. P.: Experimental Methods for Engineers, Eight Edition, McGraw-Hill Companies, New York 2012.

[2] IR Thermometers & Pyrometers, Non-contact temperature measurement, Transactions in measurement and control, Section 3. vol. 1, 2nd edition, Putman Publishing Company and Omega Press LLC 1998. http://www.omega.com/literature/transactions/volume1/thermometers1.html

[3] Judd Ross Leonard, Edited by Robert A. Granger.: Experiments in Heat Transfer and Thermodynamics, Chapter: experiment 23 - Determination of the emissivity of a heated cupper surface, Cambridge University, Press 1994, pp. 173-178.

[4] Kalinowski E.: Przekazywanie ciepła i wymienniki, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1995.

[5] Kostowski Wojciech J.: Wyznaczenie emisyjności powierzchni ciał stałych, Instrukcja laboratoryjna, Laboratorium Techniki Cieplnej Politechniki Śląskiej http://www.itc.polsl.pl/newitc/files/studenci/laboratorium/techniki_cieplnej/instr_emisyjnosc.pdf.

[6] Panigrahi P. K., Nigam N.C.: Emessivity measurment, Heat and Mass Transfer, Experiment 2, India http://home.iitk.ac.in/~panig/ME341_EXP2.pdf.

METHODOLOGY FOR DETERMINING EMISSIVITY OF SOME TYPES OF BUILDING MATERIALS

S u m m a r y

The article presents an analysis of existing methodologies and apparatus for determination of materials emissivity under production and laboratory conditions. Their disadvantages were defined and a more simple method for the determination of the emissivity of some types of building materials was proposed. An algorithm of the emissivity determination of the chosen material was also presented. The article presents a method for determining emissivity of some types of building materials. The proposed method consists in developing of a model of convective and radiative heat transfer taking place between the cylindrical heat source and a square shell (model of the room). The model of the room is the cube of dimensions 1×1×1 m, with the heat source arranged inside of it. The surface area and emissivity of the heat source are known. For temperature and heat flux measurement thermocouples and heat flux sensors were used. The building material with tested emissivity (e.g. plaster) is applied on the inner wall surface of the room model. Experimental measurement gives us the total heat flux, flowing to the walls of the room model from the heat source, the temperature of the walls surface in the room model and air temperature inside of it. Description of the method is illustrated by an example of emissivity determination for interior plaster with an extremely low-density which is kind of rigid foam with aerogel.

Keywords: emissivity, model of the room, heat transfer, convection, radiation, longwave radiation, aerogel

Przesłano do redakcji: 22.11.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.64

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 367-374

Małgorzata PIASKOWSKA-SILARSKA[1]

WPŁYW GAZU SKŁADOWISKOWEGO NA ŚRODOWISKO I MOŻLIWOŚCI JEGO UNIESZKODLIWIANIA

Obecnie prawie 60% polskich składowisk nie posiada instalacji odgazowania, natomiast na 30% stosuje się systemy pasywne. W obydwu przypadkach gaz składowiskowy trafia do atmosfery, co w świetle obowiązujących umów międzynarodowych i przepisów Unii Europejskiej jest niedopuszczalne. Jak widać problem biogazu powstającego na polskich składowiskach odpadów jest ogromny. W przedstawionym referacie scharakteryzowano odpady komunalne. Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w 2011 r. wytworzono ich w Polsce 12 128,8 tys. Mg z czego zebrano 9 827,6 tys. Mg. Zdecydowana większość odpadów, bo aż 70,9% trafiła na składowiska, pozostała część poddana była recyklingowi (11,4%), unieszkodliwianiu biologicznemu (16,7%) i przekształcaniu termicznemu (1,0%). W dalszej części referatu omówiono czynniki mające wpływ na skład gazu składowiskowego i jego właściwości. Następnie opisano oddziaływanie biogazu na środowisko naturalne. Dwa jego główne składniki, czyli metan i dwutlenek węgla zalicza się do najważniejszych gazów cieplarnianych. Biogaz powoduje również osiadanie terenu składowiska, zanieczyszczenie wód gruntowych, zmianę składu mineralnego gleb i degradację strefy ukorzenienia roślin. Uciążliwy zapach, wywołany przez składniki śladowe gazu składowiskowego działa na człowieka toksycznie i dusząco. Metan stwarza także ryzyko samozapłonu i wybuchu, zwłaszcza w ostatnich fazach eksploatacji składowiska oraz po zaprzestaniu przyjmowania odpadów. W referacie omówiono także technologie ujmowania gazu składowiskowego, połączone z produkcją energii elektrycznej i układy kogeneracyjne. Innymi stosowanymi rozwiązaniami jest wytwarzanie z biogazu gorącej wody lub pary oraz zasilanie przy jego użyciu promienników podczerwieni.

Słowa kluczowe: biogaz, małe elektrownie biogazowe (MEB)

1. Wprowadzenie

Zgodnie z Krajowym Planem Działania, w 2020 roku Polska powinna posiadać 15% udział energii ze źródeł odnawialnych. Tymczasem według danych

[1] Małgorzata Piaskowska-Silarska, Instytut Techniki, Uniwersytet Pedagogiczny, ul. Podchorążych 2, 30-084 Kraków, tel. 601681558, e-mail: mpiasko@up.krakow.pl

Urzędu Regulacji Energetyki pod koniec marca 2013 roku energia wyprodukowana z gazu składowiskowego stanowiła 1,25%, czyli 59,7 MW mocy zainstalowanej.

Obecnie ponad 10% polskich składowisk odpadów wyposażonych jest w aktywne odgazowanie, natomiast na 30% stosowane są systemy pasywne, niezgodne z europejską dyrektywą w sprawie składowania odpadów. Polegają one na zabudowie struktur do których gaz dopływa pod własnym ciśnieniem złożowym, a następnie trafia do atmosfery. Jedyną zaletą instalowanych studni odgazowujących jest uzyskanie na składowisku przewidywalnych punktów emisji biogazu do atmosfery.

Chociaż przedstawione powyżej dane nie napawają optymizmem, to jednak porównując ilość małych elektrowni biogazowych (MEB) z rokiem 2005, kiedy było ich zaledwie kilka, możemy stwierdzić znaczący postęp. W 2013 r., czyli po ośmiu latach wspierania systemowego w postaci zielonych certyfikatów, mamy już 97 MEB z mocą zainstalowaną 60 MW (tabela 1) [1].

W tabeli przedstawiono korzyści wynikające z zakładania elektrowni biogazowych. Pokazano tu również potencjalne możliwości wykorzystania energii z gazu składowiskowego na kolejnych 82 składowiskach i uzyskania mocy zainstalowanej ok. 8 MW. Pozostaje jednak prawie 700 składowisk, które w ogóle nie zostały tu uwzględnione. Problem gazu składowiskowego jest zatem nadal duży i wciąż daleki od rozwiązania.

Tabela 1. Statystyka małych elektrowni biogazowych w Polsce oraz szacowany potencjał biogazu na pozostałych składowiskach, na podstawie [1]

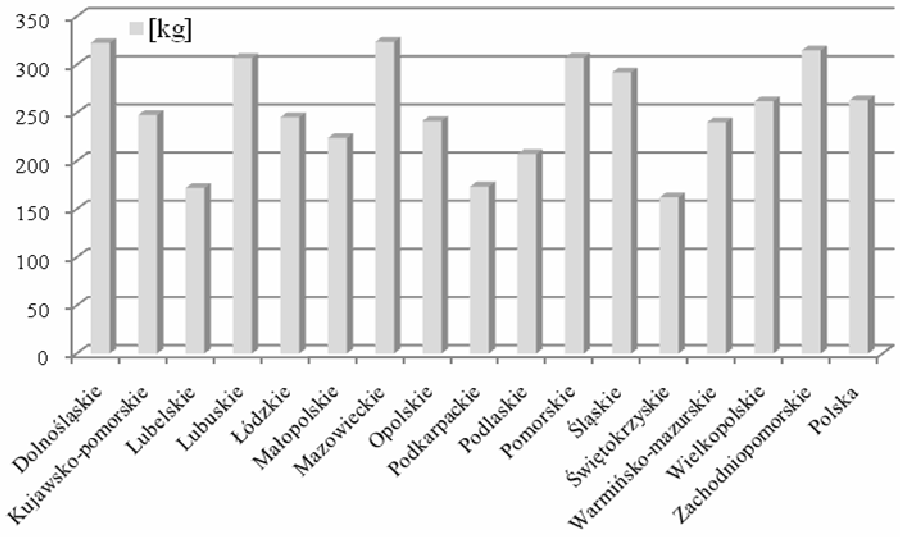
Table 1. Statistics of small biogas plants in Poland and the estimated potential of biogas on other storage facilities, based on [1]

2013 r.	**Składowiska z MEB (działające)**	**Składowiska z potencjalną możliwością wykorzystania energii**
Ilość małych elektrowni biogazowych (MEB)	97	82 (z 873)
Moc zainstalowana [MWe]	60	8,15
Energia elektryczna wyeksportowana [MWh]	420 000	57 115
Ilość bezpośrednich miejsc pracy	194	164
Koszt wsparcia zielonymi certyfikatami [mln PLN] (przy cenie zielonego certyfikatu 297 PLN)	125	17
Wpływy do budżetu Państwa [mln PLN]	103	14
Zaoszczędzone paliwo kopalne [Mg węgla]	242 000	57 050

2. Charakterystyka odpadów komunalnych w Polsce

Według danych Głównego Urzędu Statystycznego w 2011 r. wytworzono w Polsce 12 128,8 tys. Mg odpadów komunalnych z czego zebrano 9 827,6 tys. Mg. Zdecydowana większość odpadów, bo aż 70,9% trafiła na składowiska, pozostała część poddana była recyklingowi (11,4%), unieszkodliwianiu biologicznemu (16,7%) i przekształcaniu termicznemu (1,0%). Analizując rys. 1 można zauważyć znaczne zróżnicowanie w ilości zebranych odpadów komunalnych przypadających na jednego mieszkańca: od 153 kg w województwie świętokrzyskim do 314 kg w województwie dolnośląskim, przy średniej dla całego kraju: 255 kg na 1 mieszkańca. Większość zmieszanych odpadów komunalnych pochodziła z gospodarstw domowych (69,8%) oraz handlu, małego biznesu, biur i instytucji (25,0%). Źródłem pozostałych odpadów (5,2%) były usługi komunalne, takie jak czyszczenie ulic, utrzymanie parków i cmentarzy.

W 2011 roku udział odpadów zebranych selektywnie wyniósł 10% ogólnej ilości zebranych odpadów komunalnych. Przyczyniła się do tego niewątpliwie edukacja ekologiczna dzieci i młodzieży [2,3]. Recyklingowi poddano szkło (27,3% ogółu odpadów zebranych selektywnie), papier i tekturę (17,7%) oraz tworzywa sztuczne (16,0%). Natomiast ilość zebranych odpadów biodegradowalnych kształtowała się na poziomie 21,3% ogółu odpadów zebranych selektywnie [4].



Rys. 1. Ilość odpadów komunalnych przypadająca na 1 mieszkańca, zebrana w poszczególnych województwach w 2011r., na podstawie [4]

Fig 1. The quantity of municipal waste pro capita in particular Voivodeships in 2011, based on [4]

3. Proces powstawania gazu składowiskowego

Jeżeli zostaną zapewnione odpowiednie warunki składowania odpadów, takie jak uszczelnienie dna i skarp składowiska, ugniatanie i przykrywanie warstwy odpadów ziemią lub innym obojętnym materiałem, kontrolowanie wilgotności złoża (drenaż odcieków), to będą zachodzić procesy rozkładu anaerobowego. Składa się on z szeregu spontanicznie zachodzących procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych. Rozkład fizyczny polega na wymywaniu poszczególnych składników odpadów. Rozkład chemiczny towarzyszy rozpuszczaniu się poszczególnych składników w odciekach, wytrącaniu osadów oraz procesom adsorpcji i desorpcji. Materiały organiczne ulegają natomiast rozkładowi biologicznemu. Najszybciej degradują się odpady żywnościowe (rok), wolniej – zielone ogrodowe (5 lat), najwolniej – papier, tektura, drewno, odpady włókiennicze (15 lat). Procesy rozkładu biologicznego wywierają również wpływ na przebieg procesów chemicznych i fizycznych poprzez zmiany takich czynników jak pH i potencjał redox [5].

Proces tworzenia się gazu składowiskowego zależny jest od następujących czynników:

- składu i gęstości odpadów,
- stopnia zawilgocenia odpadów,
- temperatury składowiska (wraz z obniżeniem temperatury maleje szybkość wydzielania się metanu),
- odczynu pH (optymalny wynosi 6,8 – 8,5),
- współczynnika komprymacji złoża (im większy, tym mniej tlenu atmosferycznego zawiera złoże, tym większe ciśnienie i temperatura),
- warunków atmosferycznych [6].

4. Wpływ gazu składowiskowego na środowisko

Gaz składowiskowy obecny w strefie wzrostu korzeni powoduje wypieranie powietrza. W efekcie powstają warunki beztlenowe prowadzące do uduszenia lub zatrucia drzew i innych roślin. Dodatkowo gaz składowiskowy działa negatywnie na gleby, powodując zmianę ich składu mineralnego, co również nie pozostaje obojętne dla roślin.

Kolejnym zagrożeniem, jakie może powodować wydzielający się gaz składowiskowy i rozkład odpadów jest osiadanie terenu składowiska. Rozmiary tego procesu zależą od rodzaju odpadów oraz stosunku ilości użytego przykrycia do ich objętości i gęstości po ugnieceniu. Mniejsze jest osiadanie przy dużej gęstości odpadów i grubszej warstwie materiału przykrywającego. Osiadanie występuje na wszystkich zamkniętych składowiskach a czas jego pojawienia się zależy od czynników wpływających na biodegradację odpadów.

Główny składnik gazu składowiskowego - metan, stwarza ponadto ryzyko wybuchu. Od wielu lat obsługa składowisk stwierdza niewielkie pożary spowodowane samozapłonem metanu. Gaz ten może też tworzyć w powietrzu mieszaninę wybuchową. Na składowiskach dużych aglomeracji miejskich notuje się szereg wybuchów, zwłaszcza w ostatnich fazach ich eksploatacji a także po zaprzestaniu przyjmowania odpadów [7]. Wstępny zapłon i rozwój podpowierzchniowych pożarów na składowiskach uzależniony jest od składu odpadów, zawartości wilgoci, obecności tlenu, ciśnienia wywieranego przez otoczenie na przestrzeń zapłonu. Samozapalenie metanu zachodzi przy dostatecznym dostępie powietrza i odpowiednio wysokiej temperaturze.

Gaz składowiskowy, oprócz wspomnianego zagrożenia wybuchem i pożarem, może działać na człowieka toksycznie i duszące oraz narażać na uciążliwy zapach, spowodowany przez składniki śladowe. Łączna ich zawartość w gazie nie przekracza 1%. Do najbardziej szkodliwych substancji zagrażających zdrowiu ludzkiemu należy zaliczyć: benzen, chlorek winylu i siarkowodór. Dwie pierwsze substancje i chloroform mają ponadto działanie kancerogenne. Toluen, ksylen i propylobenzen wykazują natomiast działanie narkotyczne.

Do głównych problemów zalicza się również zagrożenia dla wód. Gaz składowiskowy w różnym stopniu wpływa na wody gruntowe. Stopień ich zanieczyszczenia zależy przede wszystkim od odległości składowanych odpadów. Pojawienie się takiego zagrożenia związane jest również z uwarunkowaniami geologicznymi i hydrologicznymi.

Gaz składowiskowy zawiera dwutlenek węgla, metan oraz lotne związki azotu, siarki i chloru (tabela 2). Gazy te zalicza się do najważniejszych gazów cieplarnianych. Zwiększenie ich stężenia w atmosferze powoduje pogłębianie się efektu cieplarnianego i zmian klimatycznych na kuli ziemskiej. Według Protokołu z Kioto emisja 1 Mg metanu jest równoznaczna emisji 21 Mg dwutlenku węgla, uważanego za główny gaz cieplarniany [8].

Tabela 2. Skład biogazu ze składowiska odpadów komunalnych, na podstawie [6]

Table 2. The structure of biogas from municipal waste landfill, based on [6]

Skład biogazu	% objętościowy
Metan	45 ÷ 65
Dwutlenek węgla	25 ÷ 35
Azot	7 ÷ 10
Tlen	< 3
Pozostałe domieszki	ok. 1

5. Technologie unieszkodliwiania gazu składowiskowego

Z energetycznego punktu widzenia najważniejszym składnikiem biogazu jest metan. Zwartość ok. 60% CH_4 i 40% CO_2 pozwala uzyskać wartość opałową ok. 21,5 MJ/m^3, podczas gdy zawartość ok. 31,6% CH_4 i 34,8% CO_2 daje już tylko wartość opałową rzędu ok. 12,3 MJ/m^3. Należy dodać, że do energetycznego wykorzystania nadaje się gaz, który ma w swym składzie 40-60% metanu. Biogaz o małej wartości opałowej może być spalany w indywidualnych pochodniach lub po oczyszczeniu spalany w pochodni zbiorczej. Takie rozwiązanie, choć nie zapewnia odpowiednich parametrów spalania, pozwala wyeliminować szkodliwe składniki gazu, w tym metan. Spalanie w pochodniach stosuje się na starych i małych składowiskach, na których zbudowano studnie odgazowujące w trakcie eksploatacji składowiska lub po jej zakończeniu w sytuacji, gdy produkcja gazu jest niestabilna i ma on niską wartość opałową.

Zdecydowanie lepszym rozwiązaniem jest ujmowanie gazu składowiskowego połączone z produkcją energii, w Polsce głównie energii elektrycznej. W większości instalacji stosuje się w tym celu tłokowe silniki spalinowe lub turbiny. Na mniejszych składowiskach znajdują zastosowanie mikroturbiny. Inne rozwiązania, takie jak silniki Sterlinga, silniki wykorzystujące organiczny obieg Rankine'a oraz ogniwa paliwowe są jeszcze w fazie opracowywania.

Coraz częściej stosuje się również układy kogeneracyjne. Znajdują tu zastosowanie tłokowe silniki gazowe, turbiny gazowe i mikroturbiny. Sprawność ogólna procesu jest stosunkowo wysoka. Pozyskana energia elektryczna może być przeznaczona na potrzeby własne obiektów na składowisku, natomiast nadwyżka przesyłana do sieci energetycznej jako „zielona energia". Wytworzona energia cieplna może zostać wykorzystana na potrzeby własne, tzn. ogrzewanie pomieszczeń i ciepłej wody użytkowej, lub w przypadku korzystnej lokalizacji przesyłana do sieci ciepłowniczej [5,9].

Mniej powszechne jest natomiast wytwarzanie energii z gazu składowiskowego przy zastosowaniu kotła i turbiny parowej. W takim rozwiązaniu biogaz jest spalany w dużym kotle w celu wytworzenia pary, która napędza turbinę produkującą energię elektryczną.

Innym sposobem wykorzystania gazu składowiskowego jest wytwarzanie gorącej wody lub pary, gdy jest na nie zapotrzebowanie w bliskim sąsiedztwie składowiska odpadów. Transport gazu lub niewielkich ilości pary bądź gorącej wody na znaczne odległości jest zdecydowanie bardziej skomplikowany i często nieopłacalny.

W przypadku, gdy ilość ujmowanego gazu składowiskowego jest niewielka, można wykorzystać go do zasilania promienników podczerwieni służących do ogrzewania pobliskich budynków i szklarni lub jako źródło energii dla pracowni ceramicznych i obróbki metali. Dla niewielkich ilości pozyskanego gazu, w celu wytworzenia energii elektrycznej, stosuje się mikroturbiny [10,11,12].

6. Podsumowanie

Biorąc pod uwagę fakt, że prawie 90% składowisk odpadów komunalnych nie ma właściwie działających instalacji odgazowania, problem ten musi zostać w najbliższych latach rozwiązany. Powstające gazy (głównie metan i dwutlenek węgla) powodują pogłębianie się efektu cieplarnianego i znaczące zmiany klimatyczne na kuli ziemskiej. Przyczyniają się również do zanieczyszczenia wód gruntowych, zmiany składu mineralnego gleby i degradacji strefy ukorzenienia roślin. Powodują ponadto osiadanie terenu składowiska, co może stanowić zagrożenie dla sąsiadujących budynków. Na człowieka działają toksycznie i duszące. Podstawowy składnik biogazu, jakim jest metan, stwarza dodatkowo zagrożenie samozapłonem i wybuchem (w połączeniu z powietrzem).

Zdecydowanie najlepszym rozwiązaniem jest ujmowanie gazu składowiskowego połączone z produkcją energii, w Polsce głównie energii elektrycznej lub w skojarzeniu z energią cieplną (kogeneracja). Można również wytwarzać z biogazu gorącą wodę lub parę, gdy jest na nie zapotrzebowanie w bliskim sąsiedztwie składowiska odpadów. W przypadku, gdy ilość ujmowanego gazu jest niewielka stosuje się go do zasilania promienników podczerwieni, pozwalających ogrzewać pobliskie budynki i szklarnie lub jako źródło energii dla pracowni ceramicznych, obróbki metali i hutnictwa szkła. Na starych i małych składowiskach, na których zbudowano studnie odgazowujące w trakcie eksploatacji składowiska lub po jej zakończeniu, kiedy produkcja gazu jest niestabilna i ma on niską wartość opałową spala się go w pochodniach.

Literatura

[1] www.pigeo.org.pl [dostęp: 10 maja 2014 r.]
[2] Noga H.: Metody i formy pracy w edukacji ekologicznej dzieci, [w:] Vargova M. (red.), IKT vo vdelavani, Vystupy vyskumnych studii zameranych na technice vzdelavanie, UKF Nitra 2014.
[3] Noga H., Sobczyk W., Kozaczyński W.: Edukacja ekologiczna dzieci i młodzieży, RND Prace techniczne VI, Zeszyt 195, Wyd. Nauk. WSP, Kraków 1998.
[4] www.portalsamorzadowy.pl [dostęp: 10 maja 2014 r.]
[5] www.pga.org.pl [dostęp: 10 maja 2014 r.]
[6] www.soul.pl [dostęp: 10 maja 2014 r.]
[7] www.inig.pl [dostęp: 10 maja 2014 r.]
[8] www.drewnozamiastbenzyny.pl [dostęp: 10 maja 2014 r.]
[9] Dudek J. i in.: Układy kogeneracyjne jako sposób energetycznego wykorzystania gazu składowiskowego, Nafta-Gaz, Nr 1/2008.
[10] Dudek J. i in.: Technologie energetycznego wykorzystania gazu składowiskowego, Wyd. Nafty i Gazu, Kraków 2010.
[11] Deublein D., Steinhauser A.: Biogas from waste and renewable resources: an introduction, Weinheim: Wiley-VCH, 2011.
[12] Dudek J.: Gaz składowiskowy: źródło energii odnawialnej, Wyd. Instytut Nafty i Gazu, Kraków 2012.

EFFECTS OF THE LANDFILL GAS ON THE ENVIRONMENT AND THE POSSIBILITY OF ITS DISPOSAL

S u m m a r y

Currently, almost 60% of Polish landfill does not have a degassing installation, while 30% of landfills apply passive systems. In both cases, landfill gas goes into the atmosphere, which based on the international agreements and regulations of the European Union is unacceptable. As can be seen the problem of generated at landfills Polish biogas is huge. In the presented report municipal waste was characterized. According to data from the Central Statistical Office in 2011, produced them in Poland 12 128.8 thousand. Mg of which 9 827.6 Mg thousand were collected. Most of the waste, as many as 70.9% went just wide to landfills, the remainder was subjected to the recycling (11.4%), biological neutralization (16.7%) and thermal transformation(1.0%). In the following part of the report it discussed the factors affecting the composition of the landfill gas and its properties. Further described is the impact of the biogas on the environment. Two of its main components, namely methane and carbon dioxide is one of the most important greenhouse gases. Biogas also results subsidence of the landfill area, groundwater contamination, changing the mineral composition of the soil and degradation of the rootingplant zone. Oppressive odor, caused by trace components of landfill gas is to the man toxic and suffocating. Methane poses a risk of ignition and explosion, especially in the last phases of the operation of the landfill and after discontinuation of the waste. The article were also discussed technologies the recognition of the landfill gas, combined with the production of electricity and cogeneration systems. Other used solutions is the production the biogas from hot water or steam and power from infrared radiators.

Keywords: biogas, small biogas power plants

Przesłano do redakcji: 27.11.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.65

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 375-384

Iwona PIEBIAK [1]

WYTYCZNE PROJEKTOWE W ARCHITEKTURZE ENERGOOSZCZĘDNEJ NA PRZYKŁADZIE BUDYNKÓW MIESZKALNYCH JEDNORODZINNYCH

W artykule zaprezentowano metody oraz wytyczne projektowe dla budynków mieszkalnych jednorodzinnych projektowanych zgodnie z założeniami architektury energooszczędnej oraz zasadami zrównoważonego rozwoju. Na podstawie szczegółowej analizy ukształtowania rzutu (funkcji), przekroju, elewacji i otoczenia budynku określono cechy bryły energooszczędnego budynku jednorodzinnego. Artykuł stanowi próbę odpowiedzi na pytanie, czy budynki mieszkalne jednorodzinne kształtowane zgodnie z zasadami energooszczędności charakteryzują się określoną estetyką oraz czy możliwe jest wyodrębnienie wspólnych cech estetycznych dla tego typu obiektów.

Projektowanie obiektów energooszczędnych jest jedną z podstawowych wytycznych współczesnej architektury. Przyczynia się do tego wzrost cen, wyczerpywanie się konwencjonalnych źródeł energii oraz związane z tym obostrzające się regulacje prawne dotyczące przenikalności ciepła przez przegrody zewnętrzne budynków oraz oszczędności energii w budownictwie. Artykuł prezentuje metody projektowania budynków energooszczędnych uwzględniające pasywne metody pozyskiwania energii z promieniowania słonecznego wykazując, iż projektowanie budynków energooszczędnych nie polega jedynie na integracji ze strukturą budynku instalacji oraz technologii umożliwiających oszczędzanie energii. Energooszczędne instalacje, technologie oraz materiały budowlane stanowią element dodany do prawidłowo zaprojektowanej bryły budynku energooszczędnego. Rozmieszczenie funkcji, ukształtowanie elewacji, przekroju, nachylenia przegród zewnętrznych budynku, rozmieszczenie warstw akumulacyjnych wewnątrz budynku, a tym samym określenie bryły budynku energooszczędnego wymaga od architekta szerokiej wiedzy z zakresu kontekstu środowiskowego. Prawidłowo zaprojektowana przestrzeń wewnętrzna budynku energooszczędnego powinna umożliwiać ponadto równomierną dystrybucję uzyskanej energii z promieniowania słonecznego oraz doświetlenie pomieszczeń światłem naturalnym.

Słowa kluczowe: rozwój zrównoważony, strefowanie temperaturowe, ściany słoneczne, warstwy akumulacyjne

[1] dr inż. arch. Iwona Piebiak, Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki, Wydział Architektury, Instytut Projektowania Budowlanego, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, aibz@pk.edu.pl

1. Wstęp

Kształtowanie obiektów energooszczędnych zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju stało się nieodłącznym elementem projektowania współczesnych budynków. Definicja rozwoju zrównoważonego przyjmuje konieczność ochrony środowiska naturalnego, ograniczenia szkodliwego wpływu gospodarki i społeczeństwa na jego stan, zachowania go w stanie „niepogorszonym" dla przyszłych pokoleń [4]. Nurt ekologiczny w architekturze bierze początek w wyczerpywaniu się źródeł energii konwencjonalnej oraz we wzroście cen konwencjonalnych źródeł energii (kryzys energetyczny z lat '70 XX w.). Niezależność energetyczna stała się od tego czasu strategicznym elementem polityki wewnętrznej i zagranicznej wielu państw. Niezależności tej sprzyja promowanie idei budownictwa energooszczędnego, polegającego na ograniczeniu energochłonności budynków nowoprojektowanych i istniejących, pozyskiwanie energii z alternatywnych źródeł. Wdrażanie idei budownictwa energooszczędnego odbywa się na zasadzie wprowadzania regulacji prawnych i edukacyjnych. Kształtowanie obiektów energooszczędnych w Polsce ma swoje podłoże legislacyjne w postaci wytycznych Unii Europejskiej (Rezolucja Rady Unii Europejskiej z dnia 12 lutego 2001 r. dotycząca jakości architektury w środowisku miejskim i wiejskim 2001/C73/04, jak również Konkluzje Rady Unii Europejskiej z dnia 13 grudnia 2008 r. na temat architektury: udział kultury w zrównoważonym rozwoju 2008/C319/05) oraz wewnętrznych przepisów Państwa Polskiego (Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, z późniejszymi zmianami).

W konkluzjach Rady Unii Europejskiej z dnia 13 grudnia 2008 r. (2008/C319/05) [8] podkreślono, iż „architektura wpływa bowiem nie tylko na kulturę miejską, ale też na gospodarkę, spójność społeczną i środowisko naturalne". W tym samym dokumencie uznano, iż zrównoważony rozwój oznacza m.in.: racjonalne gospodarowanie zasobami energetycznymi w kontekście przeciwdziałania zmianom klimatu i zmniejszeniu zanieczyszczeń. W wytycznych podsumowujących przebieg konferencji państw członkowskich Unii Europejskiej, mającej miejsce w Niemczech w 2007 r., poświęconej „kulturze budowania" oraz europejskiej polityce architektonicznej uznano, iż projektowanie zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju, opiera się miedzy innymi na [3]:

- wykorzystywaniu lokalnych i pochodzących z recyklingu materiałów oraz lokalnej siły roboczej – ograniczenie energii pierwotnej;
- rozwoju komunikacji publicznej, projektowaniu krótkich dróg dojazdowych, promowaniu komunikacji rowerowej oraz ruchu pieszego - redukcja zanieczyszczeń środowiska;
- intensyfikacji zabudowy oraz infrastruktury - zmniejszenie zużycia energii;
- przedłużeniu żywotności budynków, ograniczeniu wyburzeń budynków poprzez adaptację istniejącej tkanki oraz ograniczenie marnotrawstwa materiałów;
- wprowadzaniu zieleni do przestrzeni miejskich.

Aby powstał budynek odnoszący się do zasad zrównoważonego rozwoju, kluczowym momentem w jego powstawaniu jest etap projektowania. Na tym etapie podejmowane są istotne decyzje, które trudno zmienić lub skorygować podczas budowy czy użytkowania budynku. Rozwój zrównoważony rozpatrywany w aspekcie społecznym, gospodarczym oraz środowiskowym [3] jest pojęciem wykraczającym poza samą strukturę budynku – odnosi się również do relacji tej struktury z otoczeniem, lokalnymi uwarunkowaniami środowiskowymi, gospodarczymi i społecznymi. Takie podejście do projektowania wymaga od architekta szerokiej wiedzy na temat uwarunkowań lokalnych, świadomości ekologicznej oraz wiedzy technicznej. Rozwiązania energooszczędne w architekturze wiążą się z odpowiednim doborem elementów wchodzących w skład struktury budynku (materiały i technologie budowlane, instalacje) oraz z odpowiednim ukształtowaniem struktury budynku w ścisłej relacji z otoczeniem (rzut, przekrój, elewacje, bryła budynku). Przyjęte przez projektanta rozwiązania materiałowe oraz projektowe powinny opierać się na współdziałaniu i odnosić się do relacji pomiędzy sobą. Zastosowanie rozwiązań proekologicznych w architekturze nie powinno wykluczać powstania bryły o wysokich walorach estetycznych. W artykule przedstawiono wytyczne projektowe w zakresie ukształtowania rzutu, przekroju, elewacji i bryły zewnętrznej budynku dla energooszczędnych budynków jednorodzinnych.

2. Wytyczne projektowe dla energooszczędnych budynków jednorodzinnych

2.1. Rzut

Ze względów energetycznych rzut budynku energooszczędnego powinien być zwarty, nierozczłonkowany (ograniczenie strat energii przez przegrody zewnętrzne budynku), umożliwiający skierowanie największej powierzchni przegród zewnętrznych w kierunku południowym. Optymalnym (idealnym) rozwiązaniem jest zatem kształt rzutu wydłużony w kierunku wschód-zachód, o najdłuższej elewacji skierowanej na południe.

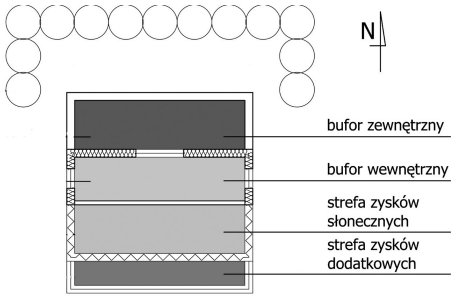
Podczas kształtowania rzutu oraz przekroju budynku energooszczędnego należy pamiętać, że powstająca przestrzeń wewnętrzna powinna spełniać wymogi funkcjonalne i estetyczne oraz służyć przepływowi uzyskanej energii z promieniowania słonecznego. Niezbędne staje się zatem strefowanie pomieszczeń ze względu na ich wymagania temperaturowe. Pomieszczenia o podobnej temperaturze użytkowej należy lokalizować obok siebie (w pionie oraz poziomie). W przypadku domów jednorodzinnych można wyróżnić cztery strefy temperaturowe:

2.1.1. Bufor zewnętrzny zlokalizowany od strony północnej, który tworzą pomieszczenia o braku zapotrzebowania na energię cieplną (pomieszczenia go-

spodarcze, garaże). Pomieszczenia te mogą być nieogrzewane. Konstrukcja tej strefy może być oddylatowana od konstrukcji całego budynku.
2.1.2. Bufor wewnętrzny zlokalizowany od strony północnej stanowiący integralna część kubatury budynku, który tworzą takie pomieszczenia jak: wiatrołapy, garderoby, hole, toalety, kuchnie, sypialnie, klatki schodowe, przestrzenie komunikacyjne. Cechą tych pomieszczeń jest niskie lub średnie zapotrzebowanie na energie cieplną. Temperatura pomieszczeń w tej strefie może wynosić 16-18 °C. Przegrody zewnętrzne w tej strefie powinny charakteryzować się niewielką ilością otworów okiennych i drzwiowych – eliminacja mostków termicznych.
2.1.3. Strefa zysków słonecznych tworzona przez takie pomieszczenia jak: salony, jadalnie, pokoje dzienne charakteryzujące się wysokim zapotrzebowaniem na energię cieplna (20-22 °C) . Strefa zysków słonecznych stanowiąca integralną część kubatury budynku powinna być lokalizowana od strony południowej. Przegrody zewnętrzne skierowane w kierunku południowym powinny charakteryzować się największą (optymalną) w kubaturze całego budynku wielkością przeszkleń. Przeszklenia te powinny jednak posiadać możliwość regulacji przepływu energii cieplnej tzn. być wyposażone w osłony przeciwsłoneczne chroniące wnętrze budynku przed przegrzaniem w okresie letnim.
2.1.4. Strefa zysków dodatkowych – bufor południowy tworzona przez zintegrowane z bryłą budynku ogrody zimowe, które mają za zadanie uzyskiwać energię z promieniowania słonecznego. Niewątpliwą pozytywną cechą zastosowania ogrodu zimowego w budynku jednorodzinnym jest „otwarcie" budynku na zewnątrz, umożliwienie kontaktu wzrokowego z otoczeniem, zaprojektowanie otwarć widokowych na zewnątrz. Ogrody zimowe mogą być oddzielone całkowicie od wnętrza budynku (przy pomocy przeszkleń bądź ścian akumulacyjnych) bądź też powiązane z przestrzenią wewnętrzna budynku. Możliwe jest również czasowe wydzielenie przestrzeni ogrodu zimowego od wnętrza budynku poprzez zastosowanie ruchomych przegród wewnętrznych.

W przypadku rozmieszczania funkcji w energooszczędnym budynku jednorodzinnym, oprócz zachowania zasady strefowania temperaturowego pomieszczeń, ważne jest również umieszczanie obok siebie w bliskiej odległości pomieszczeń wyposażonych w instalacje. Stwarza to okazję do dalszych oszczędności uzyskanych dzięki skróceniu przewodów instalacyjnych.

Rozmieszczenie funkcji oraz przegród wewnętrznych w energooszczędnym budynku jednorodzinnym powinno umożliwiać zarówno uzyskiwanie energii z promieniowania słonecznego, jak również prawidłową dystrybucję uzyskanej energii wewnątrz budynku oraz przepływ powietrza i światła naturalnego (ograniczenie zużycia energii na doświetlenie pomieszczeń światłem sztucznym). Rozmieszczenie funkcji oraz przegród wewnętrznych nie może się zatem odbywać bez znajomości podstawowych zasad fizyki budowli lecz odbywać się z wykorzystaniem naturalnych zjawisk fizycznych takich jak: efekt szklarniowy, konwekcja (kominy słoneczne), absorpcja, transmisja ciepła.



Rys. 1. Zasada wielostopniowego strefowania temperaturowego rzutu energooszczędnych jednorodzinnych budynków mieszkalnych na przykładzie budynku jednorodzinnego [5]

Fig. 1. The principle of multi-stage temperature zoning of energy-efficient single-family buildings plan illustrated by a single-family house [5]

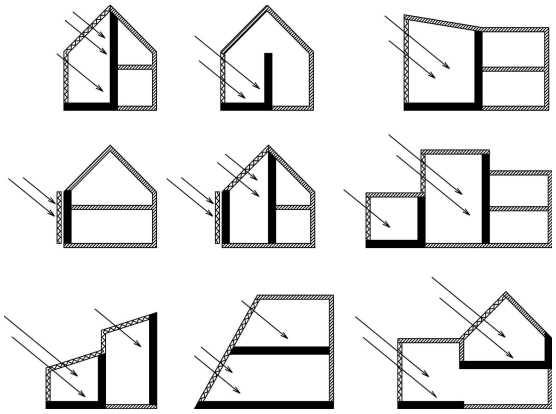
2.2. Przekrój

2.2.1. Nachylenie przegród

Kształt przekroju budynku odnajduje swoje bezpośrednie odzwierciedlenie w bryle. Nachylenie przegród zewnętrznych budynku ma zasadnicze znaczenie dla możliwości uzyskiwania energii z promieniowania słonecznego. Największą efektywnością energetyczną charakteryzują się przegrody, na które promienie słoneczne padają pod kątem prostym [1]. Nachylenie przegród oraz kształt przekroju uzależniony jest zatem od kąta padania na przegrodę promieni słonecznych w tej porze roku, w której przegroda powinna uzyskiwać energię z promieniowania słonecznego. Nachylenie przegród uzależnione jest zatem również od ich orientacji względem stron świata [1]:

- przegrody skierowane na wschód oraz zachód osiągają największe zyski (57-58%) przy nachyleniu 0-20°;
- południowy-wschód oraz południowy-zachód; 83% zyski przy nachyleniu 40-60°;
- południe; 100% zyski przy nachyleniu 60°.

Analiza optymalnych kątów nachylenia wskazuje zatem, że korzystniejsze pod względem energetycznym od przegród pionowych są zatem przegrody nachylone. Stosowanie dachów dwuspadowych w budownictwie jednorodzinnym umożliwia uzyskanie przegród nachylonych, które można wykorzystać na umieszczenie kolektorów słonecznych, ogniw fotowoltaicznych oraz dodatkowych przeszkleń (doświetlających również z przestrzenie o dużym zapotrzebowaniu na energię cieplną – salony, jadalnie, pokoje dzienne).



Rys. 2. Współzależność ukształtowania przekroju budynku oraz rozmieszczenia warstw akumulacyjnych [5]

Fig. 2. Interdependence between the shape of the cross-section and the distribution of accumulation layers [5]

2.2.2. Warstwy akumulacyjne

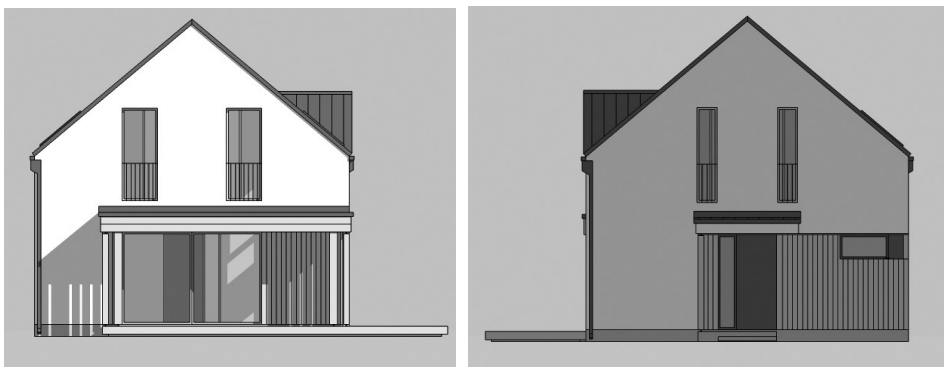
Przegrody wewnętrzne budynku energooszczędnego mogą pełnić funkcję warstw akumulacyjnych (ściany, stropy, posadzki). Zadaniem warstwy akumulacyjnej jest magazynowanie ciepła uzyskanego z promieniowania słonecznego (dzień) oraz oddawanie go do pomieszczeń z przesunięciem w czasie (noc). Zmniejsza to dobowe wahania temperatur wewnątrz pomieszczeń. Warstwy akumulacyjne kształtowane są z materiałów o dużej pojemności cieplnej (beton, cegła, ceramika). Rolę warstwy akumulacyjnej może pełnić np. ściana z cegły umieszczona naprzeciwko przeszklenia południowego. Ze względu na to, że warstwy akumulacyjne oddają ciepło z paru godzinnym przesunięciem w czasie, niekorzystne może być usytuowanie tych warstw przy przeszkleniach od strony wschodniej przy połączeniu w tej samej przestrzeni z przeszkleniami od strony południowej. Warstwy te wówczas będą oddawać ciepło w południe – w momencie maksymalnego uzysku energii cieplnej od strony południowej. Skutkować to będzie przegrzewaniem pomieszczeń. Warstwy akumulacyjne – podobnie jak przeszklenia w przegrodach zewnętrznych – należy chronić przed nadmierna ekspozycją na promieniowanie słoneczne w okresie letnim.

Usytuowanie warstw akumulacyjnych wewnątrz budynku jest ściśle uzależnione od kształtu przekroju. Zmienne wysokości brył, nachylone przeszklone przegrody umożliwiają wprowadzenie promieniowania słonecznego w głąb budynku i umieszczenie warstwy akumulacyjnej w zależności od potrzeb również w pomieszczeniach usytuowanych od strony północnej.

2.3. Elewacje

W kształtowaniu elewacji budynków energooszczędnych ważna jest ich ekspozycja względem stron świata ponieważ elewacje te pełnia rolę przegród aktywnych słonecznie. Główne przeszklenia, uzyskujące energię z promieniowania słonecznego, powinny być lokalizowane od strony południowej, południowo-zachodniej oraz południowo-wschodniej. Korzystne pod względem energetycznym jest 60° odchylenie od kierunku południowego na wschód oraz zachód [1]. Przegroda zewnętrzna budynku uzyskująca energię z promieniowania słonecznego przy pomocy przeszkleń o optymalnej wielkości, najbardziej rozbudowana, nosi nazwę ściany słonecznej. Jest ona charakterystycznym elementem bryły budynku energooszczędnego, rozpoznawalnym w widokach zewnętrznych. Ściana słoneczna jest często wyposażana w systemy osłon przeciwsłonecznych (stałych bądź ruchomych) chroniących wnętrze przed przegrzewaniem. Wielkość i parametry przeszkleń należy dobrać na podstawie szczegółowych obliczeń bilansu cieplnego budynku respektujących przepisy prawne odnoszące się do oszczędności energii i izolacyjności cieplnej przegród.

Budynek energooszczędny charakteryzuje się zatem odmiennym charakterem poszczególnych elewacji. Elewacja północna posiada najmniejsze przeszklenia, jest najmniej rozbudowana. Elewacja południowa charakteryzuje się dużymi przeszkleniami, otwarciami elewacji w postaci ogrodów zimowych, okien przesuwnych, powiązanymi z funkcją wewnętrzną tarasami, balkonami. Cecha charakterystyczną elewacji budynku energooszczędnego jest zmienność w zależności od pory dnia i roku (ochrona pomieszczeń przed przegrzewaniem w postaci ruchomych osłon przeciwsłonecznych). Detale elewacjiw budynku energooszczędnym powinny być rozwiązane w sposób eliminujący powstawanie mostków termicznych oraz gwarantować ciągłość przebiegu termoizolacji.



Rys. 3. Zróżnicowanie stopnia przeszklenia elewacji energooszczędnego budynku jednorodzinnego względem stron świata. Dom jednorodzinny Eko1. Arch. W. Buchta, arch. J. Dyga, arch. I. Piebiak

Fig. 3. Diversity in the degree of facade glazing in an energy-efficient single-family building with respect to cardinal directions. Single-family house. Arch. W. Buchta, arch. J. Dyga, arch. I. Piebiak

2.4. Bryła

Bryła budynku energooszczędnego zazwyczaj odznacza się zwartą formą ze względu na ograniczenie strat ciepła przez przenikanie przez przegrody zewnętrzne budynku. Ponieważ budynek energooszczędny powstaje w relacji do otoczenia, z uwzględnieniem indywidualnych cech środowiska i krajobrazu, mogą charakteryzować go również indywidualne cechy przestrzenne wynikające z relacji z otoczeniem (niska wysokość zabudowy, rozczłonkowanie rzutu, rozbudowana strefa parteru, przy dużej gęstości otaczającej zabudowy - usytuowanie strefy zysków słonecznych powyżej poziomu parteru itd.). Cechą charakterystyczną bryły budynku energooszczędnego jest dostosowanie rozwiązań bryłowych do warunków klimatu zewnętrznego.

Forma zewnętrzna jednorodzinnych budynków energooszczędnych może opierać się zarówno na estetyce związanej z budownictwem tradycyjnym, jak i nowoczesnym. W projektowaniu budynków energooszczędnych można wyróżnić następujące kierunki projektowe: high-tech oraz eco-tech wprowadzające do architektury elementy wysokorozwiniętych technologii, low-tech oraz no-tech rezygnujących z aktywnych systemów uzyskiwania energii słonecznej, uzyskiwanie, magazynowanie oraz dystrybucja energii z promieniowania słonecznego odbywa się dzięki elementom wchodzącym w skład struktury budynku, na zasadach fizyki budowli. Kierunkiem pośrednim pomiędzy high-tech i eco-tech a low-tech i no-tech jest environmental humanism. Cechuje go równowaga w stosowaniu materiałów tradycyjnych i innowacyjnych produktów [4,6].



Rys. 4. Bryła energooszczędnego budynku jednorodzinnego. Widok od strony południowo-wschodniej oraz północno-zachodniej. Dom jednorodzinny Eko1. Arch. W. Buchta, arch. J. Dyga, arch. I. Piebiak

Fig. 4. An energy-efficient single-family body of the building. View from the South East and North West. Single-family house. Arch. W. Buchta, arch. J. Dyga, arch. I. Piebiak

3. Wnioski

Podsumowując można wyróżnić następujące cechy budynków energooszczędnych, w tym budynków jednorodzinnych:

- dostosowanie rozwiązań bryłowych do warunków klimatu zewnętrznego;
- zwarta bryła (lecz dostosowana do warunków środowiska zewnętrznego);
- występowanie elementów przestrzennych w postaci struktur uzyskujących energię z promieniowania słonecznego (duże przeszklenia, ogrody zimowe), oraz umożliwiające magazynowanie (warstwy akumulacyjne) i dystrybucję uzyskanej energii cieplnej w strukturze budynku (otwarte przestrzenie w poziomie i pionie);
- rozbudowana elewacja południowa (duże przeszklenia, ogrody zimowe, osłony przeciwsłoneczne) – „otwarcie" budynku w kierunku południowym;
- zróżnicowanie wielkości przeszkleń w zależności od stron świata (fasada północna – ograniczone wielkości otworów okiennych i drzwiowych, fasada południowa – optymalne wielkości przeszkleń dobrane na podstawie wymagań i obowiązujących przepisów);
- zróżnicowany wygląd elewacji w zależności od pór roku (regulacja zysków słonecznych przy pomocy ruchomych osłon przeciwsłonecznych);
- występowanie efektu „wielowarstwowości" elewacji a tym samym niejednoznaczności granic zewnętrznych budynku uzyskany dzięki stałym oraz ruchomym osłonom przeciwsłonecznym, otwieralnym przeszkleniom;
- ukształtowanie rzutu i przekroju umożliwiające swobodny przepływ światła dziennego oraz energii uzyskanej z promieniowania słonecznego;
- ewentualna integracja w przegrodach zewnętrznych budynków instalacji aktywnie pozyskujących energię (kolektory słoneczne, ogniwa fotowoltaiczne).

Literatura

[1] Celadyn W.: Przegrody przeszklone w architekturze energooszczędnej, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.
[2] Gauzin–Mueller D.: Sustainable Architecture and Urbanism. Concepts, Technologies, Examples. Basel. Berlin. Boston. 2002.
[3] Gehl J.: Baukultur als Wachstumsimpuls. Gute Beispiele fuer europaeische Staedte. Ausgewaehlte fallstudien. Bundesministerium fuer Verkher, Bau und Stadtentwicklung, Germany 2007.
[4] Kronenberg J., Bergier J.: Wyzwania zrównoważonego rozwoju w Polsce. Fundacja Sendzimira, Kraków 2010.
[5] Piebiak I.: Transparentne izolacje termiczne w kształtowaniu architektury obiektów solarnych. Praca doktorska, Kraków 2008.
[6] Piebiak I.: Transparentne izolacje termiczne w kierunkach estetycznych architektury solarnej Czasopismo techniczne Politechniki Krakowskiej, 2010, s. 175-181.

[7] Resolution of the Council of the European Union of 12 February 2001 on architectural quality in urban and rural environments (2001/C73/04).
[8] The Council of the European Union conclusions of 13 December 2008 on architecture: culture's contribution to sustainable development. (2008/C 319/05).

GREEN ARCHITECTURE DESIGN GUIDELINES AS FOUND IN FAMILY RESIDENTIAL BUILDINGS

S u m m a r y

The paper presents methods and design guidelines for single-family buildings designed in line with energy-efficient and sustainable architecture. Features of such an energy-efficient body of the building were evaluated on the basis of a detailed analysis of a plan shape (function), cross-section, elevation and building surroundings. The article attempts to answer the question of whether single-family residential buildings shaped in accordance with energy-efficiency principles are characterized by a specific aesthetics and whether it is possible to identify common aesthetic features for them. Designing energy-efficient buildings is one of the guiding principles of modern architecture. Among contributing factors there are: steady rise in prices, depletion of conventional energy sources with simultaneous tightening regulations on heat transmission through the building envelope and energy efficiency in construction. The article presents methods of energy-efficient building design taking into account passive methods of obtaining energy from solar radiation. It demonstrates that designing energy-efficient buildings does not consist in mere integration of installation systems and energy-efficient technology with the structure of the building. Energy-efficient systems, technologies and building materials are part added to the properly designed energy-efficient body of the building. Function distribution, elevation, cross-section and envelope slope's shaping as well as accumulation layers distribution inside, and thus determining an energy-efficient body of the building, requires a broad knowledge of the environmental context. A well designed interior space of energy-efficient building should also allow for even distribution of solar energy and for lighting rooms with natural light.

Keywords: green architecture, sustainable development, temperature zoning, solar walls, accumulation layers

Przesłano do redakcji: 08.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.66

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 385-392

Łukasz POLUS [1]
Maciej SZUMIGAŁA[2]

WPŁYW TARCIA NA NOŚNOŚĆ BELKI ALUMINIOWO-BETONOWEJ

W artykule przedstawiono wpływ tarcia, występującego między aluminiową belką a stalową blachą fałdową pełniącą funkcję deskowania płyty żelbetowej, na nośność belki zespolonej aluminiowo - betonowej. Belki aluminiowo - betonowe są stosunkowo nowym rodzajem konstrukcji w porównaniu do belek stalowo-betonowych. Konstrukcje aluminiowe mają wiele zalet. Możliwy jest ich pełen recykling, a materiał jest odporny na korozję. Konstrukcje zespolone aluminiowo - betonowe w związku z większą odpornością aluminium na korozję wydają się być trwalsze od konstrukcji stalowo - betonowych. Możliwa jest jednak korozja na powierzchni styku aluminium ze stalą w belkach z płytą żelbetową wylaną na stalowej blasze fałdowej. Z tego powodu należy odizolować belkę aluminiową od blachy stalowej stosując przekładki. Zastosowanie przekładki np. elastomerowej redukuje wpływ tarcia na powierzchni styku aluminium - stal. W artykule oceniono wpływ wielkości współczynnika tarcia oraz jego zupełnego pominięcia na nośność belki zespolonej aluminiowo - betonowej. Przygotowano model składający się z aluminiowej dwuteowej belki i płyty żelbetowej wykonanej na stalowej blasze fałdowej. Z obliczeń numerycznych otrzymano, że wpływ tarcia na nośność na zginanie jest pomijalnie mały. Stąd zasadne jest stosowanie przekładek zapobiegających korozji na styku aluminium – stal, nawet jeśli mają one zmniejszyć tarcie występujące między w/w materiałami. Planowane są badania laboratoryjne belki zespolonej aluminiowo-betonowej przedstawionej w artykule oraz badania podatności łączników.

Słowa kluczowe: konstrukcje zespolone aluminiowo-betonowe, analiza numeryczna nośności

1. Wprowadzenie

Coraz częściej jako materiał konstrukcyjny wykorzystuje się stopy aluminium. Każda nowa budowla związana jest z trwałymi i nieodwracalnymi zmianami w środowisku [1].

---

[1] Autor do korespondencji: Łukasz Polus, Instytut Konstrukcji Budowlanych, Piotrowo 5, 60-965 Poznań, 61 665 2098, lukasz.polus@put.poznan.pl.

[2] Maciej Szumigała, Instytut Konstrukcji Budowlanych, Piotrowo 5, 60-965 Poznań, 61 665 2401, maciej.szumigala@put.poznan.pl.

Projektanci powinni szukać trwałych rozwiązań, które będą ograniczały zużycie zasobów naturalnych [2]. Różnica pomiędzy ceną stopów aluminiowych a stalą jest znaczna, ale wraz z rozwojem technologii produkcji ulega zmniejszeniu. Konstrukcje aluminiowe mają wiele zalet. Możliwy jest ich pełen recykling [3], a materiał jest odporny na korozję dzięki występującej na powierzchni aluminium warstewce tlenku glinu [6]. Z najczęściej stosowanych materiałów konstrukcyjnych stopy aluminium są najlżejsze. Najcięższym materiałem (w proporcji: ciężar do wytrzymałości) jest beton, potem stal i drewno [3]. Konstrukcje zespolone aluminiowo-betonowe w związku z większą odpornością aluminium na korozję wydają się być trwalsze od konstrukcji stalowo-betonowych, których zasady wymiarowania zostały przedstawione w [5], [7]. Konstrukcje aluminiowe projektuje się wg [8]. W związku z brakiem normy dla konstrukcji aluminiowo-betonowych, przy określaniu parametrów belki zespolonej aluminiowo-betonowej skorzystano z wytycznych podanych w [7].

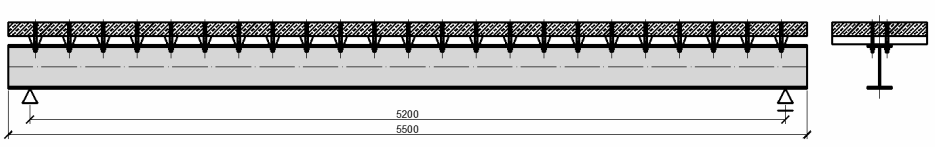
2. Analiza numeryczna wpływu tarcia na nośność belki

Dane dotyczące analizowanej belki zespolonej aluminiowo-betonowej zebrano w tabeli 1. Belkę przedstawiono na rys. 1. Specjalne łączniki, które wykorzystano do połączenia belki aluminiowej z płytą betonową zostały opisane w [10] i [11].

Tabela 1. Belka zespolona aluminiowo-betonowej

Table 1. Composite aluminium and concrete beam

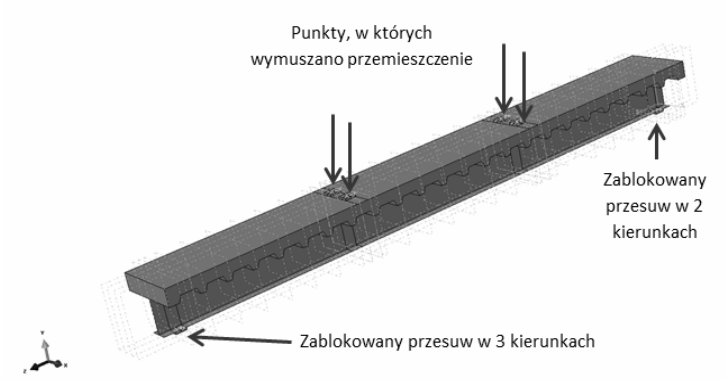
Parametr	**Symbol**	**Wartość**	**Jednostka**
Rozpiętość belki	L	5,20	m
Schemat belki	swobodnie podparta		
Wysokość płyty betonowej	h	150,0	mm
Szerokość płyty betonowej	b	656,0	mm
Grubość betonu nad blachą trapezową	h_c	95,0	mm
Stop aluminium	EN AW-6063 T6		
Granica plastyczności stopu aluminium	f_o	170	MPa
Wytrzymałość na rozciąganie stopu aluminium	f_u	215	MPa
Przekrój aluminiowy	Dwuteownik, klasa przekroju: 3		
Wysokość przekroju aluminiowego	h_a	300	mm
Szerokość półki przekroju aluminiowego	b_f	170	mm
Grubość półki przekroju aluminiowego	t_f	15	mm
Grubość środnika przekroju aluminiowego	t_w	8	mm
Beton	C35/45		
Średnica sworznia	d	19	mm
Materiał sworznia	S235		
Rozstaw łączników	233,0mm		
Blacha trapezowa	T55P grubość 1mm, stal S235		



Rys. 1. Belka aluminiowo-betonowa

Fig. 1. Aluminium and concrete beam

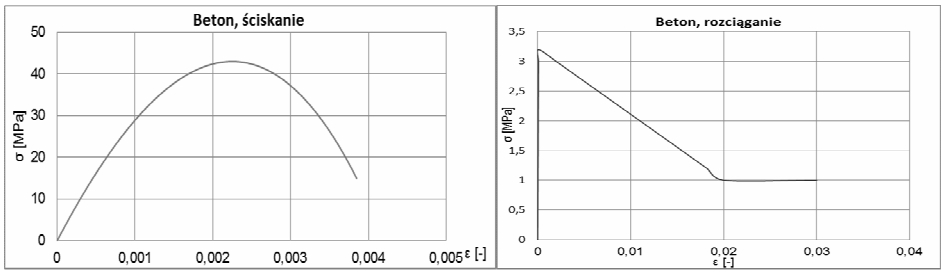
Analizę numeryczną przeprowadzono w programie Abaqus. Model belki zespolonej przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Model belki aluminiowo-betonowej

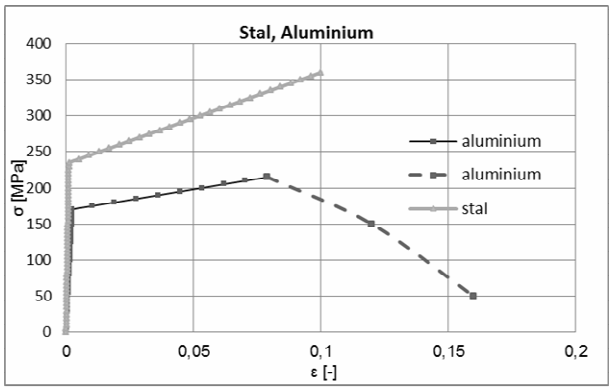
Fig. 2. Model of aluminium and concrete beam

Model składa się z aluminiowej dwuteowej belki i płyty żelbetowej wykonanej na stalowej blasze fałdowej. Łączniki sworzniowe „zatopiono” w betonie. W modelu numerycznym geometrię modelu zastąpiono elementami skończonymi: płyta betonowa - ośmiowęzłowe prostopadłościenne elementy skończone typu *solid*, aluminiowa belka - elementy czterowęzłowe typu *shell*, blacha fałdowa jako „skin” - elementy czterowęzłowe typu *shell*, łączniki - elementy prętowe typu *beam*. Prawa fizyczne dla przyjętych w analizie materiałów przedstawiono na poniższych rysunkach.



Rys. 3. Prawo fizyczne dla betonu, ściskanie, rozciąganie, na podstawie [4],[9]

Fig. 3. Physical law for concret, compression, tension, based on [4],[9]

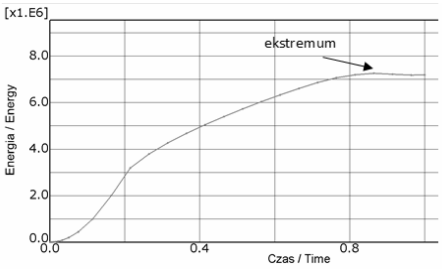


Rys. 4. Prawo fizyczne dla stali i aluminium

Fig. 4. Physical law for steel and aluminium

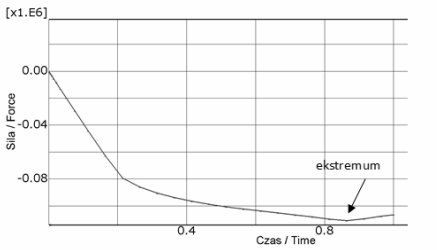
Obliczenia przeprowadzono stosując procedurę Abaqus-Standard z zastosowaniem metody przyrostowej Newtona-Raphsona. Obciążenie przykładane było w postaci zadanego w punktach wymuszenia kinematycznego jak dla standardowego schematu belki zginanej czteropunktowo. Obciążenie graniczne dla tego przypadku zaobserwowano w momencie pojawienia się opadającej gałęzi wykresu na ścieżce równowagi statycznej.

Modelując kontakt pomiędzy blachą stalową, a półką górną aluminiowego dwuteownika uwzględniono tarcie (różne współczynniki) i oceniono jego wpływ na nośność belki zespolonej aluminiowo-betonowej. Krzywą energii odkształcenia pokazano na rys. 5. Na rysunku 6 pokazano wykres zmian siły wymuszającej w jednym z punktów przyłożenia wymuszenia (przemieszczenia).



Rys. 5. Energia odkształcenia

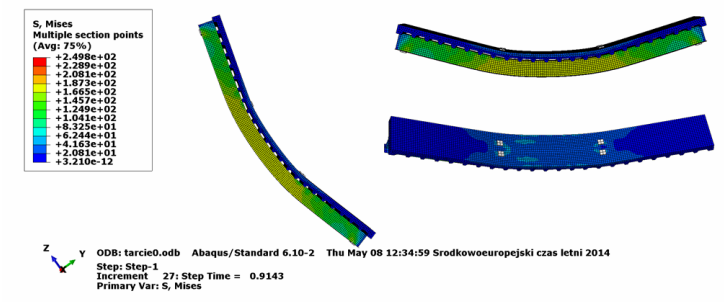
Fig. 5. Strain energy



Rys. 6. Siła wymuszająca w jednym z punktów

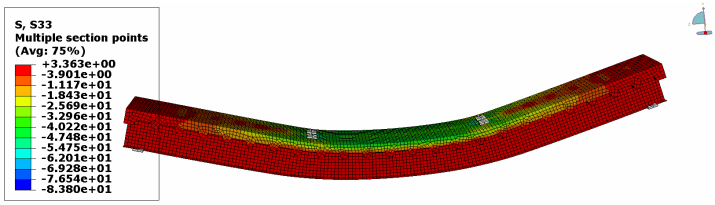
Fig. 6. Force in one of the points

Na rys. 7 przedstawiono mapę naprężeń ekwiwalentnych Hubera-Misesa-Hencky'ego, a na rys. 8 mapę naprężeń głównych S33 w kroku, gdy pojawia się „opadanie" na ścieżce równowagi statycznej dla współczynnika tarcia wynoszącego 0,0. Na rys. 7 widać, że belka aluminiowa uległa uplastycznieniu w środku rozpiętości, a rys. 8, że w środku rozpiętości belki zespolonej została przekroczona wytrzymałość betonu na ściskanie.



Rys. 7. Mapa naprężeń ekwiwalentnych Hubera-Misesa-Hencky'ego

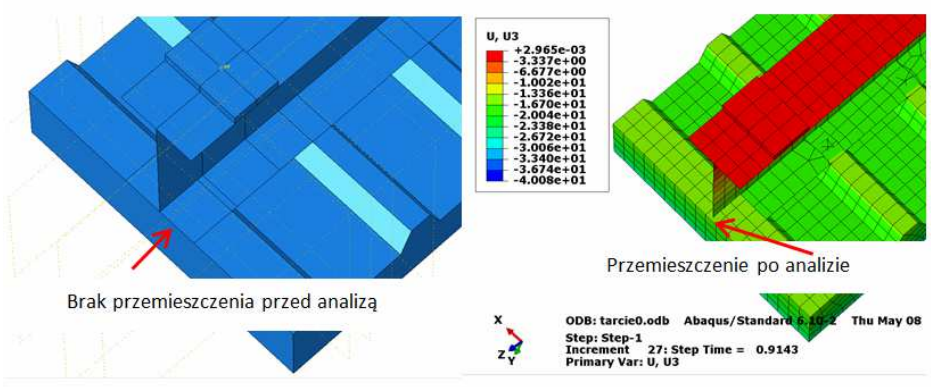
Fig. 7. Map of stress equivalent Huber-Mises-Hencky



Rys. 8. Mapa naprężeń głównych S33

Fig. 8. Main stress S33

Przemieszczenie belki aluminiowej w stosunku do płyty betonowej analizowano na podstawie dwóch punktów umieszczonych na krawędzi belki zespolonej, na styku belki aluminiowej z płytą betonowa. Jeden z punktów związany był z belką aluminiową, a drugi z płytą betonową. Przed analizą punkty te się pokrywały, a po przeprowadzeniu obliczeń numerycznych określono różnicę w ich położeniu mierzoną po kierunku podłużnym. Przemieszczenie belki w stosunku do płyty betonowej dla współczynnika tarcia wynoszącego 0,0 przedstawiono na rys. 9.



Rys. 9. Przemieszczenie belki aluminiowej w stosunku do płyty

Fig. 9. The displacement of the aluminium beam relative to the concrete plate

Wpływ tarcia na przemieszczenie belki aluminiowej w stosunku do płyty betonowej pokazano w tabeli 2.

Tabela 2. Przemieszczenie belki aluminiowej w stosunku do płyty betonowej

Table 2. The displacement of the aluminium beam relative to the concrete plate

Współczynnik tarcia	**Przemieszczenie belki w stosunku do płyty**
0,0	1,35mm
0,1	1,26mm
0,2	1,18mm
0,3	1,10mm
0,4	1,02mm
0,5	1,05mm

W momencie pojawienie się opadania gałęzi wykresu na ścieżce równowagi statycznej określono wartość maksymalnej siły wymuszającej, reakcję na podporze i obliczono moment w środku rozpiętość, który przyjęto jako nośność na zginanie belki aluminiowej. Wpływ tarcia na nośność belki zespolonej aluminiowo-betonowej pokazano w tabeli 3.

Tabela 3. Nośność na zginanie belki aluminiowo-betonowej

Table 3. Load bearing capacity of aluminium and concrete beam

Współczynnik tarcia	Nośność na zginanie
0,0	375,129kNm
0,1	375,572kNm
0,2	375,883kNm
0,3	376,028kNm
0,4	376,123kNm
0,5	376,221kNm

3. Podsumowanie

Wpływ tarcia na nośność na zginanie jest pomijalnie mały. Stąd zasadne jest stosowanie przekładek zapobiegających korozji na styku aluminium – stal, nawet jeśli mają one zmniejszyć tarcie występujące między w/w materiałami. Planowane są badania laboratoryjne belki zespolonej aluminiowo-betonowej przedstawionej w artykule oraz badania podatności łączników.

Literatura

[1] Bromberek Z.: Energooszczędność a rozwój miast, Izolacje 1/2014, 2014.

[2] Błaszczyński T.: Budownictwo zrównoważone z elementami charakterystyki energetycznej, Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne, Wrocław 2013.

[3] Gwóźdź M.: Problemy projektowe współczesnych konstrukcji aluminiowych, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2007.

[4] Kmiecik P., Kamiński M.: Modelling of reinforced concrete structures and composite structures with concrete strength degradation taken into cosideration, Archives of Civil and Mechanical Engineering, Vol. XI, No. 3, 2011.

[5] Kucharczuk W., Labocha S.: Konstrukcje zespolone stalowo-betonowe budynków, Arkady, Warszawa 2007.

[6] Mromliński R.: Konstrukcje aluminiowe, Arkady, Warszawa 1975.

[7] PN-EN 1994-1-1, Eurokod 4, Projektowanie zespolonych konstrukcji stalowo-betonowych Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, Polski Komitet Normalizacyjny 2008

[8] PN-EN 1999-1-1, Eurokod 9, Projektowanie konstrukcji aluminiowych, Część 1-1: Reguły ogólne, Polski Komitet Normalizacyjny 2011

[9] PN-EN 1992-1-1, Eurokod 2, Projektowanie konstrukcji z betonu, Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków, Polski Komitet Normalizacyjny 2008

[10] Polus Ł., Szumigała M., Analiza numeryczna nośności i sztywności belki zespolonej aluminiowo-betonowej, Jubileuszowa X Konferencja Naukowo Techniczna Konstrukcje Zespolone, Zielona Góra 2014

[11] Szumigała M., Polus Ł. Numeryczne modelowanie badania nośności łącznika do konstrukcji aluminiowo-betonowych, Aktualne problemy konstrukcji metalowych, II Międzynarodowa Polsko-Ukraińska Konferencja Naukowo-Techniczna, Fundacja Rozwoju Inżynierii Lądowej, Gdańsk 2014

PODZIĘKOWANIA

Pracę wykonano w ramach działalności statutowej 01/11/DSPB/0305 oraz 01/11/DSMK/0292.

INFLUENCE OF THE FRICTION ON THE CAPACITY OF THE ALUMINIUM AND CONCRETE BEAM

S u m m a r y

In the article the influence of the friction between the aluminium beam and the steel sheet on the load bearing capacity is presented. The steel sheet is a formwork of the reinforcement plate. Aluminium and concrete structures are relatively young structure compared to composite steel and concrete structure. Aluminium structures have a lot of advantages. They are recyclable and resistant to corrosion. The composite aluminium and concrete structures are more durable than the composite steel and concrete structures. However, there is possible corrosion at the interface of aluminium and steel. Therefore, the aluminium beam should be isolate from the steel sheet using spacers. However, the use of spacers such as elastomeric reduces the effect of friction. The article evaluated influence of the friction on the bearing capacity of the beam and possibility to not include friction in the evaluation load bearing capacity of the composite beam. The model of composite aluminium and concrete beam was prepared. The model consisted of an aluminium I – beam, a reinforcement plate, shear connectors and a steel sheet. From the numerical calculations obtained that the effect of friction on the bearing capacity of bending is negligible. Therefore, spacers may be used. Laboratory tests of composite aluminium and concrete beam and a test of shear connectors are planned.

Keywords: aluminium and concrete composite beam, numerical analysis

Przesłano do redakcji: 06.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.67

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 393-401

Izabela SKRZYPCZAK[1]
Lidia BUDA-OŻÓG[2]
Marta SŁOWIK[3]

TRWAŁOŚĆ JAKO POSTULAT ROZWOJU ZRÓWNOWAŻONEGO

Niekontrolowana degradacja obiektów i związane z nią rosnące koszty na remonty i renowacje oraz przedwczesne rozbiórki to nie tylko problem techniczny, ale i ekonomiczny. Znaczna część problemów trwałości konstrukcji wynika z różnic w prowadzeniu budowy i produkcji beton. Na trwałość wpływają warunków dojrzewania oraz jakości wykonania. W związku z tym, bardzo ważne jest opracowanie ulepszonej podstawy oceny trwałości konstrukcji z betonu, a więc szacowania trwałości kontrolowanej. Trwała konstrukcja powinna przez cały projektowy okres użytkowania spełniać wymagania ze względu na stany graniczne nośności oraz stany graniczne użytkowalności bez istotnego obniżenia przydatności lub nadmiernych, nieprzewidzianych kosztów utrzymania. Wymaganą ochronę konstrukcji należy ustalać, biorąc pod uwagę planowane zastosowanie, projektowy okres użytkowania, program utrzymania oraz oddziaływania. W niniejszym artykule, omówiono aktualne zalecenia dotyczące oceny trwałości konstrukcji z betonu. Porównano zalecenia zaproponowane w PN-EN-1992, PN-EN-1990, PN-EN 206-1 oraz MC 2010. Zaproponowano formułę do oceny trwałości poszczególnych elementów konstrukcyjnych oraz całej konstrukcji w odniesieniu do oddziaływania środowiska. Konstrukcja z betonu może być uznana za wystarczająco trwałą, jeżeli poszczególne części poddawane badaniu wykazują wyższe wartości współczynników trwałości od współczynników środowiska. Ocena trwałości może być przeprowadzona w dwóch etapach. Pierwszy etap może zostać przeprowadzony, kiedy konstrukcja jest wykonywana. Drugi etap kiedy wykonanie rzeczywistej konstrukcji nie jest zgodne z planem budowy. Analizując trwałości materiałów zwrócono uwagę na trzy aspekty: trwałość kontrolowaną, przebadaną i projektowaną.

Słowa kluczowe: konstrukcje betonowe, trwałość, oddziaływanie środowiska

---

[1] Autor do korespondencji: Izabela Skrzypczak, Politechnika Rzeszowska, ul Poznańska 2, izas@prz.edu.pl

[2] Lidia Buda-Ożóg, Politechnika Rzeszowska, ul Poznańska 2, lida@prz.edu.pl

[3] Marta Słowik, Politechnika Lubelska, ul Nadbystrzycka 40, m.slowi@pollub.pl

1. Wprowadzenie

Przez wiele lat trwałość konstrukcji betonowych i żelbetowych była traktowana marginalnie, a niekontrolowana degradacja obiektów i związane z nią rosnące koszty na remonty i renowacje oraz przedwczesne rozbiórki to nie tylko problem techniczny, ale i ekonomiczny. Zaistniała sytuacja to również nieracjonalne wykorzystanie zasobów naturalnych, a tym samym problem środowiskowy. W celu zmniejszenia skutków omawianego zjawiska, wiele prac badawczych na temat trwałości konstrukcji zostało przeprowadzonych w ostatnich latach, a rezultaty włączone do aktualnych zaleceń normowych.

Znaczna część problemów trwałości konstrukcji wynika z różnic w prowadzeniu budowy i produkcji betonu, uzależniona jest od warunków dojrzewania oraz jakości wykonania. Czynniki te mogą zanegować wszystkie potencjalne korzyści płynące z lepszych specyfikacji materiałowych i dobrego projektu.

W związku z tym, bardzo ważne jest opracowanie ulepszonej podstawy oceny trwałości konstrukcji z betonu, a więc szacowania trwałości kontrolowanej. W niniejszym artykule, omówiono aktualne zalecenia w ocenie trwałości konstrukcji z betonu, jak również zaproponowano formułę oceny trwałości konstrukcji i materiałów budowlanych w odniesieniu do oddziaływania środowiska.

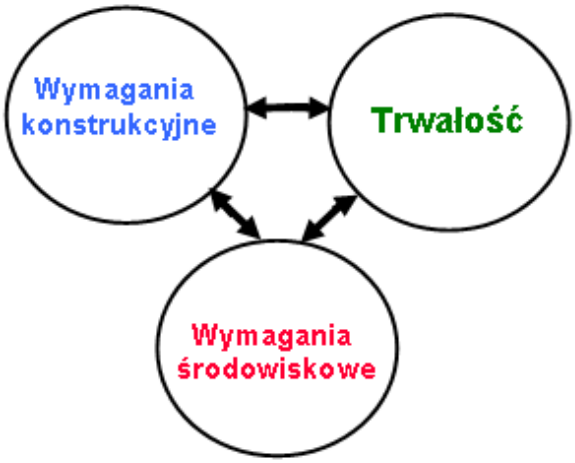
2. Trwałość a zalecenia normowe

Obiekty inżynierskie należy zaprojektować i wykonać tak, aby w przyjętym okresie użytkowania i poziomie utrzymania była zapewniona ich trwałość, rozumiana jako zdolność użytkowania obiektu przy zachowaniu cech wytrzymałościowych i eksploatacyjnych, których miernikiem są stany graniczne nośności oraz stany graniczne użytkowalności. Przyjęty okres użytkowania, odnoszący się do trwałości obiektów inżynierskich, może dotyczyć:

- całego obiektu – jako średnia trwałość podstawowych elementów, które nie podlegających okresowej wymianie,
- podstawowych elementów obiektu, tj. podpór, dźwigarów i pomostu,
- elementów podlegających okresowej wymianie.

Projektowanie na trwałość to spełnienie wymagań podstawowych i użytkowych. Konstrukcje należy w taki sposób projektować, aby zmiany następujące w projektowym okresie użytkowania, z uwzględnieniem oddziaływań środowiska i przewidywanego poziomu utrzymania, nie obniżały właściwości użytkowych konstrukcji poniżej zamierzonego poziomu (Rys. 1).

W celu zapewnienia odpowiedniej trwałości konstrukcji zaleca się uwzględniać: zamierzone lub przewidywane użytkowanie konstrukcji, wymagane kryteria projektowe, oczekiwane warunki środowiskowe, skład, właściwości i zachowanie się materiałów i wyrobów, właściwości gruntu, rodzaj ustroju konstrukcyjnego, kształt elementów i szczegóły konstrukcyjne, jakość wykonania i poziom kontroli, szczególne środki zabezpieczające, zamierzone utrzyma-



Rys.1. Schemat projektowania zintegrowanego

Fig.1. Scheme of integrated design

nie w projektowym okresie użytkowania. Zalecenia te stanowią jedynie podstawę do wstępnych uzgodnień projektanta z inwestorem. Nie stanowią one konkretnych wskazówek ilościowych, ani jakościowych do założeń projektowych. Na etapie projektowania należy określić warunki środowiskowe, tak aby można było ocenić ich znaczenie z uwagi na trwałość i podjąć odpowiednie środki w celu ochrony materiałów stosowanych w konstrukcji. Na podstawie obliczeń, badań doświadczalnych oraz doświadczenia zebranego z wcześniejszych realizacji można określić przewidywany stopień deterioracji całej konstrukcji oraz jej elementów.

Podstawowe zalecenia dotyczące projektowania ze względu trwałość można znaleźć w rozdział 4 Eurokodu 2[1], Eurokodu 0 [2] i normy PN-EN 206-1 [3]. Trwała konstrukcja powinna przez cały projektowy okres użytkowania spełniać wymagania ze względu na użytkowalność, nośność i stateczność, bez istotnego obniżenia przydatności lub nadmiernych, nieprzewidzianych kosztów utrzymania. Wymaganą ochronę konstrukcji należy ustalać, biorąc pod uwagę planowane zastosowanie, projektowy okres użytkowania, program utrzymania oraz oddziaływania. Należy rozpatrzyć potencjalną rolę oddziaływań bezpośrednich i pośrednich warunków środowiska. Należy uwzględnić ochronę stali przed korozją poprzez odpowiedni stopień zagęszczenia zbrojenia, jakość i grubość otuliny betonowej czy kontrolowane zarysowanie. Zagęszczenie i jakość otulenia osiąga się, kontrolując maksymalny współczynnik wodno-cementowy i minimalną zawartość cementu [3], które mogą być związane z minimalną klasą betonu. Wystawione na działanie środowiska elementy metalowe, które mogą podlegać przeglądom i wymianie, można zabezpieczać powłokami ochronnymi. W innych przypadkach należy je wykonywać z materiału odpornego na korozję. W szczególnych przypadkach, należy wziąć pod uwagę wymagania dodatkowe (dla kon-

strukcji o charakterze tymczasowym lub monumentalnym, konstrukcji poddanych oddziaływaniom wyjątkowym itd.) [5, 7].

W Eurokodzie 2 cz. 1-1 [1] wskazano szczegółowe zalecenia związane z uwzględnieniem trwałości w projektowaniu. W Załączniku E podano minimalne klasy wytrzymałości betonu ze względu na trwałość, odniesione do klas ekspozycji, podano minimalne otulenie wymagane ze względu na trwałość $c_{min-dur}$, odpowiednio dla stali zbrojeniowej i dla stali sprężającej, podano wymagane dodatki otuliny oraz możliwe redukcje otuliny związane z klasą konstrukcji oraz ewentualnym stosowaniem dodatkowych zabezpieczeń (np. powlekanie betonu, stal nierdzewna) [1, 7].

Przy projektowaniu można odnieść się również do pomocniczej tablicy *Zalecane wartości graniczne dla składu i właściwości betonu* w normie PN-EN 206-1 [3] , w której zawarto zalecenia w odniesieniu do minimalnej klasy wytrzymałości, maksymalnego stosunku w/c, minimalnej zawartości cementu w mieszance dla poszczególnych klas ekspozycji (w tym klas XF dotyczących zamrażania/odmrażania) oraz minimalnej zawartości powietrza w przypadku klas ekspozycji XF.

Problematyka trwałości w normie Model Code 2010 [4] odniesiona jest do: projektowanego okresu użytkowania w przypadku projektowania nowych konstrukcji, pozostałego okresu użytkowania w przypadku konstrukcji istniejących, wzmacnianych, remontowanych lub modernizowanych. Problematykę trwałości w MC 2010 [4] ograniczono do podejścia uznanego za wystarczające oraz unikania zniszczenia. Wymagania szczegółowe do projektowania, doboru materiałów i wykonawstwa powinny być określone jednym z dwóch sposobów: na podstawie statystycznej oceny wyników eksperymentalnych i obserwacji polowych, na podstawie kalibracji danych z wieloletniego doświadczenia.

Podejście oparte na „unikaniu zagrożenia" w zakresie projektowania na trwałość wymaga wykazania, że proces zniszczenia nie zajdzie w wyniku takich zabiegów jak: odizolowanie konstrukcji od oddziaływań środowiska, stosowanie niereaktywnych, oddzielenie od czynników reaktywnych, np. utrzymanie stopnia zawilgocenia poniżej poziomu krytycznego, przeciwdziałanie szkodliwym reakcjom, np. za pomocą metod elektrochemicznych.

W celu weryfikacji trwałości w MC 2010 [4] zaproponowano cztery metody: pełne podejście probabilistyczne, podejście półprobabilistyczne - częściowe współczynniki, podejście „uznane za wystarczające", podejście „unikanie zniszczenia". Zagadnienie doboru otuliny zbrojenia w MC2010 [4] ujęto podobnie jak w Eurokodzie 2 [1], czyli wartości minimalne zależą od: wymagań technologicznych, przyczepności i zakotwienia, wymagań przeciwpożarowych, wymagań trwałości. W zakresie trwałości, minimalna otulina zależy od odporności betonu na wpływ substancji chemicznych w kombinacji z agresywnością środowiska oraz od projektowego okresu użytkowania konstrukcji. Wskazania szczegółowe w odniesieniu do otuliny ograniczono do przykładowej tablicy dla betonów klasy co najmniej C20/25 i okresu użytkowania 50 lat. Zalecono ogól-

nie, aby dla okresu użytkowania 100 lat powiększyć otulinę odpowiednio o 30%. Zalecenia zawarte w [4] są znacznie mniej precyzyjne niż te zawarte w Eurokodzie 2 [1] oraz w komentarzach np. [6].

Podejście „unikanie zniszczenia" jest spełnione, gdy stan depasywacji nie może wystąpić w wyniku trwałej odporności na karbonatyzację, albo gdy oddziaływanie środowiska jest wyeliminowane, albo ma miejsce trwała odporność zbrojenia na korozję [7]. W MC2010 [4] wprowadzono problematykę „zarządzania cyklem istnienia konstrukcji" *(Life Cycle Management)* za pomocą dwóch dokumentów dla konstrukcji. Pierwszy z nich to dokumentacja okresu powstania obiektu *(„As-Built Documentation")*, zakończona „certyfikatem narodzin" *(Birth Certificate Document - BCD)*, zawierającym wyniki wstępnego przeglądu nowej konstrukcji. Drugi dokument to dokumentacja okresu użytkowania *(Service-Life File)*, zawierająca rejestrację wszystkich działań podejmowanych w okresie użytkowania oraz warunków użytkowania, a w przypadku wykonania poważniejszych prac remontowych uzupełniona „certyfikatem ponownych narodzin" *(Re-Birth Certificate Document - RCD).*

3. Trwałość

W celu określenia trwałości kontrolowanej zaproponowano formułę do oceny trwałości konstrukcji i materiałów budowlanych w odniesieniu do oddziaływania środowiska. Trwałość poszczególnych elementów konstrukcji betonowych można sprawdzić, zgodnie z poniższą nierównością, w której współczynnik trwałości (W_T), powinien być nie mniejszy niż współczynnik środowiska ($W_Ś$).

$$W_T > W_Ś \tag{1}$$

Zaproponowane równanie (1) zastosować można do oceny trwałości poszczególnych elementów konstrukcyjnych, jak i całej konstrukcji. Konstrukcja z betonu może być uznana za wystarczająco trwałą, jeżeli poszczególne części poddawane badaniu wykazują wyższe wartości współczynników trwałości od współczynników środowiska. Ocena trwałości może być przeprowadzona w dwóch etapach. Pierwszy etap może zostać przeprowadzony, kiedy konstrukcja jest wykonywana. Na tym etapie czynniki w odniesieniu do materiałów i prac budowlanych można przyjmować do weryfikacji założeń i obliczeń projektowych. Drugi etap, równanie nie jest spełnione w pierwszym etapie, wykonanie rzeczywistej konstrukcji nie jest zgodne z planem budowy. Na tym etapie, dane dotyczące szczegółów konstrukcyjnych, jakości materiałów i warunków prac budowlanych są niezbędne do poprawy ich trwałości.

Trwałość obiektu budowlanego składającego się z szeregu pojedynczych elementów konstrukcyjnych, w którym zniszczenie jednego elementu powoduje awarię całej konstrukcji można wyznaczyć z zależności:

$$W_T = \cup_{i=1}^{n}(W_i) \tag{2}$$

Jeżeli elementy w modelu (konstrukcji) są w pełni skorelowane to prawdopodobieństwo zniszczenia na n- elementów jest równe prawdopodobieństwu zniszczenia najbardziej narażonego na oddziaływanie środowiska elementu:

$$W_T = \max_i[W_i] \tag{3}$$

Natomiast dla elementów, które nie są w pełni skorelowane i nie są rozłączne to prawdopodobieństwo awarii można tylko oszacować. Cornell [8] dla systemów szeregowych proponuje następujące oszacowanie prawdopodobieństwa awarii:

$$\max_i[W_i] \le W_T \le \sum_i[W_i] \tag{4}$$

Poszczególne wskaźniki trwałości i środowiska można obliczyć korzystając z poniższej formuły (5):

$$W_i = \frac{1}{n} W_1 W_2 W_3 ... W_n \left(w_1 + w_2 + w_3 + ... + w_n\right) \tag{5}$$

$$0 \le W_i \le 1; \quad W_j = 1 \quad \text{lub} \quad 0; \quad 0 \le w_i \le 1 \tag{6}$$

gdzie: W_i- wskaźnik trwałości lub środowiska obliczony jako liczba z przedziału [0,1],

$W_1, W_2, W_3, ...W_n$ – zdeterminowane wartości krytycznych parametrów analizowanego wskaźnika,

$w_1, w_2, w_3, \ w_n$ – wartości parametrów sterowalnych (kontrolowanych).

Wzór (5) składa się z członu multiplikatywnego i addytywnego. Każdy z nich pełni odmienną funkcję.

Rolą członu multiplikatywnego jest umożliwienie rozróżnienia trwałości poszczególnych elementów konstrukcyjnych:

– elementu dobrego, którego stopień trwałości będzie określony na dalszym etapie oceny,
– elementu wadliwego, w stosunku, do którego nie przeprowadza się dalszej oceny.

Wartości W_j wchodzące w skład pierwszego członu odnoszą się do parametrów krytycznych. Parametry krytyczne to te, których zakres zmienności jest ściśle ograniczony. Mogą to być ograniczenia od dołu, od góry lub dwustronne. Charakterystyczną cechą wyróżników W_j jest to, że mogą przyjmować tylko dwie wartości 1 lub 0. Jeśli wartość parametru, którego dotyczy, mieści się w zakresie

zmienności dopuszczalnym przez odpowiednie przepisy, to W_j=1. Jeżeli parametr nie mieści się w dopuszczalnym przedziale zmienności, W_j przyjmuje wartość 0. Iloczynowa forma członu wzoru (5) sprawia, że wystarczy, aby jeden z parametrów krytycznych W_j równy był zero, a wówczas niezależnie od wartości pozostałych, wskaźnik trwałości W_T będzie równy zero. W takiej sytuacji konstrukcja będzie uznana za nie spełniająca wymagań w odniesieniu do trwałości bez potrzeby badania wartości pozostałych parametrów. Zadaniem członu addytywnego jest umożliwienie dalszego zróżnicowania trwałości. Konstrukcja wzoru i zastosowanie w drugim członie wzoru wielkości z przedziału [0,1] w_i umożliwia uwzględnienie ważności oraz specyfiki wpływu zmiany poszczególnych parametrów na ocenę trwałości.

Wyróżnienie parametrów krytycznych spośród ogółu parametrów oceny trwałości i wpływu środowiska jest umowne. Ma ono na celu wyodrębnienie parametrów szczególnie ważnych, o stosunkowo niewielkim przedziale zmienności i wyraźnie określonych granicach, które w żadnym wypadku nie mogą być przekroczone. Przekroczenie granic tolerancji przez parametr krytyczny nie może być kompensowane nawet najbardziej korzystnymi wartościami pozostałych parametrów oceny. Konstrukcja, której to dotyczy musi być uznana za nie spełniającą wymagań trwałości. Na przykład jeżeli nie spełnione są wymagania dotyczące rodzaju składników betonu lub otulenia zbrojenia. Parametr krytyczny dostarcza informacji o trwałości konstrukcji Parametr posiada dwa wyróżniki W_j oraz w_i. Mogą więc wystąpić trzy sytuacje kiedy:

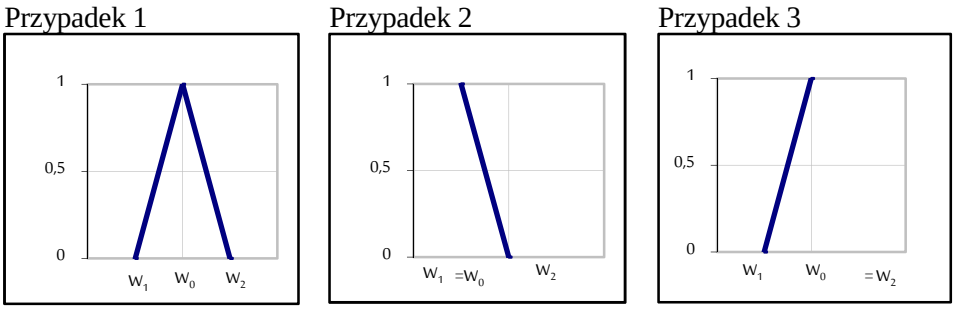
- parametr ma tylko jeden wyróżnik W_j,
- parametr ma dwa wyróżniki W_j oraz w_i,
- parametr ma tylko wyróżnik w_i.

Przypadek pierwszy dotyczy parametrów, których dopuszczalny przedział zmienności musi mieścić się w określonych granicach, przy czym dla oceny trwałości nie ma znaczenia w którym punkcie przedziału tolerancji znajdować się będą konkretne wartości tych parametrów.

Przypadek drugi dotyczy parametrów, których dopuszczalny przedział zmienności jest ściśle określony i nie jest obojętne, w którym punkcie dopuszczalnego przedziału zmienności znajdować się będą konkretne wartości parametrów w przedziale zmienności istnieje ognisko.

Przypadek trzeci dotyczy parametrów, które mają stosunkowo duże dopuszczalne przedziały tolerancji, o niezbyt wyraźnie określonych granicach i nie mogą być podstawą dyskwalifikacji ocenianej konstrukcji w odniesieniu do trwałości. Mają one swoje ognisko i wartości tych parametrów stanowią informację uzupełniającą dla określenia trwałości.

Przypadek pierwszy dotyczy sytuacji, kiedy przyrost wartości parametru w obrębie przedziału tolerancji zawsze wprowadza korzystną zmianę w poziomie trwałości. Wartość takiego parametru można opisać trójkątną liczbą rozmytą.



Rys. 2. Parametry jakości opisane liczbą rozmytą w = (W_0, W_1, W_2)

Fig. 2. Quality parameters described by diffuse number w = (W_0, W_1, W_2)

Punkt W_1 jest dolną granicą przedziału tolerancji. Punkt W_0 oznacza taką wartość parametru W_0, która w pełni spełnia wymagania stawiane parametrowi. Wartości większe od W_0 nie zmieniają już stanu trwałości konstrukcji. Przypadek drugi dotyczy sytuacji, kiedy przesunięcie w lewo lub w prawo od wartości optymalnej oznaczają zawsze niekorzystne zmiany poziomu trwałości. Przypadek trzeci dotyczy sytuacji, kiedy przyrostowi wartości parametru w całym przedziale tolerancji odpowiada obniżenie poziomu trwałości konstrukcji. Na osi poziomej punkt W_2 oznacza górną granicę tolerancji, punkt W_1 oznacza wartość parametru, od którego przyrostowi wartości W towarzyszyć będą korzystne zmiany poziomu trwałości konstrukcji. Liczba wyróżników W_j i w_i zależy od zakresu i dokładności przeprowadzanej oceny (im więcej parametrów tym bardziej kompleksowa ocena trwałości konstrukcji). Przedstawiony model stanowi jedynie koncepcję oceny poziomu trwałości konstrukcji. Jej celem jest umożliwienie oceny trwałości konstrukcji z zachowaniem jak największego stopnia obiektywności.

4. Wnioski

Projektowanie konstrukcji budowlanych obejmuje minimalizację wpływu środowiska na konstrukcję w całym okresie użytkowania, przy spełnieniu wymagań projektowania konstrukcyjnego i projektowania na trwałość. Projektowanie na trwałość to uwzględnienie przede wszystkim odporności konstrukcji na wpływy środowiskowe przekazywane na konstrukcję. W artykule zaproponowano formułę oceny trwałości konstrukcji i materiałów budowlanych w odniesieniu do oddziaływania środowiska. Analizując trwałość materiałów należy zwrócić uwagę na trzy aspekty: trwałość kontrolowaną, przebadana i projektowana. Projektując konstrukcje odnosimy się do projektowanego okresu użytkowania nie uwzględniając ryzyka ponoszenia dodatkowych kosztów na ewentualne nieprzewidziane remonty. Dlatego bardzo ważna jest kompleksowa analiza wpływu środowiska na trwałości poszczególnych elementów i całego obiektu budowlanego.

Literatura

[1] PN-EN 1992-1-1 Eurokod 2: Projektowanie konstrukcji z betonu. Część 1-1: Reguły ogólne i reguły dla budynków. PKN.

[2] PN-EN 1990 Eurokod 0: Projektowanie konstrukcji. PKN.

[3] PN-EN 206-1: 2003 Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność, PKN.

[4] Model Code 2010, First complete draft, *fib* Bulletin 56, Volume 1, March 2010.

[5] Ajdukiewicz A., Aspekty trwałości i wpływu na środowisko w projektowaniu konstrukcji betonowych, Przegląd Budowlany, 2/2011, s. 20-29.

[6] Czarnecki L.: Beton według normy PN-EN 206-1- komentarz- Praca zbiorowa, Polski Cement i PKN, Kraków, 2004.

[7] Kuliński M., http://warunkibudowlane.pl/?s=modulos&v=capitulo&c=15410.

[8] Nowak A.S, Collins K.R: Reliability of Structures. McGraw-Hill Higher Education, 2000.

DURABILITY AS A POSTULATE OF SUSTAINABLE DEVELOPMENT

S u m m a r y

An uncontrolled degradation of structures and costs of repairs and renovations as well as a premature demolition connected with this degradation, is not only a technical but also an economical issue. A large part of the durability problem is due to differences between concrete construction and production. The durability of concrete structures depends on quality of conformance and maturation conditions. So it is very important to develop the improved base for estimation concrete structure durability, and thus to estimate the controlled durability. Durable structures should meet the requirements due to ultimate and serviceability limit states without a significant reduction of reusability or excessive, unforeseen costs of conservation. The required design protection should be determined taking into account the intended use, the useful life of the design, maintenance and impacts. In the paper, the current recommendations for the evaluation of concrete structures durability are discussed. The recommendations proposed in the PN-EN-1992, PN-EN-1990, PN-EN 206-1 and MC 2010 have been than compared. The formula for estimating the whole structure durability and durability of building materials has been proposed according to the influence of environment. Concrete structure can be considered as sufficiently stable when every tested part shows higher values of durability compared to environmental values. Durability assessment can be carried out in two stages. The first stage can be carry out, when the structure is under construction and the second stage when the execution of the real structure disagrees with the construction plan. When analising the materials durability, the authors have paid the attention on three aspects: controlled, tested and designed durability.

Keywords: concrete structures, influence of environment, durability

Przesłano do redakcji: 10.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.68

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 403-408

Izabela SKRZYPCZAK[1]
Wanda KOKOSZKA[2]

ZRÓWNOWAŻONE METODY OCENY ZGODNOŚCI WYTRZYMAŁOŚCI BETONU NA ŚCISKANIE

Artykuł prezentuje koncepcję weryfikacji jakości betonu konstrukcyjnego z zastosowaniem metod rozmytych. Nawiązuje do metod normowych i ukazuje ich nieścisłości. W normach projektowania konstrukcji betonowych lub żelbetowych wszystkie właściwości mechaniczne betonu są skorelowane z wytrzymałością charakterystyczną na ściskanie f_{ck}. Założenie, że wytrzymałość betonu jest wielkością losową oznacza, że możemy ją jednoznacznie zdefiniować i doświadczalnie sprawdzić, a rozważana wielkość stanowi określoną frakcję ogólną liczby wyników badań. Zakres w jakim te warunki są spełnione jest dyskusyjny. Zalecane normowe kryteria zgodności oraz procedury oceny wytrzymałości betonu i weryfikacji zgodności wytwarzanego betonu z wymaganiami stawianymi projektowanym klasom betonów w wielu przypadkach prowadzą do podejmowania niewłaściwych decyzji i strategii produkcji. Metody rozmyte stanowią propozycję wykorzystania metod alternatywnych do klasyfikacji betonu towarowego dla potrzeb konstrukcji inżynierskich, w tym obiektów budownictwa energetycznego, gdzie problem jakości materiału konstrukcyjnego jest szczególnie mocno związany z bezpieczeństwem ich użytkowania. Metody te w pełni wpisują się w ideę budownictwa zrównoważonego. Przypadkowe zaniżenie klasy betonu skutkuje odrzuceniem danej partii przez odbiorcę. Taka nienadająca się do wbudowania mieszanka betonowa jest wówczas traktowana jako odpad budowlany stojąc w sprzeczności z zasadami racjonalnego wykorzystania materiałów budowlanych i surowców mineralnych. Proponowana koncepcja weryfikacji jakości pozwala na zminimalizowanie ryzyka nieprawidłowego zaklasyfikowania partii betonu, czyli przypadkowego zawyżenia bądź zaniżenia jego klasy.

Słowa kluczowe: beton konstrukcyjny, wytrzymałość na ściskanie, jakość, zbiory rozmyte

1. Wstęp

Niepewności związane z oceną i klasyfikacją wytrzymałości betonu mają rozmyty, nielosowy charakter. Typową sytuacją, kiedy należy uwzględnić niepewność rozmytą jest ocena zgodności wytrzymałości betonu. Normowe kryte-

[1] Autor do korespondencji: Izabela Skrzypczak, Politechnika Rzeszowska, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów, tel. +48 17 8651010, izas@prz.edu.pl

[2] Wanda Kokoszka, Politechnika Rzeszowska, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów, tel. +48178651306, wandak@prz.edu.pl

ria zgodności zalecane w PN-EN 206-1 [1] wykazują liczne wady [2,3]. Fakt ten jest powodem poszukiwania alternatywnych, rozmytych metod weryfikacji jakości betonu. W artykule przedstawiono w skrócie podstawowe pojęcia teorii zbiorów rozmytych oraz sformułowano procedurę weryfikacji jakości partii betonu do poszczególnych klas opartą na aproksymacji funkcji przynależności dla analizowanych klas betonu, wyznaczonych metodą rozmytą na podstawie zbudowania rozkładów brzegowych. Do analiz wykorzystano metodę symulacji losowej Monte Carlo oraz teorię zbiorów rozmytych.

2. Podstawy teorii zbiorów rozmytych

Jednym ze sposobów definiowania zbioru rozmytego jest wyznaczanie zbioru *A* za pomocą funkcji charakterystycznej. W teorii zbiorów rozmytych, funkcja charakterystyczna przyporządkowuje każdemu *x* z obszaru rozważań *X* wartość z przedziału [0; 1], a nie jak w przypadku zbiorów ostrych z dwuelementowego zbioru {0; 1}. Funkcja:

$$A=[(\mu_A(x), x] \quad \mu_A: X \rightarrow [0; 1] \tag{1}$$

nazywana jest funkcją przynależności. Jej wartość dla danego *x* interpretuje się jako stopień, w jakim *x* należy do zbioru rozmytego. Każdy element *x* z obszaru rozważań *X* należy do zbioru rozmytego *A* zdefiniowanego w tym obszarze zpewnym stopniem przynależności (stopniem zaufania) określonym przez $\mu_A(x)$. Relacja przynależności elementu *x* do zbioru *A* może przyjąć jedną z postaci funkcji, które dzielone są na liniowe i nieliniowe. W praktyce stosuje się tylko kilka typów funkcji, głównie liniowych [3].

3. Niepewności związane z oceną wytrzymałości

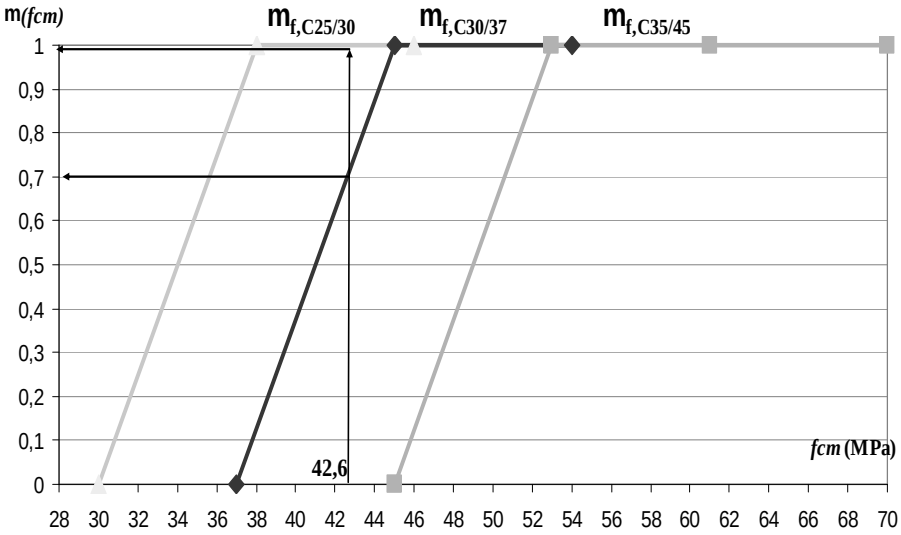
Wyniki oceny zgodności wytrzymałości betonu na ściskanie można uznać za zdarzenia losowe, a kryteria zgodności za wielkości o rozmytych granicach. Kryteria zgodności, na podstawie których dokonuje się oceny jakości betonu mogą mieć charakter prawdopodobieństwa z jakim zdarzenie losowe znajdzie się w obszarze o rozmytych granicach (wg Zadeha) lub liczby rozmytej (o znanej funkcji przynależności, odpowiadającej prawdopodobieństwu, że zdarzenie będzie należało do pewnego przedziału (wg Yagera).

Normowe podwójne kryterium zgodności wytrzymałości betonu na ściskanie można zapisać za pomocą zbioru rozmytego zgodnie z formułą (2):

$$f_c = [\mu_{f_C}(x), x], \ \ \mu_f : X \rightarrow [0,1] \tag{2}$$

Gdzie: $\mu_{f_C}(x)$ jest funkcją przynależności przyporządkowującą każdemu elementowi zbioru wytrzymałości $x \in X$ stopień przynależności do zbioru rozmytego f_c z przedziału [*0,1*].

Decyzja o zaliczeniu rozważanej partii betonu do projektowanej klasy zależy, z reguły, od spełnienia warunku narzuconego na wytrzymałość średnią z próby f_{cm}. Sporadycznie warunkiem decydującym jest ograniczenie wytrzymałości minimalnej w próbie f_{ci} [2,3]. Statystyczne kryteria zgodności wykazują wady, dlatego definiując funkcje przynależności do poszczególnych klas można odnieść się do zaleceń normowych oraz wiedzy eksperckiej. W bezpośredniej rozmytej metodzie kryteria zgodności są "wirtualnym ekspertem", dla których funkcje przynależności można zdefiniować kierując się zaleceniami normowymi m.in.: poziom kwantyla dla f_{ck} na poziomie 0,05 [1] lub formułą dla średniej $f_{cm}=f_{ck}+8$ [4].



Rys. 1. Funkcje przynależności do poszczególnych klas dla rozważanej klasy betonu C30/37 i klas sąsiednich

Fig. 1. Functions of membership to respective classes for the considered concrete class C30/37 and neighboring classes

Kierując się zaleceniami normowymi zaproponowano przykładowe funkcje dla sklasyfikowania partii betonu o wytrzymałości średniej z próby 42,6 MPa. Na podstawie warunku normowego $\overline{x}_n \geq f_{ck} + 4$ oraz wyznaczonych na podstawie zaleceń normowych funkcji przynależności (rys.1) można stwierdzić, że partie betonu, dla których wytrzymałość z próby wynosi 42,6 MPa można ze stopniem pewności 0,70 zaliczyć do klasy C30/37 lub ze stopniem pewności 1,0 do klasy betonu C20/25. Decyzja ta może być mniej lub bardziej ostrożna, w zależności od jakości produkowanego betonu oraz jej wpływu na zapewnienie bezpieczeństwa realizowanych konstrukcji.

4. Rozkłady brzegowe, aproksymacja funkcji przynależności

W celu wyznaczenia funkcji przynależności dla rozważanych trzech sąsiednich klas zastosowano metodę rozmytą opartą na rozkładach brzegowych [4]. Pierwszym etapem metody rozmytej jest wyznaczenie parametrów rozkładów brzegowych; dlatego zdefiniowano zmienne losowe ξ i η. Zmienna ξ reprezentuje punkt rozdziału wartości wytrzymałości średniej betonu dla rozważanej i niższej klasy betonu, a η punkt rozdziału rozważanej i wyższej klasy betonu. Założono, że para (ξ, η) jest dwuwymiarową, normalną zmienną losową, dla której można wyznaczyć rozkłady brzegowe $p_{\xi}(f_{cm})$ i $p_{\eta}(f_{cm})$ zmiennych losowych $\xi \rightarrow N(m_{\xi},\sigma_{\xi})$ i $\eta \rightarrow N(m_{\eta}, \sigma_{\eta})$. Dysponując funkcjami przynależności wytrzymałości średniej betonu na ściskanie dla różnych klas betonu, można określić stopień przynależności wartości rozważanej partii betonu do różnych klas. W zależności od wartości $\mu_C(f_{cm})$ można podjąć decyzję o zaliczeniu partii betonu do odpowiedniej klasy.

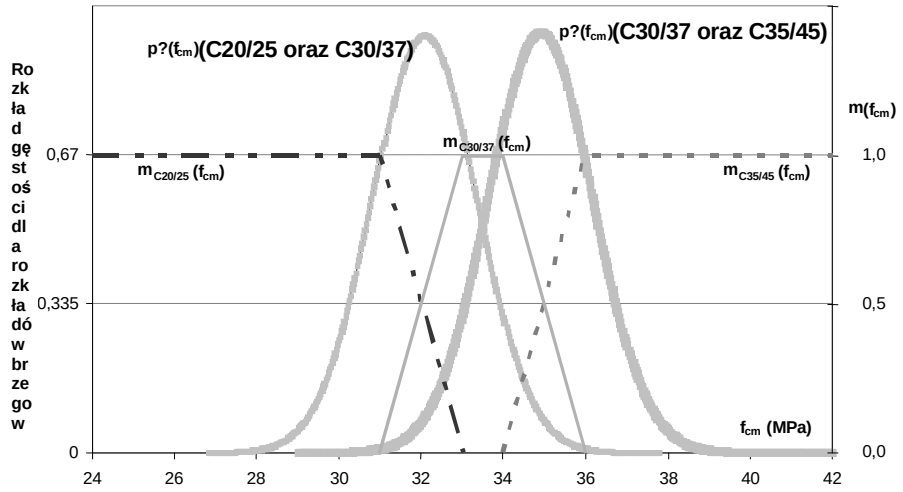
5. Przykład zastosowania rozmytych kryteriów zgodności

Normowe podwójne kryterium zgodności wytwarzanej partii betonu z projektowaną klasą dla próby o liczebności n=3 można zapisać w postaci (3):

$$\left.\begin{aligned} f_{cm} &\geq f_{ck} + 4 \\ f_{ci} &\geq f_{ck} - 4 \end{aligned}\right\} = C \tag{3}$$

Charakterystyka testowa C jest wielkością rozmytą o funkcji przynależności $\mu_C(f_{cm})$, którą można wyznaczyć dla określonych klas betonu na podstawie rozkładów brzegowych oraz zdefiniowanych funkcji przynależności. Dla normowych kryteriów zgodności zalecanych w [1] wykonano obliczenia generując 100000 grup liczb losowych o liczebności $n=3$ zgodnych z rozkładem normalnym, losując klasę betonu (beton trzech sąsiednich klas C_{i-1}, C_i, C_{i+1} -jednakowe prawdopodobieństwo wyboru 1/3), odchylenie standardowe oraz wadliwość. Do generowania liczb losowych o standardowym rozkładzie normalnym posłużono się metodą Monte Carlo. Zbudowano tablicę funkcji rozkładu prawdopodobieństwa wektora losowego (ξ, η) i wyznaczono histogram rozkładów brzegowych, sumując wiersze i kolumny: pierwszy (suma wierszy)- klasyfikując według rozważanej i niższej klasy betonu, drugi (suma kolumn) klasyfikując według rozważanej i wyższej klasy betonu. Wykresy funkcji gęstości rozkładów brzegowych prawdopodobieństwa $p_{\xi}(f_{cm})$ i $p_{\eta}(f_{cm})$ były podstawą wyznaczenia funkcji przynależności wytrzymałości średniej betonu na ściskanie do poszczególnych klas betonu [3]. Na podstawie przeprowadzonej symulacji dla betonu klasy C30/37, generując 100000 grup liczb losowych o liczebności $n=3$ zgodnych z rozkładem normalnym oszacowano funkcje gęstości rozkładów brzegowych oraz rozmyte funkcje przynależności wytrzymałości średniej betonu na ściskanie do poszczególnych klas betonu (trzech sąsiednich klas betonu).

Rozważania przeprowadzono dla betonu klasy C30/37 uzyskując następujące oceny parametrów rozkładu brzegowego zmiennej losowej $\xi \rightarrow N(m_\xi, \sigma_\xi)$, tzn. punkt rozdziału dla betonu klasy C20/25 oraz C30/37, $m_\xi = 32{,}02$ MPa oraz $\sigma_\xi = 3{,}31$ MPa. Parametry rozkładu brzegowego zmiennej losowej $\eta \rightarrow N(m_\eta, \sigma_\eta)$ punktu rozdziału dla betonu klasy C30/37oraz C35/45, oszacowano jako $m_\eta = 34{,}88$ MPa i $\sigma_\eta = 2{,}17$ MPa.



Rys. 2. Funkcje przynależności do poszczególnych klas oraz funkcje gęstości rozkładów brzegowych dla rozważanej klasy betonu C30/37 i klas sąsiednich

Fig. 2. Functions of membership to respective classes and density functions of marginal distribution for the considered concrete class C30/37 and neighboring classes

Funkcje gęstości nachodzą na siebie co świadczy o zbyt dużej liczbie klas proponowanych przez normę, co utrudnia jednoznaczne zakwalifikowanie do poszczególnych klas. Na podstawie wyznaczonych funkcji przynależności można stwierdzić, że partie betonu dla których wytrzymałość średnia z próby mieści się w przedziale od 32,8 MPa do 33,9 MPa można bez wątpliwości zaliczyć do klasy C30/37. W przypadku, gdy partie betonu mają średnią wytrzymałość na ściskanie z przedziału (32;32,8) MPa to produkowany beton można na pewno zaliczyć do betonu klasy C20/25 lub ze stopniem zaufania odpowiednio od 0,5 do 1,0 do klasy betonu C30/37. W sytuacji, gdy średnia wytrzymałość w partii betonu należy do przedziału od 33,8 do 35,0 MPa można ją zakwalifikować bez wątpliwości do klasy C30/37 lub ze stopniem pewności od 0,0 do 0,5 do klasy C35/45.

6. Wnioski

Metoda rozmyta zastosowana do klasyfikacji betonu wykazała, że obecnie obowiązująca normowa klasyfikacja betonu zawiera zbyt wiele klas betonu o rozkładach w dużej mierze nachodzących na siebie. Oznacza to, że stosowane kryteria normowe są "mało czułe" i mogą prowadzić do przypadkowego zaniże-

nia lub zawyżenia klasy betonu. Ma to szczególne znaczenie w przypadku betonowych konstrukcji obiektów przemysłowych takich jak silosy, kominy, mosty, energetyczne budowle wodne oraz fundamenty urządzeń energetycznych. Klasyfikacja zastosowanego (wbudowanego) betonu ma poważny wpływ na niezawodność, trwałość i bezpieczeństwo eksploatacyjne tego typu konstrukcji. Metody rozmyte umożliwiają uwzględnienie niekiedy przeciwstawnych wymagań bezpieczeństwa, jakości, ekonomii, ekologii. Uwzględnienie powyższych wymagań jest możliwe poprzez ustalenie stopnia przynależności mniejszego od jedności dla rozważanej klasy betonu.

Literatura

[1] PN-EN 206-1: 2003. Beton. Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność, PKN.
[2] I. Skrzypczak, Sz. Woliński, Influence of distribution type on the probability of acceptance of conformity criteria for concrete strength, Archives of Civil Engineering 53, 3, 2007, s. 479-495.
[3] I. Skrzypczak I., Analiza kryteriów oceny jakości betonu oraz ich wpływu na ryzyko producenta i odbiorcy, Oficyna Wydawnicza PRz, Rzeszów 2013.
[4] PN-B-03264: 1999 Konstrukcje betonowe, żelbetowe i sprężone. Obliczenia statyczne i projektowanie.

SUSTAINABLE METHODS OF CONFORMITY ASSESSMENT OF THE CONCRETE COMPRESSIVE STRENGTH

S u m m a r y

The article presents the concept of concrete quality verification with use of fuzzy methods. It refers to the code methods and shows inaccuracies od them. designing codes of concrete or reinforced concrete structures all concrete mechanical properties are correlated with the characteristic compressive strength f_{ck}. The assumption that concrete strength is a random quantity, means that we can define it clearly and verify empirically, and the considered quantity is a specified fraction of the total number of tests results. The range including fulfillment of these conditions is questionable. Recommended normalized compliance criteria, procedures of the strength evaluation and verification of compliance of produced concrete with designed concrete class in many cases lead to wrong decisions and improper production strategies Fuzzy methods are proposal of alternative methods application for the classification of ready-mixed concrete for needs of civil engineering structures, including power constructions, where the problem of the material quality is strongly related to their safety. These methods are fully matched with the idea of sustainable construction. Accidental understating class concrete results in rejection of the lot by the recipient. Such unsuitable for building concrete mix is then treated as a waste and is in contradiction with the principles of rational use of building materials and mineral resources. The proposed concept of concrete quality verification allows to minimize the risk of incorrect classification of concrete batch and prevents overstatement or understating of the class.

Keywords: structural concrete, compressive strength, quality, fuzzy sets

Przesłano do redakcji: 10.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.69

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 409-418

Krzysztof SORNEK[1]
Mariusz FILIPOWICZ[2]
Krzysztof IZDEBSKI[3]

BADANIE WYBRANYCH PARAMETRÓW PRACY PROTOTYPOWEGO SYSTEMU CHP MAŁEJ SKALI Z KOTŁEM NA BIOMASĘ

Niniejszy artykuł przedstawia możliwości wykorzystania kotłów na biomasę do budowy systemów skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej w rozwiązaniach małej i mikro skali. Podstawowym celem prowadzonych badań jest konstrukcja prototypowej jednostki kogeneracyjnej, mogącej współpracować z kotłami na słomę i inną biomasę o mocy cieplnej z zakresu 35-500 kW_{th}, stworzenie algorytmu sterowania, a także opracowanie wytycznych do wykonania dedykowanej konstrukcji kotła. W tym celu prowadzone są pomiary wybranych parametrów pracy pierwszej wersji systemu kogeneracyjnego, w tym pomiary wielkości ciepła wysokotemperaturowego, możliwego do uzyskania przy użyciu specjalnie zaprojektowanego wymiennika olejowego umieszczonego w komorze dopalania kotła, a także pomiary wielkości ciepła możliwego do odebrania przez obieg czynnika niskowrzącego. W pierwszym etapie badań rozruchowych instalacji, zamiast czynnika niskowrzącego, stosowana jest woda oraz prostej konstrukcji silnik parowy, napędzany parą wodną, wytworzoną w płaszczu wymiennika płaszczowo-rurowego, wskutek odebrania ciepła od gorącego oleju. W dalszym etapie prac zastosowany zostanie specjalnie zmodyfikowany silnik, który pozwoli zastąpić drogą mikroturbinę parową o stosunkowo niskiej sprawności. Wyniki wstępnych badań pozwalają określić charakter pracy instalacji w zależności od jej konkretnej konfiguracji, a jednocześnie potwierdzają zasadność prowadzenia dalszych prac badawczo-rozwojowych, które pozwolą na uzyskanie finalnego produktu, dedykowanego do szerokiego spektrum zastosować w małej i mikro skali.

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, biomasa, kogeneracja, energetyka rozproszona, mikroźródła

---

[1] Autor do korespondencji: Krzysztof Sornek, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. 600 313 157, e-mail: krzysztof.sornek@agh.edu.pl

[2] Mariusz Filipowcz, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. 12 617 50 94, e-mail: mariusz.filipowicz@agh.edu.pl

[3] Krzysztof Izdebski, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Al. A. Mickiewicza 30,30-059 Kraków, krzysztof.izdebski90@gmail.com

1. Wprowadzenie do zagadnienia systemów CHP

Systemy skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej (w skrócie CHP – z ang. Combined Heat and Power) w zdecydowanej większości stosowane były do niedawna w rozwiązaniach energetyki zawodowej. Podstawowymi urządzeniami układów kogeneracyjnych występujących w tym obszarze są turbiny parowe przeciwprężne i upustowo-kondensacyjne (pracujące w obiegu Rankine'a) oraz turbiny gazowe (pracujące w obiegu Braytona). Obecnie dąży się do stosowania układów CHP także w skali lokalnej, jako jednostek wytwórczych energii elektrycznej z możliwością wytwarzania ciepła w systemach energetyki rozproszonej. Ze względu na moc elektryczną, podział urządzeń energetyki rozproszonej jest następujący:

- duża energetyka rozproszona (50 MW_{el} – 100 lub 150 MW_{el});
- średnia energetyka rozproszona (5 MW_{el} – 50 MW_{el});
- mała energetyka rozproszona (5 kW_{el} – 5 MW_{el});
- mikroenergetyka rozproszona (do 5 kW_{el}).

W systemach rozproszonych stosowane są różne technologie wytwarzania ciepła i energii elektrycznej, pokrótce opisane niżej (skupiono się wyłącznie na jednostkach skali małej i mikro). Wyprodukowana w ten sposób energia zaspokaja w pierwszej kolejności potrzeby wytwórcy (np. budynków mieszkalnych, gospodarstw rolnych, obiektów użyteczności publicznej itp.), a nadwyżki energii trafiają do lokalnych rozdzielczych sieci elektroenergetycznych (w przypadku energii elektrycznej) lub lokalnych sieci ciepłowniczych (w przypadku ciepła). W ten sposób unika się szeregu wad energetyki scentralizowanej.

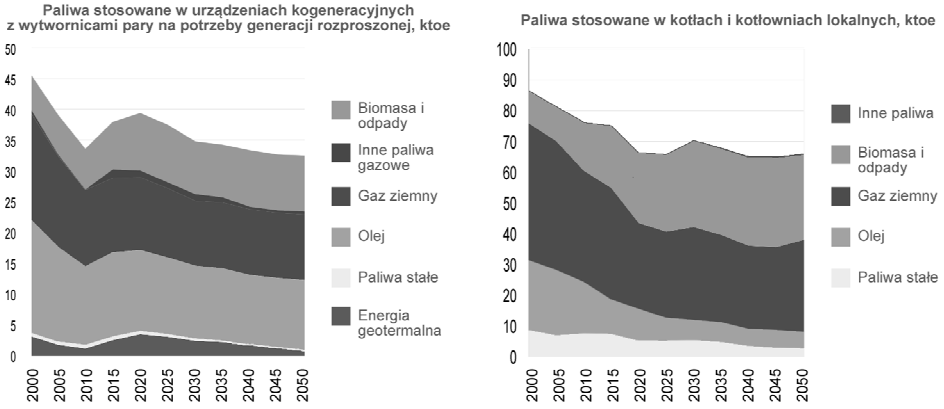
1.1. Układy kogeneracyjne mikro i małej skali

Aktualnie dostępne rozwiązania układów kogeneracyjnych mikro i małej skali obejmują urządzenia oparte na wykorzystaniu technologii silników spalania wewnętrznego (silnik Diesla i Otto), silników spalania zewnętrznego (silnik Stirlinga), turbin parowych, turbin i mikroturbin gazowych oraz ogniw paliwowych.

Wymienione wyżej rozwiązania na obecnym etapie tylko częściowo wykorzystywane są w rozwiązaniach komercyjnych (dostępne urządzenia zasilane są głównie gazem ziemnym i olejem napędowym), natomiast znaczna część znajduje się wciąż na etapie prac badawczych i aplikacyjnych. Uwzględniając urządzenia posiadające możliwość współpracy z zewnętrznymi źródłami ciepła, opartymi o wykorzystanie odnawialnych źródeł energii (np. energii biomasy lub energii promieniowania słonecznego) dużym potencjałem odznaczają się układy z silnikami Stirlinga oraz turbinami i silnikami parowymi. W perspektywie najbliższych lat rozwój technologii powinien umożliwić także wykorzystanie ogniw paliwowych w systemach mikro i małej skali.

1.2. Kotły na biomasę jako źródło ciepła dla systemów kogeneracyjnych

Zgodnie z założeniami Komisji Europejskiej, przedstawionymi w dokumencie *EU Energy, Transport and GHG Emissions Trends to 2050* [1], ogólny udział odnawialnych źródeł energii w wytwarzaniu energii elektrycznej osiągnie w 2050 roku poziom 50%. Wzrost udziału OZE w produkcji energii elektrycznej związany jest w dużej mierze z przewidywanym dynamicznym rozwojem systemów energetyki rozproszonej, w tym sieci smart grid. W tego typu rozwiązaniach, energia elektryczna będzie wytwarzana m.in. w układach kogeneracyjnych, działających na zasadzie organicznego obiegu Rankine'a (ORC). Odparowanie czynnika roboczego, którego pary napędzają turbinę parową (silnik parowy) połączoną z generatorem prądotwórczym, będzie mogło następować przy wykorzystaniu ciepła generowanego w kotłach na biomasę. Przewidywany udział biomasy w lokalnych systemach CHP oraz w ogrzewaniu sieciowym i kotłowniach domowych, na przestrzeni kolejnych lat do roku 2050, pokazany został na rysunku 1.



Rys. 1. Przewidywany udział biomasy w lokalnych systemach CHP oraz w systemach grzewczych (opr. własne na podst. [1])

Fig. 1. Predicted biomass share in local CHP systems and heating systems (own work based on [1])

Zastosowanie układów kogeneracyjnych z kotłem na biomasę jest możliwe zarówno w przypadku budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej, jak również w przypadku gospodarstw rolnych. Te ostatnie borykają się bardzo często z problemem braku dostępu do sieci elektroenergetycznej, co powoduje konieczność stosowania drogich w eksploatacji urządzeń prądotwórczych z silnikami spalania wewnętrznego, napędzanych głównie olejem napędowym. Zastosowanie w takich przypadkach układów kogeneracyjnych z kotłem na biomasę pozwoli osiągnąć całkowitą lub częściową niezależność energetyczną, gdyż spalanie paliwa dostępnego na obszarze gospodarstwa pozwoli na zasilenie urządzeń wytwarzających energię elektryczną.

2. Konstrukcja prototypowego systemu kogeneracyjnego

2.1. Typowe układy ORC małej i mikro skali

Budowa typowego układu ORC z kotłem na biomasę, dedykowanego do rozwiązań małej lub mikro skali, obejmuje takie elementy, jak: kocioł grzewczy, obieg pośredni oleju termalnego (odbierającego ciepło od gorących spalin i przekazującego je do czynnika niskowrzącego), parownik, turbina parowa (lub silnik parowy), generator energii elektrycznej, skraplacz oraz pompy obiegowe oleju termalnego i czynnika niskowrzącego. Sprawność wytwarzania energii elektrycznej w typowym układzie ORC osiąga poziom ok. 10-20%.

Opisana konstrukcja nie jest pozbawiona wad. Największa trudność związana jest z budową mikroturbiny parowej o mocy kilku- lub kilkunastu kW_{el}, której parametrów konstrukcyjnych nie można wprost przenieść z rozwiązań dużej skali. Dostępne aktualnie rozwiązania turbin (znajdujące się w fazie aplikacyjnej) charakteryzują się stosunkowo niską sprawnością i wysoką ceną.

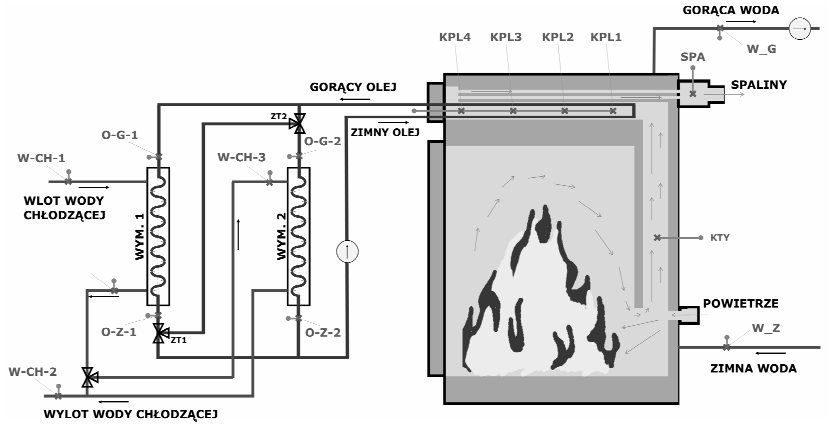
Dodatkowych badań wymaga także kwestia współpracy układu prądotwórczego z kotłem na biomasę, szczególnie w zakresie opracowania optymalnego systemu odbioru ciepła wysokotemperaturowego oraz dopasowania parametrów pracy kotła zarówno do potrzeb grzewczych, potrzeb układu prądotwórczego, jak i wymagań w zakresie emisji dwutlenku węgla i pyłów do atmosfery.

2.2. Konstrukcja prototypowego układu ORC

Mając na uwadze niedogodności typowych układów ORC małej i mikro skali, a jednocześnie znając realne zapotrzebowanie na tego typu rozwiązania, podjęta została budowa układu skojarzonego wytwarzania ciepła i energii elektrycznej małej skali, opartego o wykorzystanie kotła na słomę i inną biomasę, przeznaczonego do zastosowania w gospodarstwach rolnych. Cel, jaki został postawiony to w pierwszej kolejności osiągnięcie niezależności energetycznej samego urządzenia kogeneracyjnego, a następnie częściowej lub całkowitej niezależności energetycznej gospodarstwa, w którym zostanie ono zastosowane.

W oparciu o wyniki badań parametrów pracy kotła wsadowego na słomę o mocy 180 kW ze spalaniem w systemie przeciwprądowym (w tym badań dynamiki zmian temperatury w komorze spalania pierwotnego i wtórnego kotła, w płaszczu wodnym oraz w obszarze czopucha kominowego [2]) opracowany został system odbioru ciepła wysokotemperaturowego do obiegu olejowego. W skład opracowanego systemu wchodzi specjalnej konstrukcji wymiennik olejowy, wykonany z rur stalowych o średnicy DN50, umieszczony w obszarze komory spalania wtórnego oraz połączony z resztą układu za pomocą króćców wyprowadzonych przez górne drzwi kotła. Obieg olejowy składa się z dwóch wymienników ciepła typu JAD, połączonych w taki sposób, że możliwa jest praca tylko jednego wymiennika lub dwóch połączonych szeregowo albo równolegle (przełączanie za pomocą zaworów trójdrogowych). Obieg oleju wymu-

szany jest za pomocą pompy olejowej, sterowanej z poziomu falownika. Po stronie wtórnej wymienników typu JAD znajduje się obieg parowy, wyposażony w prototypowy silnik parowy małej mocy. Silnik ten powstał na bazie sprężarki tłokowej, dzięki czemu przy stosunkowo niedużym obniżeniu sprawności (w porównaniu do mikroturbiny parowej) możliwe jest znaczne obniżenie kosztów produkcji urządzenia. Oprócz silnika parowego, w skład prototypowego układu ORC wejdzie dedykowany skraplacz (połączony z obiegiem grzewczym) oraz ekonomizer [3]. Planowany do wykorzystania czynnik niskowrzący 3M® Novec® 7000 charakteryzuje się temperaturą wrzenia równą 34°C (przy ciśnieniu 1 bar), temperaturą krytyczną 165°C i ciśnieniem krytycznym 24,8 bar. Schemat uwzględniający obieg olejowy oraz część obiegu parowego (tymczasowo stosowana była woda) przedstawiony został na rysunku 2.



Rys. 2. Rozmieszczenie czujników temperatury w części olejowej i parowej układu kogeneracyjnego (opr. własne)

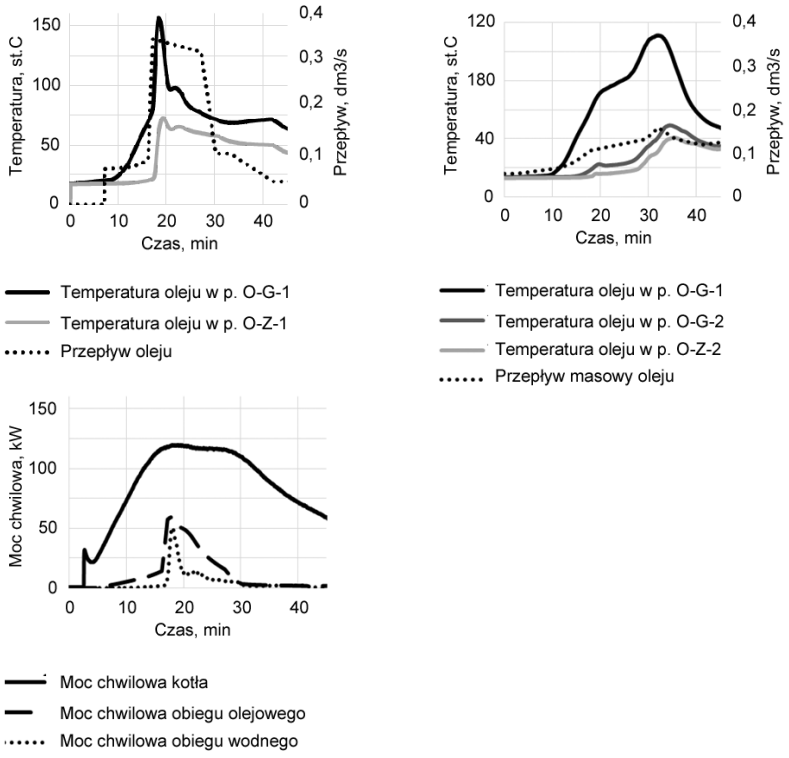
Fig. 2. Arrangement of temperature sensors in the oil and steam parts of cogeneration system (own work)

3. Omówienie dotychczas otrzymanych wyników

Wyniki przeprowadzonych dotychczas badań wstępnych (towarzyszących pierwszemu rozruchowi systemu) potwierdzają duży potencjał opracowywanego rozwiązania. Przedstawione poniżej wykresy obrazują przebieg zmian temperatury w wybranych punktach obiegu olejowego i wodnego, a także chwilowe wartości mocy grzewczej kotła, mocy obiegu olejowego oraz mocy obiegu wodnego w przypadku pracy pojedynczego wymiennika JAD, jak również połączenia szeregowego i równoległego dwóch wymienników. Sposób sterowania pracą kotła był identyczny w każdym z przypadków – po okresie rozpalenia paliwa, wentylator nadmuchowy ustawiany był na 100% swojej mocy i pracował tak aż do wypalenia wsadu. Momenty załączenie pomp obiegowych oleju i wody chłodzącej, zaznaczone zostały na wykresach.

3.1. Układ z 1 wymiennikiem ciepła typu JAD

W pierwszym z rozważanych przypadków, układ olejowy pracował z wykorzystaniem tylko jednego wymiennika ciepła typu JAD. Przy spaleniu jednego wsadu paliwa o masie 65 kg (60 kg słomy oraz 5 kg papieru), osiągnięto temperaturę oleju na poziomie przekraczającym 150°C (przy czym w momencie gwałtownego wzrostu temperatury uruchomiona została na pełną moc pompa obiegowa oleju). Gwałtowny przyrost temperatury związany był ze sposobem rozprowadzenia ciepła w obiegu – gorący olej najpierw rozchodził się w górnych częściach układu, a dopiero po pewnym czasie trafiał na wymiennik JAD. W efekcie ok. 18 minuty procesu uzyskano chwilową wartość mocy układu olejowego na poziomie 60 kW (1/3 nominalnej mocy cieplnej kotła) oraz aż 50 kW mocy układu wodnego, chłodzącego część olejową. Temperatura wody chłodzącej osiągnęła ponad 40°C (pompa działała na pełnej mocy od początku). Przebiegi zmian temperatury oleju i wody chłodzącej oraz zmian mocy w poszczególnych częściach układu pokazane zostały na rysunku 3.

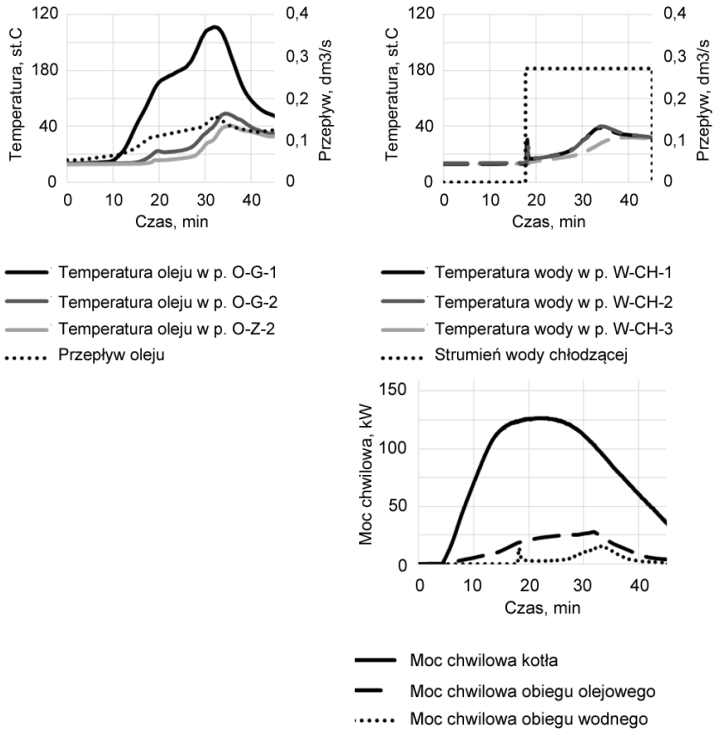


Rys. 3. Przebiegi zmian temperatury oleju i wody chłodzącej oraz zmian mocy w poszczególnych częściach układu

Fig. 3. Oil temperature, cooling water temperature and power changes in different parts of the cogeneration system

3.2. Układ z 2 wymiennikami ciepła typu JAD (połączenie szeregowe)

W drugim z rozważanych przypadków, układ olejowy pracował z wykorzystaniem dwóch wymienników ciepła typu JAD połączonych szeregowo, chłodzonych wodą w układzie współprądowym. W tej sytuacji widoczny jest znaczący spadek prędkości przepływu (a więc strumienia masowego) oleju, co znajduje odzwierciedlenie w przebiegu zmian temperatury i mocy chwilowej. Ze względu na sposób prowadzenia całego procesu (m.in. praca pompy obiegowej oleju włączona na 100% mocy po upływie 5 minut od rozpoczęcia procesu spalania, późniejsze włączenie pompy obiegowej wody chłodzącej), maksymalne wartości temperatury oleju i wody osiągane są w końcowej fazie procesu spalania. Mały załadunek paliwa (45 kg słomy o średniej wilgotności 12% oraz 5 kg papieru) spowodował, iż temperatura oleju na wyjściu z kotła osiągnęła zaledwie 110°C, zaś na powrocie do kotła nie przekroczyła 50°C. Maksymalna moc w układzie olejowym wynosi w tym przypadku ok. 25 kW, a moc obiegu wodnego – ok. 15 kW. Przebiegi zmian temperatury oleju i wody chłodzącej oraz zmian mocy w układzie pokazane zostały na rysunku 4.

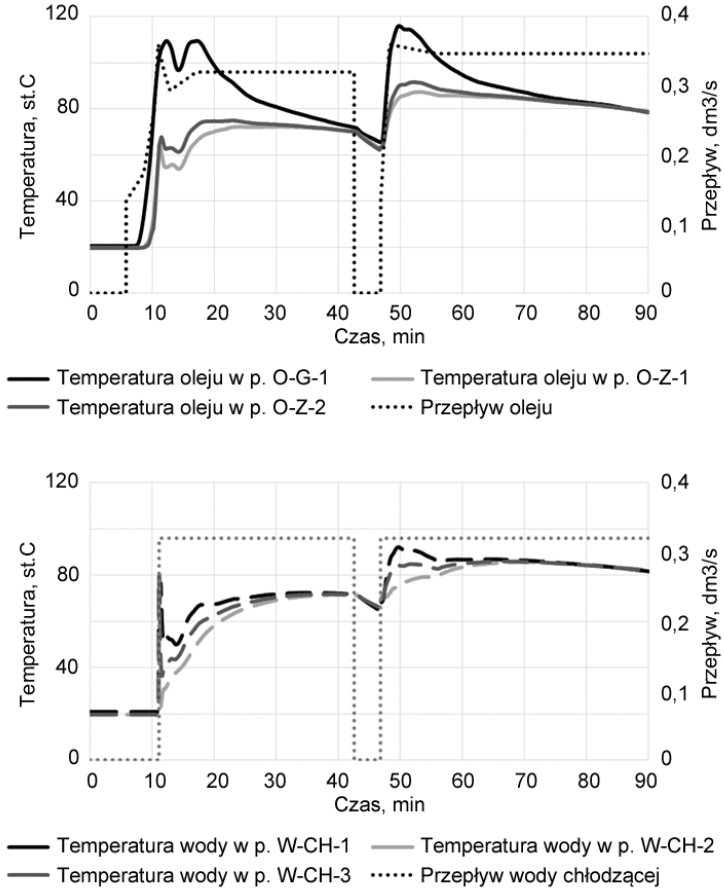


Rys. 4. Przebiegi zmian temperatury oleju i wody chłodzącej oraz zmian mocy w poszczególnych częściach układu

Fig. 4. Oil temperature, cooling water temperature and power changes in different parts of the cogeneration system

3.3. Układ z 2 wymiennikami ciepła typu JAD (połączenie równoległe)

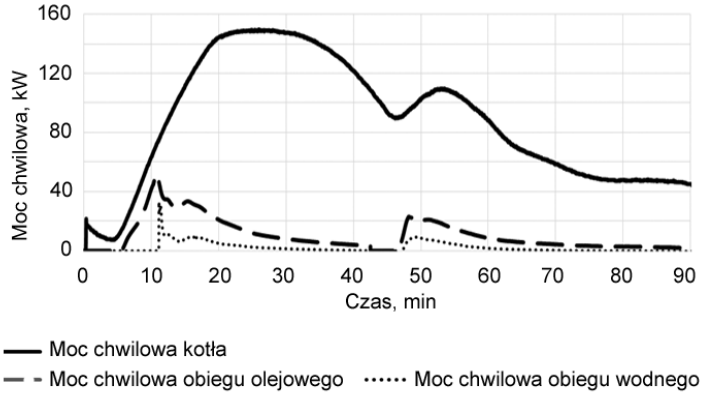
W ostatnim z rozważanych przypadków, układ olejowy pracował z wykorzystaniem dwóch wymienników ciepła typu JAD połączonych równolegle. Badania przeprowadzono przy dwóch paleniach następujących zaraz po sobie. Maksymalna temperatura oleju osiągnęła pułap niespełna 120°C (na wyjściu z kotła podczas drugiego palenia), natomiast temperatura na powrocie do kotła utrzymywała się na poziomie ok. 80°C. Ze względu na szeregowe połączenie wymienników po stronie chłodzonej, na wyjściu wymienników wystąpiła niewielka różnica temperatury oleju. Można zauważyć, że przy drugim paleniu temperatura oleju wzrosła o kilkanaście procent, co pozwala wysnuć wniosek, że kolejne palenia podniosłyby temperaturę proporcjonalnie wyżej. Przebieg zmian temperatury oleju i wody chłodzącej zobrazowany został na rysunku 5.



Rys. 5. Przebiegi zmian temperatury oleju i wody chłodzącej w poszczególnych częściach układu

Fig. 5. Oil temperature and cooling water temperature changes in different parts of the cogeneration system

Zmianom temperatury oleju i wody towarzyszyły odpowiadające im zmiany mocy w poszczególnych częściach układu. Najwyższa uzyskiwana moc obiegu olejowego i wodnego wynosiła w pikach odpowiednio ok. 45 kW i 35 kW, natomiast w pozostałych momentach wyraźnie spadała. Przebieg zmian temperatury mocy w poszczególnych częściach systemu przedstawia rysunek 6.



Rys. 6. Przebieg zmian mocy w poszczególnych częściach układu

Fig. 6. Power changes in different parts of the cogeneration system

4. Podsumowanie

Pierwsze badania, mimo iż prowadzone w fazie rozruchowej instalacji, potwierdzają zasadność dalszych prac badawczo-wdrożeniowych zmierzających do opracowania gotowego systemu kogeneracyjnego małej (mikro) skali, bazującego na wykorzystaniu kotła na biomasę oraz układu prądotwórczego z obiegiem organicznym Rankine'a (ORC).

Otrzymane do tej pory wyniki wykazują zróżnicowanie w zależności od trybu pracy układu. Najwyższą moc chwilową układu olejowego udało się uzyskać przy wykorzystaniu tylko jednego wymiennika ciepła typu JAD, natomiast najstabilniej w czasie układ zachowywał się przy połączeniu równoległym dwóch wymienników. Obserwacje te są jednakże w dużej mierze wynikiem sposobu prowadzenia procesu spalania, a praca poszczególnych części systemu wymaga wielu badań. Niemniej, moc uzyskiwana w układzie olejowym, stanowiąca w wybranych momentach 10 i więcej procent mocy cieplnej kotła sprawia, że spełnione są wstępne oczekiwania odnośnie pracy instalacji.

Niniejsza praca wykonana została w ramach badań statutowych KZRE oraz projektu Bio-Eco-Matic.

Literatura

[1] EU Energy, Transport and GHG Emissions Trends to 2050, Reference Scenario 2013, p. 47, http://ec.europa.eu [dostęp: 27 kwietnia 2014 r.].

[2] Sornek K., Tomski M., Filipowicz M.: Wykorzystanie biomasy w nowoczesnych, domowych systemach poligeneracyjnych, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 283. Seria: Budownictwo i Inżynieria Środowiska, 2012, s. 721–728.

[3] Sornek K., Szubel M., Goryl W., Bożek E., Filipowicz M.: Możliwość pozyskiwania i wykorzystania energii z biomasy, Przemysł Chemiczny, nr 12, 2014, s. 2071–2076.

STUDY OF SELECTED OPERATING PARAMETERS OF BIOMASS BASED PROTYPE CHP SYSTEM

S u m m a r y

This article presents possibilities of using small scale biomass boilers to construction combined heat and power systems dedicated to small and micro-scale solutions. Main goal of the research is to construct prototype installation using varied types of biomass with thermal capacity from 35 to 500 kW. Experience gained during operation of this installation will be used to construct boiler dedicated to ORC system and to develop suitable control system for it. A proper operating of this system can indicate that biomass based CHP systems are good solution for small and micro CHP in distributed generation.

The main goal of research was to test the system in varied conditions: different amount of fuel, different controls and usage with few selected configurations of heat exchangers: single heat exchanger, two heat exchangers connected series and two heat exchangers connected parallel. The aim of such modification was to find optimal configuration of this installation. Research was performed in initial phase - water system instead ORC medium was used. Performed research shows that the highest power is obtained when only one heat exchanger is used, but the system is working more stable when two exchangers connected parallel are used. Moreover the research shows that oil temperatures is sufficient to generate steam in future ORC system. This initial research shows also that this project should be continued and further developed.

Keywords: renewable energy sources, biomass, cogeneration, distributed generation, micro energy sources

Przesłano do redakcji: 17.02.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.70

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 419-427

Katarzyna STANISZ[1]
Stanisław GUMUŁA[2]

KSZTAŁTOWANIE SIĘ WSPÓŁCZYNNIKA EFEKTYWNOŚCI POMPY CIEPŁA PRZY WSPÓŁPRACY Z AKUMULATORAMI CIEPŁA O RÓŻNEJ POJEMNOŚCI

W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki analizy procesu ogrzewania budynku przy współpracy pompy ciepła z wodnymi akumulatorami ciepła izolowanymi termicznie od otoczenia, które stanowiły dolne źródła ciepła dla pompy. Rozważono kilka wodnych akumulatorów ciepła. W pierwszym etapie rozważań akumulatory w kształcie sześcianu różniły się objętością wody (pojemnością cieplną) i współczynnikami przenikania ciepła przez ich ściany, ale każdy z nich zapewniał ilość ciepła potrzebną do ogrzania budynku. Natomiast w następnej części, rozważono wodne akumulatory ciepła o takim samym współczynniku przenikania ciepła przez ściany, ale różniące się pojemnością cieplną.
Akumulator przejmował ciepło od absorberów słonecznych i gromadził to ciepło w okresie letnim. Przeprowadzona analiza wykazała, że w przypadku akumulatorów o dużej pojemności budynek może być ogrzewany w ciągu całego sezonu grzewczego bez udziału pompy ciepła, jedynie przy wykorzystaniu pompy obiegowej transportującej ciepło z akumulatora do ogrzewanego obiektu. Natomiast w przypadku akumulatorów o mniejszej pojemności jedynie w części sezonu grzewczego budynek może być ogrzewany w oparciu o wymianę ciepła pomiędzy akumulatorem a ogrzewanym budynkiem bez udziału pompy ciepła. W dalszej części sezonu grzewczego, gdy temperatura wody w akumulatorze obniży się, do ogrzewania włączona zostanie pompa ciepła dla której ten akumulator wodny byłby dolnym źródłem ciepła. Pozwoliłoby to osiągnąć bardzo wysoką średnioroczną wartość współczynnika wydajności pomp ciepła (COP).

Słowa kluczowe: kolektory słoneczne, akumulator ciepła, pompa ciepła.

1. Wprowadzenie

Temperatura dolnego źródła ciepła jest podstawowym czynnikiem decydującym o wartości współczynnika wydajności pompy ciepła. Ogólnie przebieg zmian temperatury dolnego źródła może być różny w zależności od rodzaju

[1] Autor do korespondencji: dr K. Stanisz, PWSZ im S. Pigonia w Krośnie, katsta1304@interia.pl
[2] Prof. dr hab. inż. S. Gumuła, AGH w Krakowie, kmiue@imir.agh.edu.pl

dolnego źródła ciepła i pory roku, przy czym znaczne zmiany temperatury mogą występować w bardzo krótkich odstępach czasu. W instalacjach posiadających pompy ciepła, dolnym źródłem jest zazwyczaj powietrze, grunt, woda gruntowa, ścieki komunalne, czy też duże, otwarte zbiorniki wodne. Część tych źródeł wykazuje złą koherentność z zapotrzebowaniem na ciepło, gdyż podczas największego zapotrzebowania na ciepło ich moc cieplna jest często najniższa.

Do magazynowania ciepła w celach grzewczych wykorzystuje się złoża kamienne, grunt a także materiały zmieniające fazę skupienia tj. np. hydraty lub parafiny. Jednak w zakresie niskich temperatur do akumulowania ciepła najbardziej nadaje się woda, która posiada prawie dwukrotnie większe ciepło właściwe niż inne czynniki dotychczas stosowane do tego celu. Dodatkowymi korzyściami pochodzącymi z jej wykorzystania jest niska jej cena, dostępność i nietoksyczność. Wadą wody jest natomiast ograniczenie temperatury akumulacji, która musi być niższa od temperatury wrzenia.

W prezentowanej pracy przedstawiono wyniki analizy parametrów współpracy pompy ciepła z wodnym akumulatorem ciepła izolowanym termicznie od otoczenia, który stanowił dolne źródło ciepła dla pompy ciepła. Rozważono kilka wariantów wodnych akumulatorów ciepła o takim samym współczynniku przenikania ciepła, ale różniących się objętością.

2. Zapotrzebowanie budynku na ciepło dla celów grzewczych

Obiektem ogrzewanym, dla którego przeprowadzono obliczenia, był budynek mieszkalny o powierzchni 110 m^2 i zapotrzebowaniu na ciepło użytkowe 40 kWh/m^2/rok. Sezonowe zapotrzebowanie na ciepło wynosi wówczas 4400 kWh/rok. Założono, że budynek będzie ogrzewany ciepłem zakumulowanym w wodnym akumulatorze ciepła, pozyskiwanym z energii promieniowania słońca za pomocą kolektorów słonecznych. Czas trwania sezonu grzewczego przyjęto 202 dni [1].

3. Określenie pojemności akumulatora ciepła

W pracy przyjęto, że akumulatorem ciepła będzie zbiornik wodny, którego maksymalna temperatura wody przed rozpoczęciem sezonu grzewczego może osiągnąć 90°C , a po sezonie grzewczym temperatura wody nie spadnie poniżej 5°C [2].

Na podstawie obliczonego zapotrzebowania na ciepło dla celów grzewczych (q_{bp}), oraz ciepła traconego na przewodach i w akumulatorze (q_{str}), określono parametry techniczne możliwych do zastosowania wodnych akumulatorów ciepła oraz możliwą do zgromadzenia w tych akumulatorach ilość ciepła q_{ak} .

$$q_{str} + q_{bp} = q_{ak} \quad [kWh] \tag{1}$$

Przyjęte do analizy dane techniczne tych akumulatorów zestawiono w tabeli 1. W pierwszym etapie rozważań akumulatory w kształcie sześcianu różniły się objętością wody (pojemnością cieplną) i współczynnikami przenikania ciepła przez ich ściany, ale każdy z nich zapewniał ilość ciepła potrzebną do ogrzania budynku określoną w punkcie drugim.

Tabela 1. Parametry techniczne akumulatorów ciepła

Table 1. Specifications of heat accumulators

Objętość wody w akumulatorze [m^3]	**65**	**90**	**150**	**270**
Współczynnik przenikania ciepła U przez ściany akumulatora [W/(m^2*K)]	≤ 0,05	≤ 0,1	≤ 0,2	≤ 0,3
Możliwe do zgromadzenia ciepło (q_{ak}) [kWh]	6 409	8 874	14 790	26 620
Przybliżone straty ciepła (q_{str}) [kWh]	1 643	3 851	10 030	20 930

Ostatecznie dla rozważanego budynku wybrano wodne akumulatory ciepła o współczynniku przenikania ciepła przez ścianki akumulatora wynoszącym 0,1 W/ (m^2*K). Rozważono kilka takich akumulatorów ciepła w kształcie sześcianu różniących się objętością (tabela 2).

Straty ciepła do otoczenia zostały obliczone z wzoru (2).

$$q_{str} = P_c \cdot U \cdot \Delta T \cdot t \qquad [Wh] \tag{2}$$

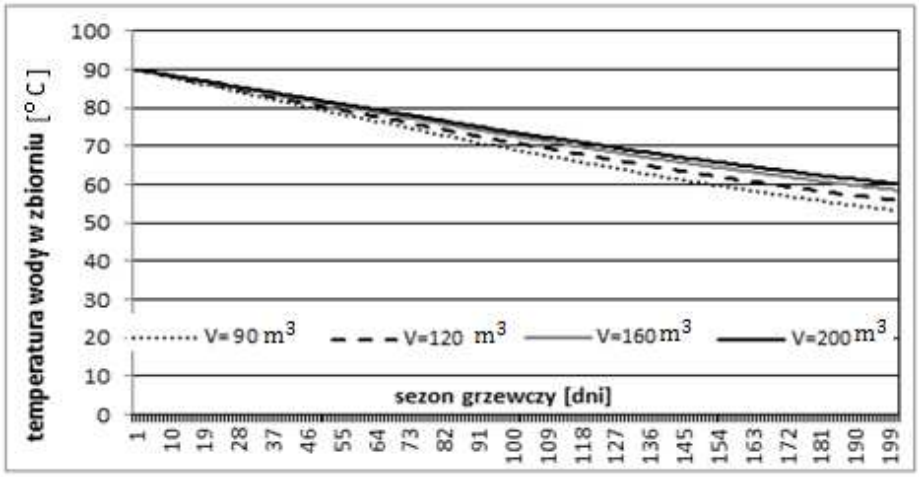
gdzie: P_c- całkowita powierzchnia akumulatora ciepła [m^2],
U- współczynnik przenikania ciepła akumulatora [W/(m^2*K)],
ΔT- różnica temperatur pomiędzy dolnym źródłem ciepła a temperaturą, powietrza zewnętrznego [K],
t- czas trwania sezonu grzewczego [h].

Tabela 2. Parametry techniczne akumulatorów ciepła

Table 2. Specifications of heat accumulators

Objętość wody w akumulatorze [m^3]	**90**	**120**	**160**	**200**
Współczynnik przenikania ciepła U przez ściany akumulatora [W/(m^2*K)]	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Możliwe do zgromadzenia ciepło [kWh]	8 874	11 832	15 777	19 720
Straty ciepła do otoczenia [kWh]	3 851	4 790	5 880	6 980

W celu policzenia ΔT – różnicy temperatur pomiędzy temperaturą dolnego źródła ciepła a temperaturą powietrza zewnętrznego - wykorzystano dane pomiarowe przebiegu temperatur zewnętrznych przedstawione w pracy [1]. Obliczenia zostały wykonane w programie Excel dla każdego dnia sezonu grzewczego.



Rys. 1. Przebieg obniżania się temperatury wody w akumulatorze ciepła o współczynniku przenikania ciepła U= 0,1 W/(m^2*K) ale o różnych pojemnościach w całym sezonie grzewczym na skutek strat ciepła do otoczenia

Fig.1. The distribution of water temperature decrease in a heat accumulator with a heat transfer coefficient U= 0,1 W/(m^2*K) but of different thermal capacities throughout the heating season due to heat losses to the environment

Następnie obliczono przebieg obniżania się temperatury wody w rozważanych akumulatorach ciepła (rys.1).

Temperatura wody w akumulatorze ciepła obniża się na skutek poboru ciepła do celów grzewczych oraz strat ciepła do otoczenia (tabela 3).

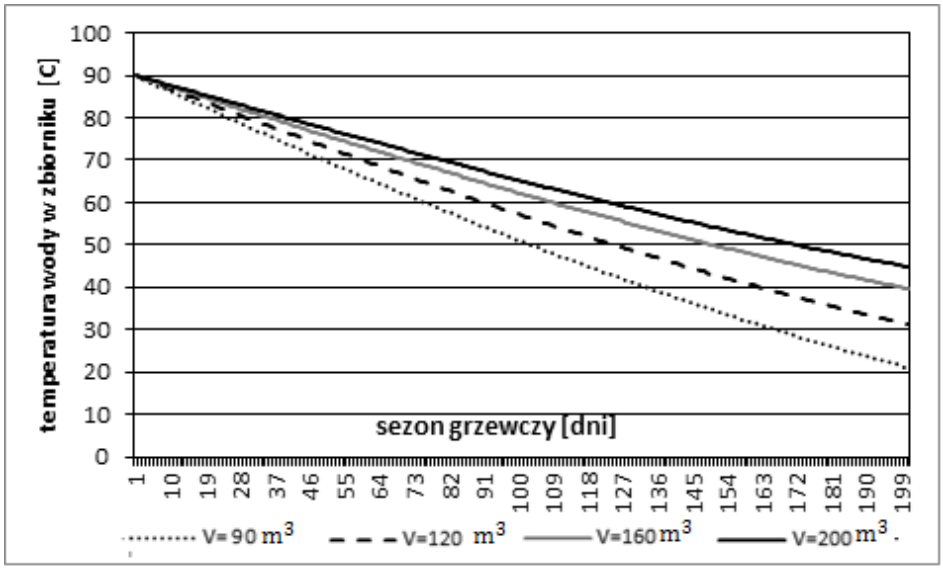
Tabela 3. Parametry techniczne akumulatorów ciepła

Table 3. Specifications of heat accumulators

Objętość wody w akumulatorze [m^3]	**90**	**120**	**160**	**200**
Współczynnik przenikania ciepła U przez ściany akumulatora [W/(m^2*K)]	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Możliwe do zgromadzenia ciepło [kWh]	8 874	11 832	15 777	19 720
Przybliżone straty ciepła do otoczenia [kWh]	2 864	3 860	5 028	6 137
Całe stracone i wykorzystane ciepło [kWh]	7 264	8 260	9 428	10 537

Na podstawie przebiegu bieżącego zapotrzebowania na ciepło ogrzewanego obiektu czyli przebiegu poboru ciepła z akumulatora oraz strat ciepła do otoczenia, określono przebieg obniżenia się temperatury w akumulatorach ciepła o różnych pojemnościach, ale o tym samym współczynniku przenikania ciepła (rysunek 2).

Na zwrócenie uwagi zasługuje fakt, że straty ciepła do otoczenia są mniejsze w przypadku gdy ciepło odpływa z akumulatora równocześnie dla celów grzewczych i na skutek strat niż gdyby odpływało tylko na skutek strat. (tabela 4). Jest to spowodowane tym, że straty ciepła do otoczenia są związane z różnicą temperatur wody w akumulatorze a temperaturą otoczenia akumulatora (ΔT), i w przypadku gdy ciepło z akumulatora jest również pobierane do celów grzewczych, to ta różnica temperatur staje się coraz mniejsza.



Rys.2. Przebieg procesu obniżania się temperatury w akumulatorach ciepła (dolnych źródłach ciepła pompy ciepła)

Fig.2. The process of lowering the temperature of the storage warm (lower heat source heat pumps)

Tabela 4. Porównanie strat ciepła w akumulatorach ciepła o różniej pojemności, w przypadku gdy ciepło jest pobierane dla celów grzewczych i nie jest pobierane dla celów grzewczych

Table 4. Comparison of the heat losses in the storage of differing thermal capacity, in two cases when used for heating purposes and when it is not used for heating purposes

Objętość wody w akumulatorze [m^3]	**90**	**120**	**160**	**200**
Przybliżone straty ciepła do otoczenia w przypadku gdy ciepło nie jest pobierane do celów grzewczych [kWh]	3 851	4 790	5 880	6 980
Przybliżone straty ciepła do otoczenia w przypadku gdy ciepło jest również pobierane do celów grzewczych [kWh]	2 864	3 860	5 028	6 137
Różnica [kWh]	987	930	852	843

4. Sezonowe zmiany parametrów pracy układu ogrzewania budynku

Z rysunku 2 można wnioskować, że w przypadku akumulatorów o pojemności 160 m^3 i 200 m^3– zgromadzona w akumulatorze ilość ciepła pozwala w całym sezonie grzewczym ogrzewać obiekt ciepłem zawartym w akumulatorze bez udziału pompy ciepła to znaczy w oparciu o wymianę ciepła wymuszoną jedynie pompą obiegową. Jedynie w przypadku akumulatorów ciepła o mniejszej pojemności, pompa ciepła będzie niezbędna i włączy się ona do pracy wówczas gdy temperatura wody w akumulatorze obniży się do takiej wartości, że nie da się ogrzewać obiektu jedynie na drodze wymiany ciepła pomiędzy akumulatorem ciepła a ogrzewanym obiektem. W tym momencie do procesu ogrzewania obiektu włączona zostaje pompa ciepła dla której akumulator będzie dolnym źródłem ciepła.

W oparciu o przebieg obniżania się temperatury w akumulatorze ciepła ze wzoru (3) określić można przebieg współczynnika wydajności pompy ciepła COP_c , definiowany w oparciu o obieg Carnota [3,7].

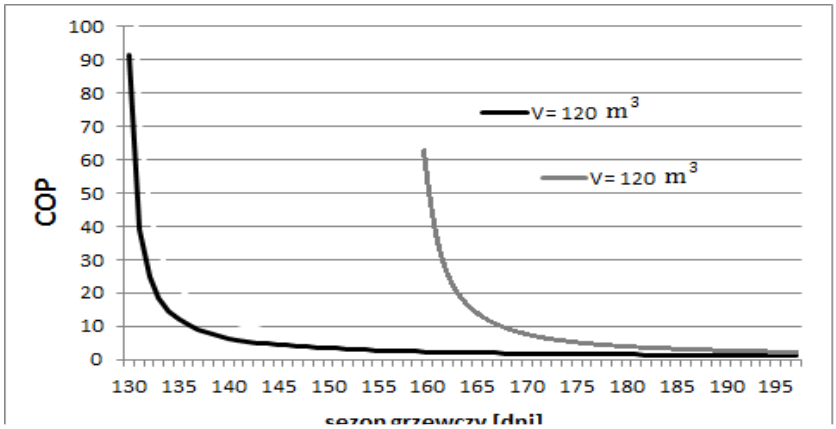
$$COP_c = \frac{T_g}{T_g - T_d} \tag{3}$$

gdzie: T_g - temperatura górnego źródła ciepła,

T_d - temperatura dolnego źródła ciepła.

Określony za pomocą wzoru (3) współczynnik efektywności pompy ciepła jest współczynnikiem maksymalnym, nie możliwym do osiągnięcia w obiektach rzeczywistych. Dla obiektów rzeczywistych relacja (3) obowiązuje ale wymaga pomnożenia przez współczynnik korygujący, który mieści się zazwyczaj w granicach od 0,55 do 0,65. Obniżenie teoretycznej wartości współczynnika wydajności dla obiektów rzeczywistych wynika ze strat ciepła w przewodach łączących elementy pompy ciepła, straty przepływowe we wszystkich elementach pompy ciepła oraz straty energii w układzie napędowym. Do dalszej analizy przyjmiemy wartość współczynnika korygującego równą 0,55.

Współczynnik ten jest tym wyższy, im mniejsza jest różnica temperatur pomiędzy temperaturą źródła dolnego a źródła górnego [3,7]. Dlatego najlepsze wskaźniki osiąga się wykorzystując pompy ciepła w układach grzewczych nisko temperaturowych, to znaczy takich, w których temperatura źródła górnego będzie możliwie jak najniższa, np. ogrzewanie podłogowe. W pracy została przyjęta temperatura górnego źródła ciepła wynosząca do + 40°C.



Rys.3. Przebieg współczynnika wydajności pompy ciepła (COP) w okresie ogrzewania obiektu z wykorzystaniem pompy ciepła przy różnych pojemnościach akumulatorów

Fig. 3. Changes of heat pump coefficient of performance (COP) during the heating of on object by a heat pump at different storage capacities

Przebieg wartości współczynnika COP dla całego okresu grzewczego z udziałem pompy ciepła pokazano na rysunku 3.

W przypadku akumulatora ciepła o pojemności 90 m^3 pompa ciepła została włączona do pracy około 130 dnia sezonu grzewczego i średnia wartość współczynnika COP na przestrzeni całego roku wynosiła wówczas 8,8. Natomiast w przypadku akumulatora ciepła o pojemności 120 m^3 pompa ciepła została włączona do pracy około 160 dnia sezonu grzewczego i średnia wartość współczynnika COP wynosiła wówczas 5,5. Jest to bardzo wysoka wartość współczynnika COP.

5. Oszacowanie potrzebnej powierzchni absorberów

Znając możliwą ilość zgromadzonego ciepła w akumulatorze ciepła (q_{ak}), sumaryczną wartość energii promieniowania słonecznego (q_{ps}) [1], sprawność kolektorów (η) (przyjęto, że dla kolektora płaskiego sprawność wynosi 50 %, natomiast dla kolektora próżniowego 70 % [4,5]), ze wzoru 4 można określić wymaganą powierzchnię kolektorów słonecznych (P_w) (tabela 5).

$$P_w \cdot q_{ps} \cdot \eta = q_{ak} \quad [kWh] \tag{4}$$

Wyznaczając całkowitą powierzchnię absorbera uwzględnić należy również straty ciepła w przewodach pomiędzy kolektorami a akumulatorem ciepła. Orientacyjnie na każde kolejne 10 metrów długości tych przewodów powierzchnię kolektorów zwiększa się o 8-10% [6]. Istnieje jednak możliwość zastosowania znacznie lepszej izolacji cieplnej dla przewodów.

Tabela 5. Zależność pomiędzy objętością akumulatorów ciepła a typem i ilością absorberów

Table 5. The relationship between the volume and the type of storage heat and aperture of area of solar absorbers

Objętość wody w akumulatorze [m^3]		**90**	**120**	**160**	**200**
Współczynnik przenikania ciepła U przez ściany akumulatora [W/m^2*K]		≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1	≤ 0,1
Powierzchnia kolektorów [m^2] - P_w	płaski	19	26	35	43
	próżniowy	14	19	26	32

Zgromadzenie w akumulatorze wodnym tak dużej ilości ciepła w okresie letnim wymaga wprowadzenia do strumienia cieczy transportującej ciepło od kolektorów do akumulatora pompy obiegowej. Pompa będzie transportować ciepło w okresach gdy temperatura w kolektorach będzie wyższa od temperatury w akumulatorze. Taki układ pozwoli maksymalnie wykorzystać moc promieniowania słońca do akumulacji ciepła w akumulatorze.

6. Podsumowanie i wnioski

Wykorzystanie do ogrzewania budynku pompy ciepła, współpracującej z izolowanym termicznie odpowiednio dobranym, wodnym akumulatorem ciepła pozwala zapewnić całkowitą ilość ciepła potrzebną do ogrzania budynku w całym sezonie grzewczym. Zaproponowany sposób ogrzewania budynku całkowicie eliminuje lokalny proces spalania w budynku i lokalną emisję produktów spalania. Nie eliminuje jednak spalania całkowicie, ponieważ energia elektryczna potrzebna do napędu sprężarki i pomp obiegowych jest wytwarzana w większości w elektrowniach zawodowych cieplnych. W elektrowniach zawodowych możliwości eliminowania ze spalin szkodliwych produktów spalania jest nieporównywalnie większa niż w kotłowniach indywidualnych. W kotłowniach indywidualnych praktycznie takich możliwości nie ma. Zatem zaproponowane rozwiązanie z punktu widzenia eksploatacji posiada znaczne walory ekologiczne- ograniczenie zużycia paliwa i korzystanie z energii elektrycznej produkowanej z troską o ekologię.

Przy zaproponowanym rozwiązaniu w przypadku większych akumulatorów obiekt może być ogrzewany poprzez wymianę ciepła pomiędzy ogrzewanym obiektem a akumulatorem ciepła bez udziału pompy ciepła. Zasilania energią elektryczną wymaga tylko pompa obiegowa transportująca ciepło z akumulatora do obiektu za pośrednictwem cieczy przepływającej przez wymienniki w akumulatorze i w budynku. Natomiast w przypadku mniejszych akumulatorów pompa ciepła będzie niezbędna w drugiej części sezonu grzewczego. Zaproponowane rozwiązanie pozwoliło osiągnąć bardzo wysoką wartość średnią współczynnika wydajności pompy ciepła.

Literatura

[1] Gumuła S, Stanisz K.: *Warianty rozwiązań technicznych zapotrzebowania na energię elektryczną budynku niezależnego energetycznie.* Prace Naukowe Politechniki Warszawskiej, s. Konferencje, z. 26, Warszawa 2009.

[2] Kaiser H. *Wykorzystanie energii słonecznej*. Wydawnictwo AGH. Kraków 1995.

[3] Rubik Marian: *Pompy ciepła. Poradnik.* Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie". Wyd. 3 rozsz. Warszawa 2006.

[4] Smolec W. Fototermiczna konwersja energii słonecznej. Wydawnictwo PWN, Warszawa 2000.

[5] Tytko R.: Odnawialne źródła energii. OWG Warszawa 2009.

a. Wesołowski M.: Vademecum dla przedsiębiorców. Cieczowe systemy słoneczne. (http://wmzdz.pl/fileadmin/user_upload/wmzdz/publikacje/01_Wyd_A_WEB.pdf).

[6] Zawadzki M.: *Kolektory słoneczne, Pompy ciepła – Na Tak* Wydawnictwo Zawadzki 2003.

EVOLUTION OF THE COEFFICIENT OF PERFORMANCE OF THE HEAT PUMP IN CONJUNCTION WITH HEAT BATTERIES OF DIFFERENT CAPACITIES

S u m m a r y

The paper presents the results of the building heating process analysis, in cooperation of a heat pump with water thermally insulated from the environment heat accumulators, which were lower heat source for the pump. Several water heat accumulators were considered . In the first stage, the cube-shaped batteries differed in the volume of water (heat capacity) and the heat transfer coefficients of the wall, but each of them provided the quantity of heat needed to heat the building. However, in the next section, water heat accumulators of the same heat transfer coefficient of the wall were considered, but with a different heat capacity.

The battery took the heat from solar absorbers and collected it in the summer. The analysis showed that in the case of high-capacity batteries a building can be heated during the whole heating season without the heat pump, only by using the heat pump of the accumulator conveyor to the heated object. However, in the case of smaller capacity batteries with only part of the heating season, the building can be heated without the heat pump. In the remainder of the heating season, when the water temperature in the battery becomes low, the heat pump, for which the battery water would lower the heat source, will be activated. This would allow to achieve a very high average annual value of the heat pump performance coefficient (COP).

Keywords: solar panels, battery heat, heat pump.

Przesłano do redakcji: 09.01.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.71

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 429-440

Jadwiga STĘCHŁY[1]

ZABYKOWA STOLARKA DRZWIOWA W JAROSŁAWSKICH OBIEKTACH SAKRALNYCH

Drzwi w obiektach sakralnych posiadają szczególne znaczenie, pełnią funkcję zabezpieczenia wnętrza, są ozdobą, wyznaczają granicę pomiędzy sacrum i profanum, urastają do rangi symbolu i znaku pamięci. Celem pracy jest zidentyfikowanie i rozpoznanie historycznej stolarki w obiektach sakralnych Jarosławia, jej analiza pod względem materiałoznawstwa, budowy konstrukcyjnej i technik zdobniczych, stylu i ikonografii, a także stanu zachowania. W jarosławskich obiektach sakralnych zachowały się jednostkowe drzwi barokowe z końca XVII i XVIII wieku, a także historyzujące drzwi z 2 poł. XIX i pocz. XX wieku. Barokową stolarkę wraz z oryginalnymi okuciami (zawiasami, hakami, klamkami, szyldami, zamkami, kłódkami, a nawet zachowanymi kluczami) reprezentują drzwi w kościółku pw. Świętego Ducha oraz kościele pw. Matki Bożej Bolesnej. Szczególną uwagę zwracają ażurowe drzwi w motywem IHS w snycerskiej oprawie znajdujące się w klasztorze dominikańskim. Duży zespół oryginalnej stolarki z ostatniej ćwierci XIX wieku zachował się w klasztorze Zgromadzenia Sióstr Niepokalanego Poczęcia NMP. Natomiast 1 poł. XX wieku reprezentują drzwi historyzujące, z motywami neobarokowej i rokokowej snycerki, znajdujące się w założeniu kościelno-klasztornym OO. Franciszkanów (OFM) oraz kolegiacie pw. Bożego Ciała. W skali wysokiej rangi obiektów sakralnych, jakie występują w Jarosławiu, zachowane oryginalne drzwi stanowią małą, aczkolwiek znamienną grupę, dlatego zasługują one na ochronę i podjęcie dalszych badań.

Słowa kluczowe: zabytkowa stolarka, drzwi, Jarosław, obiekty sakralne

1. Wstęp

Drzwi, bramy, furty w obiektach sakralnych posiadają szczególne znaczenie. Pełnią one nie tylko funkcję zabezpieczającą wnętrze i dekoracyjną, ale nade wszystko symboliczną. Oznaczają one zawsze granicę między sacrum i profanum, zarówno drzwi prowadzące do wnętrza kościoła, jak i te w furcie klasztornej oddzielające życie klauzurowe od świeckiego. Obecnie te granice się zacierają, ale wejście do każdego kościoła nadal symbolizuje samego Zbawiciela. „Ja jestem bramą dla owiec. Jeżeli ktoś wejdzie przeze Mnie, będzie zbawiony” powiedział

[1] Urząd Miasta Jarosławia, Rynek 1, e-mail: jagastechly@wp.pl

Jezus (J 10,7) porównując się do bramy.[2] Dlatego od wieków tak wielką wagę przywiązywano do drzwi, a niejednokrotnie portalu z tympanonem ujmującego wejście do świątyni. Często obrazowały one wydarzenia biblijne i historyczne, ważne w dziejach Kościoła lub kraju, w którym powstały. Warto przypomnieć tutaj drewniane drzwi bazyliki Św. Sabiny na Awentynie (V w.), brązowe Drzwi z Hildesheim (1015r.), Drzwi Gnieźnieńskie (XII w.), czy też Drzwi Raju w baptysterium we Florencji (1403-24). W Pontyficale Romanum dla drzwi przewidziane jest odrębne poświęcenie. Najpierw biskup puka trzykrotnie pastorałem w drzwi wołając: „Attollite portas principes vestras"[3] - Podnieście, Książęta, bramy wasze, i podnieście się, bramy wieczne, a wnijdzie Król chwały" (Ps. 24, 7.9 – Wlg). Następnie biskup namaszcza drzwi krzyżmem, modląc się przy tym: „Bramo, bądź pobłogosławiona, poświęcona, opieczętowana i przeznaczona dla Pana Boga; bramo, bądź wejściem do zbawienia i pokoju; bramo, bądź wrotami pokoju, przez Tego, który sam się nazwa Bramą, Jezusa Chrystusa Pana naszego, który z Ojcem i Duchem Świętym żyje i króluje, Bóg przez wszystkie wieki wieków. Amen."

Współcześni również przywiązują dużą wagę do formy kościelnych drzwi. Świadectwem są takie realizacje jak np. Drzwi Jubileuszowe Zofii Mitał do archikatedry w Przemyślu, Drzwi Papieskie Gustawa Zemły w konkatedrze św. Jakuba w Olsztynie (2001), czy drzwi Igora Mitoraja do kościoła jezuitów w Warszawie (2009). Drzwi nadal pełnią ogromną rolę i każdy fundując nowe chce pozostawić po sobie świadectwo. Nie zawsze ten nowy „pomnik" jest lepszy od starego. I niestety stare drzwi są wymieniane, bo nie znajduje zrozumienia konieczność zachowania historycznej stolarki drzwiowej w obiektach sakralnych, nawet jeżeli jej stan zachowania nie wyklucza dalszego użytkowania.

2. Przedmiot i cel pracy oraz stan badań

Chociaż w Jarosławiu znakomite założenia kościelno-klasztorne z XVII i XVIII wieku przetrwały, oryginalna stolarka w skali tych założeń, zachowała się w małym stopniu. Dominują drzwi z końca XIX i XX wieku, lecz w barokowych wnętrzach kościelnych, korytarzach klasztornych można jeszcze odnaleźć oryginalne obiekty[4]. Z uwagi na postępującą destrukcję materiału oraz panujące tendencje wymiany drzwi na nowe zasługują one na szczególną uwagę. Celem pracy jest zidentyfikowanie i rozpoznanie historycznej stolarki w obiektach sakralnych Jarosławia, jej analiza pod względem materiałoznawstwa, budowy konstrukcyjnej i technik zdobniczych, stylu ikonografii, a także stanu zachowania. Badania objęły kościół pojezuicki, obecnie kolegiatę pw. Bożego Ciała z końca XVI wieku,

[2] Szerzej na temat symboliki drzwi w sztuce kościelnej por. Forstner D. OSB, hasło: drzwi, w: Świat symboliki chrześcijańskiej, Warszawa 1990, s. 383-386; Lurker M., hasło: drzwi, w: Słownik obrazów i symboli biblijnych, Poznań 1989, s. 50-52; Miazek J. ks., Otwarcie drzwi świętych w Roku Jubileuszowym, Warszawskie Studia Teologiczne, T. XIII, 2000, s. 7-16.

[3] Pontificale Romanum I, 19-22.

[4] Z uwagi na brak dostępu do wszystkich pomieszczeń za klauzurą badania nie objęły części stolarki, lecz podziękowania i ukłony składam na ręce wszystkich przełożonych, księży, ojców i sióstr zakonnych w Jarosławiu za życzliwe udostępnienie obiektów i umożliwienie badań.

kościół pw. Świętego Ducha z końca XVII wieku, barokowe założenia kościelno-klasztorne: oo. Dominikanów (wcześniej jezuitów) i oo. Franciszkanów (OFM), a także XIX wieczne założenie klasztorne z kaplicą Sióstr Niepokalanego Poczęcia Najświętszej Marii Panny. Niestety w dawnym Opactwie Panien Benedyktynek z początku wieku XVII wszystkie drzwi uległy zniszczeniu i dawne wyroby stolarskiego rzemiosła się nie zachowały.

Pomimo wielu opracowań dotyczących dziejów Jarosławia i poszczególnych obiektów sakralnych stolarka drzwiowa nie znalazła szerszego zainteresowania. Jan Sas Zubrzycki w opracowaniu pt. *Miasto Jarosław i jego zabytki* ujął jedynie rysunek kłódki do jarosławskiej fary, obecnie kolegiaty *Bożego Ciała* (drzwi nie zachowały się)[5]. Natomiast Mieczysław Orłowicz w przewodniku po Jarosławiu z 1921 roku pt. *Jarosław jego przeszłość i zabytki*, w opisie historii założenia kościelno klasztornego oo. dominikanów opisał drewniany portal prowadzący do zakrystii kościoła pw. Matki Bożej Bolesnej z rzeźbą Michała Archanioła oraz wymienił jako cenne drzwi do zakrystii[6].

3. Stolarka drzwiowa w obiektach sakralnych Jarosławia

Do najstarszych zabytków w jarosławskich obiektach sakralnych należą drzwi zachowane w kościółku pw. Św. Ducha przy ul. Grunwaldzkiej. Kościół wzniesiony został po 1698 roku w miejscu drewnianej kaplicy Św. Krzyża jako kościół szpitalny, za murami miasta, w bezpośrednim sąsiedztwie szpitala dla ubogich i chorych. Do jego wnętrza prowadziły drzwi w elewacji bocznej (w stosunku do drogi biegnącej w stronę miasta). Drzwi zachowały się do dnia dzisiejszego, lecz są nieużytkowane i przysłonięte drugimi drzwiami drewnianymi[7]. Pochodzą one z końca wieku XVII, są to drzwi deskowe, z dwoma szpungami, a od zewnętrznej strony obite kutymi blachami, które tradycyjnie wzmacnia kratownica z pasów w układzie na romb, przybitych ćwiekami o kolistych główkach. Wokół skrzydła rozciąga się ozdobny szeroki pas blach podkreślający ich kształt – formę prostokąta zamkniętego łukiem odcinkowym. Zawieszone są one na hakach murowych i dwóch zawiasach pasowych z wydłużoną tarczką u nasady i kolistym zakończeniem. Zamek skrzynkowy występujący w drzwiach, zamknięty w formie trójliścia ozdobiony został motywami wici i hierogramem IHS, w którym przestawione zostały litery. Lustrzane odbicie litery S i przestawienie jej na początek hierogramu świadczy tylko o tym, iż wykonawca nie zaplanował dobrze rozmieszczenia liter i zapewne nie był światłym uczonym, lecz prostym

[5] Zubrzycki J.S., Miasto Jarosław i jego zabytki., Kraków 1903, s. 40. Więcej na temat stolarki w kolegiacie odnajdziemy w maszynopisach ks. Jakuba Makary opisujących dzieje Parafii łacińskiej w Jarosławiu, lecz dotyczą one stolarki i drzwi w większości nieistniejących, por. Makara J. ks., Parafia Łacińska w Jarosławiu, t. II, Jarosław 1950, s. 388-389, mszps w zb. Archiwum Muzeum Kamienica Orsettich w Jarosławiu (dalej AMJ).

[6] Orłowicz M., Jarosław jego przeszłość i zabytki, Lwów 1921, s. 131.

[7] W czasie kiedy kościółek należał do ewangelików przy tych drzwiach występował rodzaj ganku. Na fotografii z 1939 r. występują już tylko drzwi opierzane deseczkami, ułożonymi koncentrycznie wokół czterech rombów. Por. AMJ, sygn. 447. Obecne drzwi deskowe wykonane zostały na wzór wcześniejszych podczas remontu kościoła w latach 80. XX w.

rzemieślnikiem. Zamek przy montażu został odwrócony o 180°. Pierwotnie drzwi musiały funkcjonować jako drzwi główne do kościoła, bowiem jego korpus połączony był ze szpitalem dla ubogich dobudówką. Została ona rozebrana, kiedy świątynia przeszła w ręce ewangelików. Drzwi w tej elewacji szczęśliwie pozostały i pełnią obecnie rolę głównego wejścia. Są to barokowe drzwi bez odrzwi, deskowo-szpungowe, jednoskrzydłowe, od zewnątrz obite blachami, analogicznie do drzwi bocznych, lecz zawieszone na trzech hakach murowych i pasowych zawiasach. Górny i dolny zawias z owalną tarczką u nasady zakończony jest dwoma grocikami, środkowy nieco krótszy i prosty. Drzwi nie uniknęły z biegiem czasu ingerencji, odnowione zostały w ramach prac remontowych kościoła w latach 80. XX wieku.

Opatrzone są one dwoma zamkami. Dolny skrzynkowy prawdopodobnie wykonany był do innego obiektu i w trakcie montażu do skrzydła drzwiowego odwrócony o 180°. Wskazuje na to wyraźnie mechanizm jak i hierogram IHS. Puszka ma kształt zbliżony do kwadratu. Górny zamek skrzynkowy jest późniejszy i można go datować na początek XIX wieku. Został on zamontowany dopiero w trakcie renowacji drzwi w ramach wspomnianego remontu kościoła.

Barokowe, lecz już z początku XVIII wieku, drzwi zewnętrzne zachowały się w kościele oo. dominikanów, wcześniej jezuitów, zwanym wówczas kościołem *Najświętszej Marii Panny w Polu*. Oryginalne drzwi znajdują się w transepcie od północnej i południowej strony kościoła. Są to drzwi dwuskrzydłowe, bez odrzwi, deskowo-szpungowe, zabezpieczone od zewnętrznej strony kutymi blachami. Analogicznie wzmocnione trzema szpungami o sfazowanych krawędziach, o długości równej niemal całej szerokości skrzydeł drzwiowych[8]. Zawieszone są one na hakach murowych i pasowych zawiasach ozdobionych zygzakiem, a zamykane od wnętrza zaporą, wsuwaną w całości w otwór znajdujący się w ścianie kościoła.

1)  2) 

Fot.1-2. Drzwi główne z kościoła pw. Św. Ducha

Pfotos 1-2. The main door from the church dedicated to Holy Spirit

[8] W drzwiach od południa środkowe szpungi zostały ścięte pod pasowe zawiasy, co przemawia za faktem, iż haki murowe musiały być już przygotowane wcześniej i montaż zawiasów był do nich dostosowany.

3)  4) 

Fot. 3-4. Drzwi w transepcie kościoła pw. Matki Bożej Bolesnej

Pfotos 3-4. The door in transept the church dedicated to Our Lady of Sorrows

W zaporze wrót południowych zachowała się kluczka do jej wyciągania. Obie zapory zamykane są oryginalnymi kłódkami z około połowy XIX wieku (klucze niestety nie zachowały się, ale nowo wykonane dostosowane zostały do mechanizmów kłódek i są użytkowane). Drzwi były zamykane dodatkowo zamkiem puszkowym. Świadczą o tym ślady na drewnie i otwory pod klucz. Wrota poddane zostały konserwacji[9].

Podobne pod względem formy i konstrukcji są wrota pomiędzy kruchtą, a nawą główną, lecz podczas renowacji w latach 80. XX wieku drewniana zapora została zastąpiona stalowym profilem kwadratowym. Drzwi mają wymieniony również górny i dolny zawias lewego skrzydła. Oryginalna kłódka służy do zamykania wstawionej w tym czasie kraty zabezpieczającej wnętrze. Z uwagi na wartości historyczne i walory zabytkowe oraz stan zachowania wymagają konserwacji.

Ważne z uwagi na funkcję użytkową, jak ozdobną są drzwi w prezbiterium kościoła; od północy prowadzące pierwotnie do skarbca, i od południa prowadzące do zakrystii. Te jednoskrzydłowe drzwi deskowe wzmocnione dwoma szpungami zostały zwieszone na trzech hakach i zawiasach pasowych. Drzwi do skarbca opatrzone są zamkiem puszkowym działającym do dzisiejszych czasów. W drzwiach do zakrystii pozostał tylko ślad po zamkniętym trójliściem zamku puszkowym. Szczególnie ozdobnie potraktowane jest obicie z blach. Pasy tworzące kratownice w układzie romboidalnym ozdobione są gwiazdkowymi ćwiekami, z których część (otaczająca wokół skrzydło drzwiowe) montowana jest na podkładkach w kształcie sześcio lub siedmiopłatkowych rozetek.

[9] W trakcie konserwacji malowideł ściennych w kaplicach św. Jana Nepomucena i Serca Jezusowego wykonane zostały jednocześnie prace przy drzwiach. Usunięto wtórne nawarstwienia malarskie i odsłonięto fakturę ręcznie obrabianego drewna, oczyszczono i zabezpieczono okucia i elementy metalowe. Drzwiom przywrócono pierwotny wygląd. Brak dokumentacji po wykonaniu prac.

Zakrystia posiada kompleksowo zachowane wyposażenie z 1 poł. XVIII wieku, począwszy od posadzki, przez meble, boazerię oraz wystrój malarski. W tym znakomitym, przemyślanym pod względem formalnym i ikonograficznym wnętrzu, znajdują się również oryginalne drzwi podwójne, prowadzące do klasztoru. Wewnętrzne, ramowo-płycinowe i jednoskrzydłowe, pochodzą z XIX wieku i są dostosowane do całego wyposażenia meblowego – zespołu komód, szaf i boazerii, dekorowanych warstwą malarską w kolorze czerni z detalami pozostawionymi w kolorze drewna. Ich prostokątne płyciny ujęte są wąskimi prętawinami pozbawionymi warstwy malarskiej, a dekorację stanowi wpisany centralnie motyw rombu. Opracowane są one analogicznie od strony awersu i rewersu, zawieszone na zawiasach czopowych i zamykane skrzynkowym zamkiem z żeliwną klamką. Głębokie ościeżnice polichromowane na czarno zdobione są w górnej części prostokątnymi płycinami ze ściętymi górą narożnikami. Drzwi zewnętrzne do zakrystii pochodzą z 1 poł. XVIII wieku, dekorowane są barwną, swobodnie malowaną, błękitną marmoryzacją. Są to drzwi o konstrukcji deskowej, wzmacnianej pseudopłycinową dekoracją z obydwu stron, złożoną z czterech prostokątnych płycin o wciętych wklęsło narożach. Drzwi pierwotnie zawieszone były na dwóch pasowych zawiasach[10]. Od rewersu występuje w nich klamka w formie gałki, od awersu klamka ujęta żelaznym, wyciętym ozdobnie szyldem. Drzwi ujęte są obecnie skromną opaską, lecz wcześniej otoczone były ozdobnym portalem zwieńczonym rzeźbą Michała Archanioła zabijającego smoka. Wskazywał on wchodzącym do zakrystii zakonnikom, kierunek działania i nauczania – walkę ze złem – szatanem, jako drogę do królestwa Bożego. Szczęśliwie rzeźba zachowała się, lecz nie wiadomo kiedy została ustawiona nad innym wejściem w korytarzu klasztornym[11]. Jej stan zachowania utrudniał w pierwszej chwili nawet atrybucję, bo rzymska zbroja, spódnica z pasków, a także hełm i sandały na nogach, wygięcie torsu wskazywały bardziej na postać św. Floriana. Po demontażu rzeźby z portalu celem konserwacji i dokładnej analizie nie było wątpliwości co do atrybucji postaci. Jednocześnie stwierdzono konieczność rekonstrukcji brakujących elementów. Rzeźba przedstawia Michała Archanioła stojącego na smoku z mieczem ognistym w prawej dłoni i łańcuchem spowijającym smoka w lewej. Ubrany jest w niebieską sukienkę oraz rzymską zbroję (puklerz srebrzony, paski spódnicy złocone). Rozpostarte za plecami skrzydła i laserowany miecz ognisty zostały zrekonstruowane na podstawie analogii stylistycznych i formalnych, a pierwotne warstwy malarskie odsłonięte spod przemalowań i scalone kolorystycznie[12]. Konserwacja tej rzeźby była wynikiem podjęcia prac przy drzwiach w korytarzu klasztornym oo. dominikanów. Wyraźnie przemalowane i jednocześnie obite płytami pilśniowymi polichromowanymi na wzór szmaragdowej marmoryzacji nie zapowiadały się tak okazale. Demontaż i pełna konserwacja przywróciły drzwiom pierwotny wygląd plastyczny

[10] Drzwi zapewne zostały umieszczone w tym miejscu wtórnie. Zawiasy zostały obcięte i skrzydło zawieszono na nowych zawiasach czopowych.

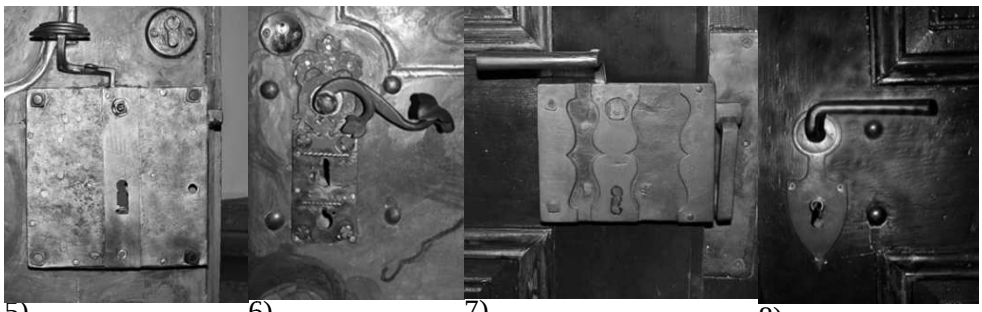
[11] W 1921 roku występowała jeszcze nad wejściem do zakrystii, lecz ma pochodzić z portalu prowadzącego do biblioteki zakonnej na emporze, por. fot. Orłowicz M., Przewodnik … op.cit. s. 131.

[12] Pełną konserwację przeprowadziła firma z Krakowa: Agnieszka Luboń Radwańska, Piotr Radwański. Konserwacja Zabytków w roku 2008. Brak dokumentacji powykonawczej.

i estetyczny, a jednocześnie właściwy stan zachowania. Są to jedyne w Jarosławiu barokowe drzwi ażurowe. Ramiaki ujmujące kompozycję z bujnych akantowych liści polichromowane są w kolorze oliwkowej zieleni. Natomiast snycerska liściasta oprawa z centralnie usytuowanym motywem IHS po stronie rewersu jest srebrzona, a awersu w całości złocona złotem płatkowym. Oddają one w pełni barokowy splendor jezuickiego wnętrza klasztornego w Jarosławiu, którego ściany pokrywają w części znakomite malowidła ścienne Adama Swacha.

Stolarkę o tradycyjnej formie barokowej reprezentują drzwi w klasztornych celach. Są to drzwi jednoskrzydłowe, ramowo-płycinowe, zawieszone na esowych zawiasach i hakach do drewna z podpórką. Oryginalne, choć nie ozdobne, wymagają pełnej konserwacji.

XIX wieczne drzwi w kościele oo. dominikanów prowadzą także na chór. Skromne jednoskrzydłowe, ramowo-płycinowe drzwi pełne ozdabiają koliste guzy w narożach środkowej płycinki, a także skromny portal zwieńczony wolutowym naczółkiem z krzyżykiem na osi i sterczynami po bokach. Eklektyczna stolarka, z tego samego okresu, występuje również w głównym wejściu do klasztoru od strony wschodniej. Jednoskrzydłowe drzwi z prześwitem i nadświetlem ujęte są skromnym portalem zamknięty trójkątnym naczółkiem podbudowanym wolutowymi motywami po bokach. W klasztorze uwagę zwracają jeszcze drzwi w korytarzu prowadzącym do zakrystii pochodzące z 1 ćw. XX wieku. Są typowymi drzwiami ramowo-płycinowymi z prześwitem, na czopowych zawiasach, lecz uwagę skupia przeszklenie z trawionej szyby. Na szybie znajduje się secesyjna dekoracja kwiatowa, a górą napis „Apteka Pod Opatrznością Boską". Apteka ta znajdowała się na rogu ulic Lubelskiej i Grunwaldzkiej, należała do Feliksa i Heleny Wojciechowskich i funkcjonowała już w 1912 roku[13]. W tym czasie szyby trawione były sprowadzone do Jarosławia z warsztatów szklarskich we Lwowie, więc były towarem deficytowym i nie każdy mógł sobie na nie pozwolić. Brak jest informacji jak szyba znalazła się w klasztorze.



5) 6) 7) 8)

Fot. 5-8. Zamki i klamki w zakrystii przy kościele pw. Matki Bożej Bolesnej

Photos 5-8. The locks and door handles in the sacristy by the church dedicated to Our Lady Sorrows

[13] Por. Zięba Z., Dawni aptekarze jarosławscy (w:) Biuletyn Informacyjny Miasta Jarosławia, nr 10, 2008, s. 21-22.

Z eklektyczną stolarką spotykamy się także w kościele i klasztorze oo. franciszkanów przy ul. Jana Pawła II. Mimo, iż barokowe założenie zachowało się z niemal kompletnym oryginalnym wyposażeniem, stolarka drzwiowa uległa wymianie, w dużej mierze na początku XX wieku. Reguła franciszkańska zapewne nie pozwoliła na bogato dekorowane drzwi i można przypuszczać, że te pierwotne były jeszcze skromniejsze od obecnych, wykonanych w duchu stylów historyzujących. Do kościoła prowadzą masywne dwuskrzydłowe drzwi ramowo-płycinowe, których płyciny zdobią snycerskie dekoracje z motywem herbu franciszkanów. Wyróżniają się one także ozdobną klamką z motywem żołędzi i powycinanym finezyjnie szyldem (chociaż wtórna posiada interesujący wygląd). W kościele zachowały się ponadto dwuskrzydłowe drzwi w kruchcie, konstrukcji ramowo-płycinowej, z prześwitami i nadświetlem. Ujęte są one drewnianym portalem z gierowanym naczółkiem i sterczynami po bokach. Prześwity rozczłonkowane szprosami z motywem karo pośrodku przeszklone zostały szkłem białym, szlifowanym, natomiast prostokątne nadświetle, rozdzielone słupkiem oraz pionowymi i poziomymi szprosami, szkłem białym i barwionym w masie: kobaltowym i rubinowym.[14] Uwagę zwraca także dwoje drzwi w prezbiterium, prowadzących do klasztoru, podobnych pod względem konstrukcji i formy. Pierwsze ozdobione są monogramem maryjnym, drugie motywem herbowym zakonu franciszkanów. Są to drzwi jednoskrzydłowe, ramowo-płycinowe, w których ramiak w osi pionowej wraz z poprzecznym - górnym tworzą krzyż z wpisaną na skrzyżowaniu stylizowaną dekoracją snycerską, ujętą kolistym otokiem. Utworzone płyciny ujmują wąskie profilowane prętawiny.



9)



10)



11)

Fot. 9-11. Drzwi z kościoła i klasztoru oo. Franciszkanów (OFM)

Pfotos 9-11. The doors from the church and monastery of the Franciscan Reformatory

[14] Niestety skrzydła drzwiowe są nowe. Chociaż wykonane na wzór wcześniejszych, nie powtarzają technologii wykonania i przeszklenia, które było analogiczne do szybek w nadświetlu.

Drzwi w kościele oraz w klasztorze powstały na początku XX wieku w ramach prac remontowych i renowacyjnych założenia[15]. Wykonane zostały z drewna dębowego, jako ościeżnicowe, konstrukcji ramowo-płycinowej i zawieszone na czopowych lub tarczowych zawiasach. Drzwi zewnętrzne do klasztoru i wewnętrzne w furcie ujęte są skromnymi portalami z trójkątnymi naczółkami. Najciekawsze są drzwi w furcie, z ażurową, żelazną kratką do komunikowania się, a także mechanizmem pozostałym po dzwonku, który niestety został zdemontowany. Świadectwem jest pozostający w opasce drzwiowej „kołowrotek". Drzwi te zawieszone są na tarczowych zawiasach na kształt wachlarzy i opatrzone skrzynkowym zamkiem ozdobionym ażurową rozetą. W klasztorze zachowało się także dwoje eklektycznych drzwi prowadzących do chóru zakonnego. W krosnowych odrzwiach, ramowo- płycinowe skrzydła zawieszone na czopowych zawiasach ujęte są po bokach pilastrami wspierającymi ślemię i półkoliste nadświetle. Zostało one rozczłonkowane szprosami na kształt półrozety i przeszklone szkłem białym i barwionym w masie. Drugie, mniejsze drzwi z chóru, są również krosnowe i ramowo-płycinowe, lecz pełne i zamknięte nadświetlem o łuku odcinkowym z wpisanym pośrodku motywem koła.

W latach 1873-1875 wzniesione zostało w Jarosławiu, na miejscu dawnego folwarku jezuickiego, założenie klasztorne Sióstr Niepokalanego Poczęcia NMP. Do klasztoru prowadzi drewniany ganek ze skromną, oryginalną stolarką z czasu budowy. Zachowały się w nim oryginalne przeszklenia, a w drzwiach zawiasy oraz klamka z ozdobnym szyldzikiem. Drzwi wejściowe do klasztoru są podwójne, dwuskrzydłowe, ramowo-płycinowe, pełne. Pierwotna stolarka zachowała się także w wejściu do zakrystii przy kaplicy klasztornej (od strony dziedzińca wewnętrznego). Są to drzwi podwójne, jednoskrzydłowe, pełne, z nadświetlem. Zewnętrzne – stanowią jedyne zachowane w klasztorze drzwi deskowe, wzmocnione dwoma szpungami i opierzone deseczkami ułożonymi koncentrycznie wokół rombu. Zawieszone są one na hakach do drewna z podpórką. W wnętrzu klasztoru wyróżniają się drzwi prowadzące do kaplicy – dwuskrzydłowe, ramowo-płycinowe, pięciopoziomowe, z krzyżykiem w zwieńczeniu. Ich płyciny ujęte są szerokimi prętawinami[16]. Uwagę zwracają także drzwi krosnowe w ściankach stanowiących przepierzenie klasztornych korytarzy. Są one w większości przeszklone w górnych partiach skrzydeł, posiadają oryginalne okucia, czopowe zawiasy i mosiężne klamki. W klasztorze zachowała się również oryginalna stolarka ramowo-płycinowa w wejściach do cel oraz innych pomieszczeń pozostających wyłącznie do dyspozycji sióstr niepokalanek.

W stosunkowo dużym zespole stolarki wyróżniają się drzwi, a właściwie wrota do kaplicy grobowej na pobliskim cmentarzu klasztornym, gdzie siostry chowane są do dnia dzisiejszego. W zamknięty półkoliście otwór wstawione są dwuskrzydłowe drzwi ramowo-płycinowe z nadświetlem. Dolne prostokątne płyciny dekorowane są pośrodku motywem rozetki, górne przecięte na skos ramia-

[15] Gotfried K., Kościół i klasztor ojców Reformatów w Jarosławiu, Jarosław, 1934, s. 51.
[16] Drzwi zostały w ostatnich latach odnowione poprzez usunięcie nawarstwień malarskich, prawdopodobnie pierwotnie były zabezpieczone warstwą kryjącą, obecnie lakierem bezbarwnym.

kami wyciętymi od dołu łukiem wklęsłym, symetrycznie względem listwy przymykowej. Listwa kanelowana w partii cokołowej zwieńczona jest w górze toczoną głowicą ze żłobieniami. Ciężkie wrota zawieszone na krzyżowych zawiasach, zamykane są żeliwnymi klamkami i wpuszczanym zamkiem. W nadświetlu brak jest przeszklenia, występuje tylko krata z płaskownika, z motywem krzyża na osi oraz ślimacznicami i kołami w przyłuczu.

Na zakończenie słów kilka o drzwiach w jednym z najstarszych kościołów, chociaż stolarka w nim jest najmłodsza spośród omawianej. Niestety w kościele pojezuickim, obecnej kolegiacie pw. Bożego Ciała, pożar w 1862 roku strawił wiele elementów wyposażenia i wystroju. Do najstarszych zatem należą drzwi w prezbiterium kościoła. Są one formalnie i stylistycznie połączone ze stallami usytuowanymi po bokach wejścia. Wykonał je Stanisław Cholewa z Jarosławia w 1912 roku i zapewne on jest autorem stolarki[17], której dolne płyciny zdobi stylizowana dekoracja snycerska o motywach rokokowych, kratki regencyjnej i stylizowanych muszli. (Podobnie dekorowane są ościeżnice.) Są to drzwi dwuskrzydłowe z prześwitami przeszklonymi szkłem ornamentowym. Prześwity w dolnej partii były pierwotnie zabezpieczone poziomymi prętami metalowymi (obecnie wycięte).

W zakrystii, dobudowanej do kościoła w 1928 roku (po rozbiórce części dawnego kolegium jezuickiego) znajdują się wahadłowe drzwi ramowo-płycinowe z prześwitami i nadświetlem. Ponadto oryginalne drzwi prowadzą do „nowej i starej zakrystii". Te z „nowej" – dwuskrzydłowe, ramowo-płycinowe, pełne – utrzymane są w duchu stolarki klasycyzującej, z promieniście puklowaną pośrodku elipsą. Natomiast dwuskrzydłowe drzwi ze „starej" zakrystii wyróżniają płyciny z wciętymi narożami.

Podobne do wyżej wymienionych drzwi wahadłowych znajdują się także przy bocznym wejściu do kościoła i pełnią analogiczną funkcję wiatrołapu.

4. Podsumowanie

Z dokonanej syntetycznej analizy zachowanej historycznej stolarki drzwiowej w obiektach sakralnych wynika, iż mimo tak dużego procentu zniszczenia oryginałów zachowały się jednostkowe przykłady drzwi barokowych oraz historyzujących – łączących elementy późniejszych stylów. Naturalnie ich rolą nadrzędną jest funkcja użytkowa – zabezpieczenie obiektu, lecz pełnią one także rolę ozdoby zarówno elewacji jak i wnętrza, są granicą pomiędzy przestrzeniami o różnym znaczeniu. Urastają one do rangi symbolu i znaku pamięci. Dlatego omawiane drzwi powinny podlegać ścisłej ochronie, nawet jeżeli ich forma nie przedstawia wysokiej rangi artystycznej. Skoro przetrwały one dwa, trzy wieki i funkcjonują do dnia dzisiejszego, potwierdzają, iż „stare" drzwi przedstawiają wysoką jakość materiału i wykonania. Historyczna stolarka wymaga inwentaryzacji, dalszych badań, a przede wszystkim konserwacji i dbałości o zachowanie jej dla przyszłych pokoleń.

[17] Turczak Ł., Stalle, Karta ewidencyjna zabytku ruchomego, zb. Archiwum Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków w Przemyślu.

Wykaz historycznej stolarki drzwiowej zachowanej w obiektach sakralnych na terenie miasta Jarosławia

Kościół pw. Św. Ducha

1. Drzwi główne, k. XVII w., bez odrzwi, jednoskrzydłowe, deskowo-szpungowe, obite blachami, na hakach murowych, zawiasach pasowych, zamki skrzynkowe, XVIII w.(?) i XIX w.
2. Drzwi boczne, k. XVII w., bez odrzwi, jednoskrzydłowe, deskowo-szpungowe, obite blachami, na hakach murowych, zawiasach pasowych, zamek skrzynkowy, k. XVII w.

Zespół kościelno-klasztorny oo. Dominikanów

1. Drzwi zewnętrzne w transepcie (od północy), 1 ćw. XVIII w., bez odrzwi, dwuskrzydłowe, deskowo-szpungowe, obite blachami, na hakach murowych, zawiasach pasowych, z zaporą drewnianą, zamykane kłódką (klucz nowy, dorobiony do oryginalnego mechanizmu).
2. Drzwi zewnętrzne w transepcie (od południa), j.w.
3. Drzwi wewnętrzne z kruchty do nawy głównej, 1 ćw. XVIII w., bez odrzwi, dwuskrzydłowe, deskowo-szpungowe, obite blachami, na hakach murowych, zawiasach pasowych. Brak oryginalnej zapory.
4. Drzwi wewnętrzne z prezbiterium do skarbca, 1 ćw. XVIII w., jednoskrzydłowe, deskowo-szpungowe, obite blachami, na zawiasach pasowych, hakach do drewna, zamek skrzynkowy, 1 ćw. XVIII w., klucz oryginalny.
5. Drzwi wewnętrzne z prezbiterium do zakrystii, 1 ćw. XVIII w., bez odrzwi, jednoskrzydłowe, deskowo-szpungowe, obite blachami, na zawiasach pasowych, ślady na desce po zamku skrzynkowym zamkniętym w formie trójliścia.
6. Drzwi na chór, k. XIX w., ościeżnicowe, jednoskrzydłowe, pełne, zawiasy czopowe, zamek wpuszczany.
7. Drzwi zewnętrzne do klasztoru, k. XIX w., ościeżnicowe, jednoskrzydłowe, ramowo-płycinowe z prześwitem i nadświetlem, zawiasy czopowe.
8. Drzwi z zakrystii do klasztoru (I), 2 poł. XIX w., ościeżnicowe, jednoskrzydłowe, ramowo-płycinowe, zawiasy czopowe, zamek skrzynkowy, kluczynka w formie tarczy ostro zakończonej dołem.
9. Drzwi z zakrystii do klasztoru (II), 1 ćw. XVIII w., ościeżnicowe, jednoskrzydłowe, deskowe opierzane dekoracją pseudopłycinową, zawiasy pasowe (ścięte), nowe zawiasy: czopowe, zamek skrzynkowy, szyld wycięty dekoracyjnie.
10. Drzwi w korytarzu klasztornym, 1 poł. XVIII w., ościeżnicowe, jednoskrzydłowe, ażurowe, zawiasy szarnierowe, klamka współczesna.
11. Drzwi w klasztorze (z napisem w szybie), 1 ćw. XX w., ościeżnicowe, jednoskrzydłowe, ramowo-płycinowe, z prześwitem przeszklonym szkłem białym trawionym, zamek i klamka współczesne.
12. Drzwi do cel klasztornych, 1 poł. XIX w. (?), ościeżnicowe, jednoskrzydłowe, ramowo-płycinowe, pełne, zawiasy esowe, klamki współczesne.

Zespół kościelno-klasztorny oo. Franciszkanów (OFM)

1. Drzwi główne do kościoła, p. XX w., ościeżnicowe, dwuskrzydłowe, ramowo-płycinowe, zawiasy czopowe, zamek wpuszczany.
2. Drzwi boczne do kościoła, XX w., ościeżnicowe, jednoskrzydłowe, ramowo-płycinowe, zawiasy czopowe, zamek wpuszczany.
3. Drzwi z kruchty do nawy głównej, p XX w., dwuskrzydłowe, ramowo-płycinowe z prześwitami i nadświetlem, zawiasy czopowe.
4. Drzwi z prezbiterium do klasztoru (I) p. XX w., ościeżnicowe, jednoskrzydłowe, ramowo-płycinowe, pełne, z monogramem maryjnym, zawiasy czopowe, zamek wpuszczany .
5. Drzwi z prezbiterium do klasztoru (II) p. XX w., ościeżnicowe, jednoskrzydłowe, ramowo-płycinowe, pełne, z herbem zakonu franciszkanów, zawiasy czopowe, zamek wpuszczany .
6. Drzwi do furty klasztornej, p. XX w., ościeżnicowe, jednoskrzydłowe, ramowo-płycinowe, pełne, zawiasy tarczowe, zamek skrzynkowy.
7. Drzwi z furty do klasztoru, j.w.
8. Drzwi w klasztorze na dawną klatkę schodową, p. XX w., ościeżnicowe, dwuskrzydłowe, ramowo-płycinowe, z prześwitami, zawiasy czopowe, zamek wpuszczany.
9. Drzwi w chórze zakonnym (I), p. XX w., krosnowe, z nadświetlem, dwuskrzydłowe, ramowo-płycinowe z prześwitami, zawiasy czopowe, zamek wpuszczany
10. Drzwi w chórze zakonnym (II), p. XX w., krosnowe, z nadświetlem, dwuskrzydłowe, ramowo-płycinowe, pełne, zawiasy czopowe, zamek wpuszczany.

Klasztor Zgromadzenia Sióstr Niepokalanego Poczęcia Najświętszej Marii Panny

1. Drzwi zewnętrzne do zakrystii przy kaplicy klasztornej, k. XIX w., ościeżnicowe, deskowo-szpungowe, opierzane, na hakach do drewna z podpórką, zamek wpuszczany, klamka żeliwna.
2. Drzwi do ganku klasztornego, k. XIX w., jednoskrzydłowe, ramowo-płycinowe, z prześwitem, zawiasy czopowe, zamek wpuszczany, klamka mosiężna z ozdobnym szyldem.
3. Drzwi z ganku do klasztoru, k. XIX w., ościeżnicowe, podwójne, dwuskrzydłowe, ramowo-płycinowe, pełne, zawiasy czopowe, zamki wpuszczane, klamki mosiężne, kluczynki ozdobne.
4. Drzwi do kaplicy klasztornej (I), k. XIX w., ościeżnicowe, dwuskrzydłowe, ramowo-płycinowe, pełne, zawiasy czopowe, zamek wpuszczany, klamka mosiężna.
5. Drzwi do kaplicy klasztornej (II), k. XIX w., ościeżnicowe, dwuskrzydłowe, ramowo-płycinowe, pełne, z nadświetlem, zawiasy czopowe, zamek wpuszczany, klamka mosiężna.

6. Drzwi do kaplicy grobowej na terenie przyklasztornego cmentarza, 1 poł. XX w., ościeżnicowe, dwuskrzydłowe, z nadświetlem, ramowo-płycinowe, pełne, zawiasy krzyżowe, zamek wpuszczany, klamki żeliwne.

Kolegiata Bożego Ciała

1. Drzwi w prezbiterium, 1912 r., Stanisław Cholewa, krosnowe, dwuskrzydłowe, z nadświetlem, ramowo-płycinowe, z prześwitami, szyby ornamentowe, klamka mosiężna.
2. Drzwi przy wejściu bocznym do kościoła, l.30 XX w., krosnowe, wahadłowe, dwuskrzydłowe, z nadświetlem, ramowo-płycinowe, z prześwitami, klamki w formie uchwytów mosiężne.
3. Drzwi przy wejściu do zakrystii, j.w.
4. Drzwi do „nowej zakrystii", l.30. XX w., dwuskrzydłowe, ramowo-płycinowe, pełne, zamek i klamka współczesne.
5. Drzwi do „starej zakrystii", l.30. XX w., dwuskrzydłowe, ramowo-płycinowe, pełne, zamek wpuszczany, nieużytkowany, klamka współczesna.

Literatura

[1] Forstner D. OSB, hasło: drzwi (w:) Świat symboliki chrześcijańskiej, Warszawa 1990, s. 383-386.
[2] Gotfried K., Kościół i klasztor ojców Reformatów w Jarosławiu, Jarosław, 1934.
[3] Lurker M., Słownik obrazów i symboli biblijnych, Poznań 1989, s. 50-52.
[4] Makara J. ks., Parafia Łacińska w Jarosławiu, t. II, Jarosława 1950, mszps w zb. Archiwum Muzeum Kamienica Orsettich w Jarosławiu.
[5] Orłowicz M., Jarosław. Jego przeszłość i zabytki, Lwów 1921.
[6] Miazek J. ks., Otwarcie drzwi świętych w Roku Jubileuszowym, Warszawskie Studia Teologiczne, T. XIII, 2000, s. 7-16.
[7] Turczak Ł., Stalle, Karta ewidencyjna zabytku ruchomego, zb. Archiwum Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków w Przemyślu.
[8] Zięba Z., Dawni aptekarze jarosławscy (w:) Biuletyn Informacyjny Miasta Jarosławia, nr 10, Jarosław 2008.
[9] Zubrzycki J.S., Miasto Jarosław i jego zabytki., Kraków 1903.

HISTORIC WOODWORK DOOR IN JAROSŁAW SACRAL OBJECTS

S u m m a r y (*Translated by Jarosław Kiwior***)**

Doors have special meaning for sacred objects, they serve as collateral interior, they are adornment, they define the boundary between the sacred and the profane and grow into a symbol and sign of memory. The aim of the study is to identify and recognize the historic woodwork in Jarosław sacral objects, its analysis in terms of materials science, building construction and decoration techniques, style and iconography and the state of preservation. In Jarosław baroque door unit at the end of the seventeenth and eighteenth centuries has been preserved and historicizing the door of the 2nd half nineteenth and early twentieth century. Baroque woodwork with original fittings (hinges, hooks, door handles, escutcheons, locks, padlocks, and even preserved keys) the church door represents in the dedicated to Holy Spirit and in the church dedicated to Our Lady of Sorrows. The openwork door to motif 'IHS' at carving frame, which located in the Dominican monastery, pays special attention. Big unit of the original woodwork in the last quarter of the nineteenth century was preserved in the monastery Congregatio Sororum Servularum Beatae Mariae Virginis Immaculatae Conceptae. On the other hand, the firstt half of twentieth century represents a historicizing door of the neo-baroque and rococo woodcarving, which is located in the Franciscans complex church and monastery (Ordo Fratrum Minorum) and the collegiate church dedicated to Corpus Christi. On a scale of high-ranking church-monastery complexes, which occur in Jarosław, preserved original doors are a small but significant group so they deserve protection and undertaking further research.

Keywords: antique/historic woodwork, door, Jarosław, sacral objects

Przesłano do redakcji: 26.02.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.72

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 441-448

Jarosław STRZAŁKOWSKI[1]
Halina GARBALIŃSKA[2]

TRANSMITANCJE CIEPLNE DWUWARSTWOWYCH ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH ZRÓŻNICOWANYCH MATERIAŁEM NOŚNYM

W niniejszej pracy poddano analizie zbiór danych dotyczących dynamicznych charakterystyk cieplnych ścian zewnętrznych o różnie dobranej pod względem materiałowym warstwie konstrukcyjnej. Główny cel stanowiło poszukiwanie rozwiązań przegród, które nie tylko zapewniać będą odpowiednio wysoką izolacyjność cieplną, ale które umożliwią magazynowanie energii oraz odpowiednie jej wykorzystanie w zależności od zmieniających się warunków środowiska zewnętrznego. Obliczenia wykonano dla przegród z warstwą nośną z rozmaitych kompozytów betonowych (na bazie kruszyw lekkich keramzytu i popiołoporytu, w dwóch wariantach z domieszką napowietrzającą i bez), betonu komórkowego, litego drewna klejonego oraz innych typowych materiałów małowymiarowych: cegły silikatowej oraz cegły dziurawki. Wyznaczono rozkłady transmitancji cieplnej w zależności od przyjętego okresu wahań temperatury. Obliczono również współczynniki tłumienia oraz powierzchniowe pojemności cieplne przegród dla okresów wahań temperatury równych 24h oraz 168h. Wyniki wskazują, że uwzględnienie ciepła właściwego materiałów umożliwia bardziej precyzyjną ocenę przegrody pod względem cieplnym. Bardzo dobre właściwości tłumiące przegrody uzyskano dla kompozytów betonowych oraz litego drewna klejonego. Otrzymane dane sugerują, że tego typu rozwiązania powodują zredukowanie amplitud chwilowych strumieni ciepła w krótkich okresach wahań temperatury w porównaniu do materiałów o niskim cieple właściwym. Zaostrzone przepisy Dyrektywy 2010/31/UE wskazują na potrzebę szerszego rozpatrzenia problemu i zasadność analizowania przegród w niestacjonarnych warunkach temperaturowych.

Słowa kluczowe: ściany zewnętrzne, transmitancja cieplna, pojemność cieplna, dynamiczne charakterystyki cieplne, ciepło właściwe

---

[1] Autor do korespondencji: Jarosław Strzałkowski, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, 91-449-43-41, jstrzalkowski@zut.edu.pl

[2] Halina Garbalińska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, 91-449-42-91, Halina.Garbalinska@zut.edu.pl

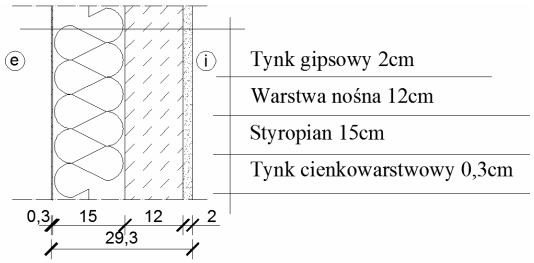
1. Wstęp

Wprowadzenie nowej dyrektywy unijnej 2010/31/UE dotyczącej charakterystyki energetycznej budynków nakłada na projektantów konieczność spełnienia coraz bardziej restrykcyjnych wymagań dotyczących energooszczędności. Wdrażane zmiany mają zaskutkować powstawaniem po 2021 r. wyłącznie budynków o niemal zerowym zużyciu energii. Dlatego też istotnym aspektem może być poszukiwanie rozwiązań przegród, które nie tylko zapewniać będą odpowiednio wysoką izolacyjność cieplną, ale które umożliwią magazynowanie energii oraz odpowiednie jej wykorzystanie w zależności od zmieniających się warunków środowiska zewnętrznego. W niniejszej pracy przeanalizowano wpływ użytego materiału warstwy nośnej, w dwuwarstwowej ścianie zewnętrznej, na transmitancję cieplną dla różnych okresów wahań temperatury.

2. Dynamiczne charakterystyki cieplne

2.1. Opis przegrody

W artykule poddano analizie ściany zewnętrzne dwuwarstwowe z wariantowo przyjętym materiałem konstrukcyjnym. Schemat analizowanej przegrody przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Schemat przegrody poddanej analizie

Fig. 1. Scheme of the analysed wall

Przyjęto grubość warstwy nośnej 12 cm - identyczną dla wszystkich wariantów, tak aby istniała możliwość bezpośredniego porównania otrzymanych wyników. Ustalona grubość została przyjęta tak, aby nie faworyzować żadnego z wariantów. Punktem wyjścia był fakt, że ściany z drewna monolitycznego projektuje się do grubości 12 cm. Założono ponadto, że wszystkie przegrody powinny spełniać minimalne wymagania dotyczące izolacyjności cieplnej, zgodnie z [4]. Osiągnięto to poprzez zastosowanie stałej grubości materiału termoizolacyjnego równego 15 cm. W obliczeniach uwzględniono również warstwy tynków oraz powierzchniowe opory przejmowania ciepła. Parametry modelowanej przegrody podano w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry poszczególnych warstw ściany zewnętrznej

Table 1. Parameters of the particular layers of the external wall

Lp.	**Nazwa**	d m	λ W/(m·K)	ρ kg/m^3	c_v MJ/(m^3·K)
1	tynk gipsowy	0,020	0,40	1000	1,00
2	warstwa nośna	0,120	tab. 2	tab. 2	tab. 2
3	styropian	0,150	0,04	30	0,042
4	tynk cienkowarstwowy	0,003	1,00	1800	1,80

Analizie poddano dziewięć przegród o różnie dobranych materiałach konstrukcyjnych, których podstawowe właściwości fizyczne przedstawiono w tabeli 2. Pierwsze cztery materiały to kompozyty betonowe bazujące na kruszywach lekkich: keramzycie (K) i kruszywie popiołoporytowym (P), w dwóch wariantach – napowietrzonym (A) oraz nienapowietrzonym (N). Receptury betonów oraz ich szczegółowa charakterystyka znajduje się w [5][5]. Obliczenia wykonano również dla ściany żelbetowej oraz typowych rozwiązań bazujących na elementach małowymiarowych dostępnych na rynku. Dodatkowo sprawdzono również system HBE, który jako element nośny wykorzystuje lite drewno sosnowe lub świerkowe, klejone warstwowo. Właściwości fizyczne tych materiałów przyjęto na podstawie normy [3].

Tabela 2. Materiałowe parametry poszczególnych warstw nośnych

Table 2. Material parameters of the particular load bearing layers

Lp.	**Materiał**	λ W/(m·K)	ρ kg/m^3	c_v MJ/(m^3·K)
1	K/N	0,68	1,42	1,740
2	K/A	0,46	1,12	1,540
3	P/N	1,05	1,82	1,770
4	P/A	0,69	1,54	1,610
5	Żelbet	1,70	2,20	1,848
6	Beton komórkowy 600	0,21	0,60	0,504
7	Silikat drążony	0,80	1,60	1,408
8	Cegła kratówka	0,56	1,30	1,144
9	System HBE	0,16	0,55	1,381

2.2. Metoda badawcza

Obliczenia dynamicznych charakterystyk cieplnych wykonano na podstawie [2]. Dla wszystkich dziewięciu wariantów i różnych okresów wahań temperatury wyznaczono macierze przejścia Z. Na tej podstawie możliwe jest powiązanie amplitud zespolonych temperatury i strumienia ciepła pod jednej stronie z warunkami po stronie przeciwnej przegrody, co przedstawia zależność:

$$\begin{bmatrix}\widehat{\Theta}_e\\ \hat{q}_e\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}Z_{11} & Z_{12}\\ Z_{21} & Z_{22}\end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix}\widehat{\Theta}_i\\ \hat{q}_i\end{bmatrix} \tag{1}$$

Powyższe równanie umożliwia określenie wielkości amplitudy zespolonej temperatury i strumienia ciepła, jeżeli znane są te wartości po drugiej stronie. Amplitudy zespolone pozwalają z kolei na określenie wielkości amplitudy harmonicznie zmieniającej się funkcji (moduł tej liczby) oraz przesunięcia fazowego (argument z liczby zespolonej). Amplitudy zespolone przedstawia się jako postać wykładniczą liczby zespolonej w następującej formie:

$$\widehat{\Theta}_{\pm} = \left|\widehat{\Theta}\right| \cdot e^{\pm i\psi} \tag{2}$$

$$\hat{q}_{\pm} = |\hat{q}| \cdot e^{\pm i\varphi} \tag{3}$$

Zakłada się, że temperatury po obu stronach przegrody oscylują wokół wartości średnich, a strumienie ciepła zmieniają się wokół wartości równej:

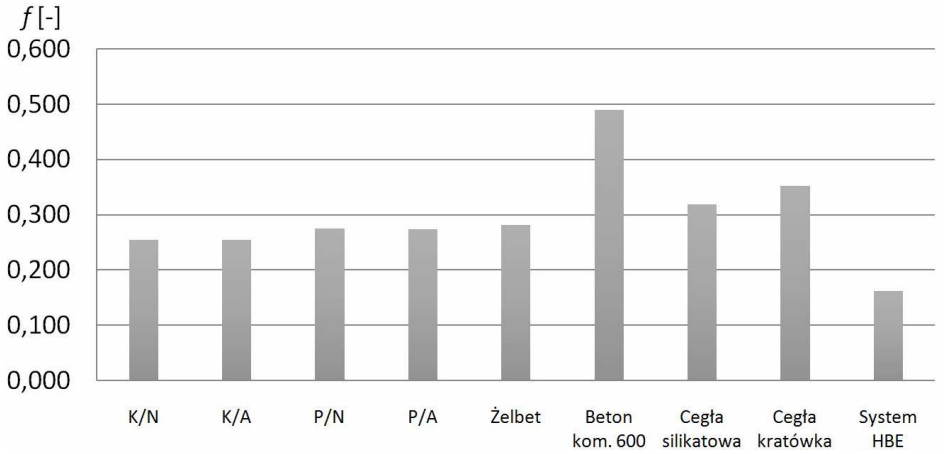
$$\bar{q} = U \cdot (\Theta_i - \Theta_e) \tag{4}$$

Na podstawie równania (1) obliczono także wartości transmitancji cieplnej Y_{12} dla zmiennego okresu wahań temperatury przy powierzchniach od 1 do 720 godzin. Obliczono także współczynniki tłumienia f oraz wewnętrzne powierzchniowe pojemności cieplne K_1 dla dwóch okresów wahań równych 24 oraz 168 godzin. Szczegółowy sposób obliczeń przedstawiono w [1].

3. Wyniki analizy

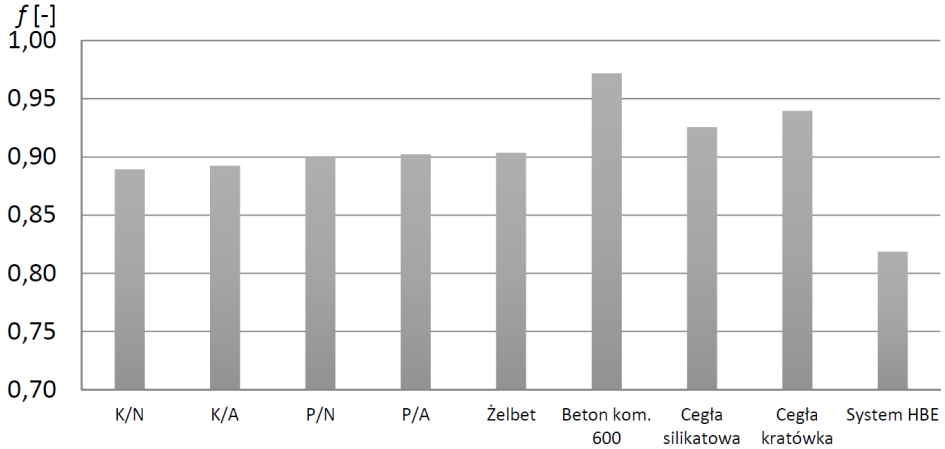
Na rysunku 2 przedstawiono współczynniki tłumienia f dla okresu wahań równego 24 h. Widoczna jest wyraźna dysproporcja między ścianą wykonaną z betonu komórkowego a pozostałymi materiałami. Najlepsze parametry tłumienia uzyskano dla systemu HBE, który w czasie nagłych zmian temperatury zewnętrznej, w krótkich okresach wahań uzyskuje transmitancję cieplną na poziomie 15–20 % wartości współczynnika przenikania ciepła U. Także ściany z warstwami nośnymi wykonanymi z betonu zbrojonego i lekkich kompozytów betonowych zapewniały dosyć dobre współczynniki tłumienia. Kompozyty betonowe pomimo mniejszej gęstości objętościowej wykazywały bardzo dobre parametry w porównaniu do żelbetu.

Rysunek 3 przedstawia współczynniki tłumienia dla okresu wahań temperatury równego jeden tydzień. Dla tak przyjętego okresu beton komórkowy uzyskał wartości zbliżone do jedności. Ponownie wyróżnia się system HBE, którego transmitancja cieplna jest o ok. 18 % mniejsza niż obliczeniowy współczynnik przenikania ciepła U. Przy dużych wahaniach temperatury zewnętrznej daje to możliwość zredukowania wielkości wahań temperatury w pomieszczeniu.



Rys. 2. Współczynniki tłumienia dla okresu wahań równego 24 h

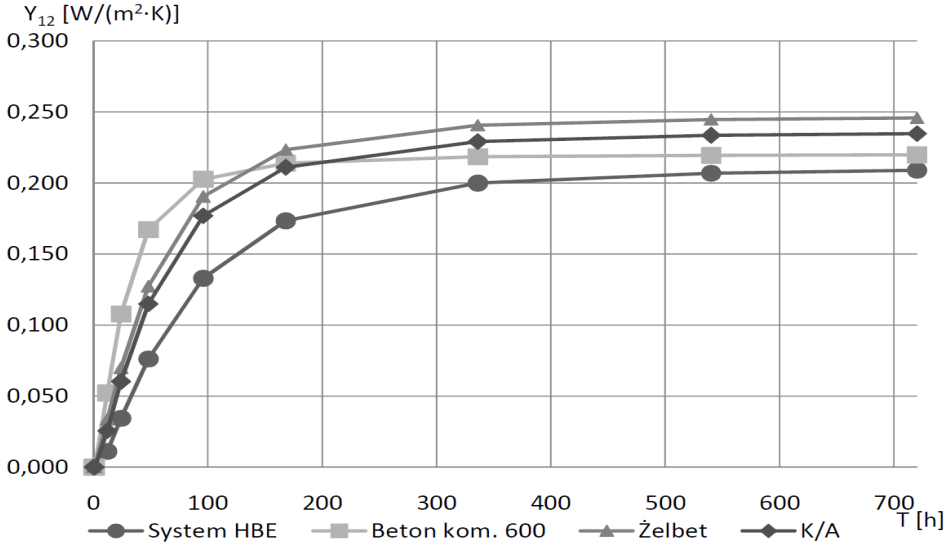
Fig. 2. Damping coefficients for the temperature fluctuations period of 24 h



Rys. 3. Współczynniki tłumienia dla okresu wahań równego 168 h

Fig. 3. Damping coefficients for the temperature fluctuations period of 168 h

Na rysunku 4 zestawiono rozkłady transmitancji cieplnych w zależności od przyjętego okresu wahań temperatury powierzchni przegrody. Przedstawiono wyłącznie cztery wybrane krzywe, które najlepiej oddają różnice między materiałami o różnych właściwościach cieplnych. Otrzymane wykresy charakteryzują się asymptotą poziomą równą współczynnikowi przenikania ciepła *U* danego wariantu. Istotny jest sposób w jaki krzywa transmitancji przyrasta w krótkich okresach wahań temperatury. Im łagodniejszy jest przyrost transmitancji, tym chwilowa gęstość strumienia ciepła będzie mniejsza niż wartość średniej gęstości strumienia w funkcji współczynnika przenikania ciepła. Najkorzystniejsze krzywe transmitancji uzyskano dla systemu HBE. Nawet dla okresu wahań równego 150 godzin

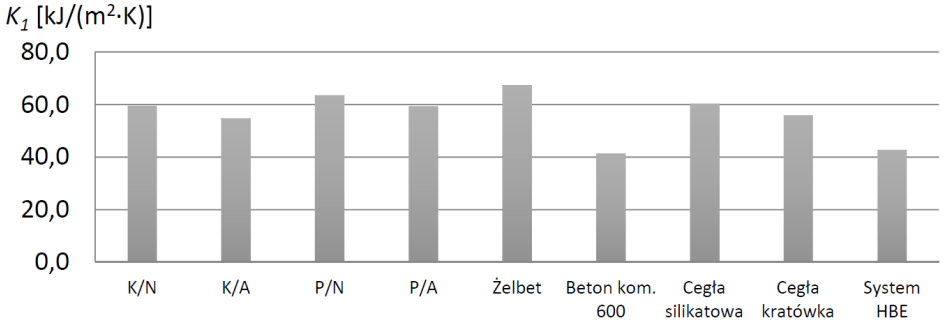


Rys. 4. Transmitancja cieplna ścian zewnętrznych w zależności od okresu wahań

Fig. 4. Thermal transmittance of external walls in correlation with the fluctuation period

taka konstrukcja zapewnia zdecydowanie mniejsze wartości chwilowego strumienia ciepła, niż wartości uzyskane na podstawie współczynnika przenikania ciepła. Natomiast konstrukcja z warstwą nośną z betonu komórkowego bardzo szybko uzyskuje poziom wartości równej współczynnikowi *U*, co świadczy o zdecydowanie słabszych parametrach tłumienia takiej przegrody. Dosyć dobrze plasują się również konstrukcje wykonane na bazie betonu, mimo że współczynniki przenikania ciepła *U* tych rozwiązań są większe.

W niniejszym artykule porównano również powierzchniowe pojemności cieplne. Wartości dla okresu wahań równego 24 h przedstawiono na rysunku 5. Największe pojemności otrzymano dla wariantów z warstwą nośną z kompozytów betonowych i żelbetu. Jest to efekt odpowiedniego dobrania ciepła

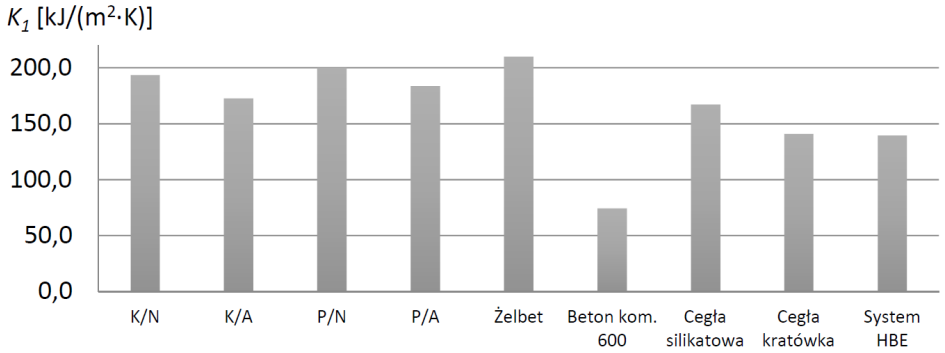


Rys. 5. Wewnętrzne powierzchniowe pojemności cieplne dla okresu wahań równego 24 h

Fig. 5. Internal surface heat capacities for the 24 h fluctuation period

właściwego c_v i współczynnika przenikania ciepła λ. Zdecydowanie mniejsze wartości otrzymano dla betonu komórkowego i systemu HBE. Wynika to ze stosunkowo niskiej przewodności cieplnej tych materiałów.

Dla dłuższych okresów wahań temperatury (168 godzin – rys. 6) uzyskano jeszcze większe różnice w zależności od zastosowanego materiału warstwy nośnej. Im dłuższy okres wahań, tym większy wpływ na pojemność cieplną będzie miało ciepło właściwe materiału, natomiast współczynnik przewodzenia ciepła λ nie jest już tak istotny. Dlatego też bardzo niekorzystnie w zestawieniu plasuje się beton komórkowy, którego powierzchniowa pojemność cielna jest prawie trzykrotnie mniejsza niż pojemność przegród betonowych.



Rys. 6. Wewnętrzne powierzchniowe pojemności cieplne dla okresu wahań równego 168h

Fig. 6. Internal surface heat capacities for the 168h fluctuation period

4. Podsumowanie

Analiza przegród budowlanych z aspekcie dynamicznych właściwości cieplnych użytych materiałów w konstrukcji ściany, umożliwia szersze oraz bardziej precyzyjne określenie zachowania się przegrody budowlanej. Uwzględnienie w obliczeniach wartości ciepła właściwego materiałów skutkuje dużym zróżnicowaniem wyników uzyskanych dla różnych materiałów warstwy nośnej przegrody. Sam współczynnik przenikania ciepła nie daje możliwości porównania rozmaitych systemów budowlanych w złożonych warunkach cieplnych.

Zastosowanie materiałów o dużym cieple właściwym zapewnia istotną redukcję amplitudy chwilowej gęstości strumienia ciepła dla okresu wahań temperatury równego nawet jeden tydzień. Uzasadnione zatem jest wykorzystanie materiałów takich jak kompozyty betonowe, czy drewno klejone jako materiały, które mogą zredukować amplitudę strumienia ciepła oraz temperatury w sytuacji występowania dużych amplitud temperatury środowiska zewnętrznego.

Transmitancja cieplna i inne parametry dynamiczne dają zatem możliwość lepszych i bardziej precyzyjnych analiz służących projektowaniu przegród charakteryzujących się większą energooszczędnością.

Literatura

[1] Garbalińska H., Strzałkowski J.: Analiza porównawcza dynamicznych charakterystyk cieplnych przegród wykonanych z różnych kompozytów betonowych, Inżynieria i Budownictwo, nr 6, 2012, s. 307–311.
[2] PN-EN ISO 13786:2008: Cieplne właściwości użytkowe komponentów budowlanych, Dynamiczne charakterystyki cieplne, Metody obliczania.
[3] PN-EN ISO 6946:1999: Komponenty budowlane i elementy budynku, Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła, Metoda obliczania.
[4] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
[5] Strzałkowski J.: Ocena przydatności wybranych kompozytów betonowych do wznoszenia ścian zewnętrznych, Praca magisterska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, 2012.

THERMAL TRANSMITTANCE IN TWO-LAYER EXTERIOR WALLS WITH VARIOUS CONSTRUCTION MATERIALS

S u m m a r y

In this paper we have analysed thermal dynamic characteristics of exterior walls with variant material solutions of used load-bearing layer. The main purpose was to search for the proper solutions of divisions that not only will provide a sufficiently low thermal insulation properties, but also will allow to store energy and use it, depending on the changing conditions of the external environment. Calculations were made for partitions with structural layer made of concrete composites (based on lightweight aggregate made of expanded clay and llytag, additionally varied by air-entraining admixture), cellular concrete, solid laminated wood and other typical brick solutions like sand-lime and cavity bricks. Curves of transmittance module were analysed, depending on a temperature fluctuation period. Decrement factors and surface heat capacities of partitions were also calculated for periods of temperature fluctuations equal 24 and 168h.The results indicate that the inclusion of the specific heat of materials enables more precise assessment of the energy efficiency of the partition. Very good damping properties were obtained for the walls made of concrete composites and solid laminated wood. The results suggest that such solutions provide a much smaller amplitudes of transient heat flux over short periods of temperature fluctuation compared with the materials of low specific heat. Tightened provisions of Directive 2010/31/EU indicate the need for a broader examination of the problem and grounds the need for analysing partitions in non-stationary temperature conditions.

Keywords: exterior walls, thermal transmittance, heat capacity, dynamic thermal characteristics, specific heat

Przesłano do redakcji: 19.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.73

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 449-458

ILONA SZEFER [1]

EKOINSTALACJE – DETAL ARCHITEKTONICZNO-URBANISTYCZNY JAKO ELEMENT SYSTEMU EKOLOGICZNEGO W MIEŚCIE

Postępujący rozwój nowoczesnych technologii solarnych pozwala na korzystanie z energii Słońca już nie tylko na południu Europy, lecz również w Niemczech, Czechach czy Polsce. Powszechność tego źródła energii odnawialnej pozwala na jej wykorzystanie również w dużo mniejszych instalacjach, takich jak lampy solarne, ławki czy zadaszenia. Są one doskonałym rozwiązaniem szczególnie w miejscach odległych od infrastruktury, do których nieopłacalne jest doprowadzenie energii elektrycznej, co za tym idzie wpływają na obniżenie kosztów związanych ze zużyciem energii. Na całym świecie powstają godne uwagi detale architektoniczne i urbanistyczne pozwalające kształtować i organizować przestrzeń w nowoczesny a zarazem ekologicznie zrównoważony sposób. Do tego typu instalacji można zaliczyć Słoneczne (Solarne) drzewa, drzewa redukujące CO_2 oraz produkujące tlen, ekologiczne ławki, solarne parasole (chroniące przed słońcem oraz produkujące energię elektryczną) czy zadaszenia parkingów i przystanków autobusowych. W świadomości większości z nas zrównoważone i przyjazne dla środowiska są konstrukcje wielkogabarytowe. Często nie zdajemy sobie sprawy, z tego, jaki mała architektura – detale architektoniczno – urbanistyczne – może mieć wpływ na otaczającą nas przestrzeń oraz na nasze samopoczucie. Przedstawione poniżej realizacje oraz koncepcje, nie stanowią tylko ciekawostki czy nowości technologicznych i energetycznych. Stanowią przykład wychodzenia naprzeciw potrzebom, zastanym warunkom pogodowym, oczyszczając powietrze, oświetlając ulice, place, parki, ograniczając koszty oraz emisję szkodliwych gazów do atmosfery. Pozostaje mam wierzyć, że podobnych rozwiązań będzie więcej nie tylko za granicą, ale również w Polsce.

Słowa kluczowe: nowoczesne technologie solarne, odnawialne źródła energii, przestrzeń, środowisko

Na przestrzeni kilku ostatnich lat coraz częściej można usłyszeć o wyraźnych oznakach energetycznego kryzysu na świecie. By przeciwdziałać następującemu procesowi, polityka energetyczna Unii Europejskiej nakłada na kraje członkowskie obowiązek zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w ogólnym bilansie energetycznym. 11 grudnia 2008 roku na szczycie przywódców krajów członkowskich UE w Brukseli wypracowano kompromis w sprawie pakietu

[1] Ilona Szefer, mgr inż. arch., doktorant Wydziału Architektury Politechniki Wrocławskiej; ul. Bolesława Prusa 53/55, 50-377 Wrocław; ilona.szefer@pwr.edu.pl

klimatycznego[2], zakładającego redukcję emisji gazów cieplarnianych o 20% do 2020 roku, zwiększenie udziału energii z OZE do 20% w 2020 roku oraz podniesienie o 20% efektywności energetycznej [1,2,3]. Tegoroczne dyskusje ministrów ds. środowiska i energii na posiedzeniu Rady Europy dotyczące nowego pakietu klimatycznego do 2030 roku są w trakcie uzgadniania [4].

Prognozy Komisji Europejskiej odnoszące się do tendencji rozwojowych energetyki w Europie do 2030 roku, bezsprzecznie wskazują, że zapotrzebowanie na energię będzie wzrastało. Niedobór energii ma być zaspakajany przez źródła odnawialne, przede wszystkim słońce i wiatr [5]. W Polsce od 2007 roku Ministerstwo Gospodarki prowadzi kampanię dotyczącą rozsądnego wykorzystania energii. Celem kampanii jest prezentacja problematyki związanej opłacalnością użytkowania technologii energooszczędnych [6]. Zdecydowana polityka Unii Europejskiej spowoduje, że Polska w przeciągu następnych pięćdziesięciu lat zobowiązana będzie wprowadzić zmiany dotyczące struktury produkcji i konsumpcji prądu [5].

Energia pochodząca z promieni słonecznych jest dziś najbardziej rozpowszechnionym i docenianym źródłem energii. Postępująca ewolucja nowoczesnych technologii solarnych pozwala na korzystanie z energii Słońca już nie tylko na południu Europy, lecz również w Niemczech, Czechach czy Polsce [7]. Najbardziej popularnym wykorzystaniem energii słonecznej są ogniwa fotowoltaiczne oraz instalacje słoneczne zakładane w budynkach jedno- i wielorodzinnych, jak również coraz częściej w budynkach usługowo – biurowych. Powszechność tego źródła energii odnawialnej pozwala na jej wykorzystanie również w dużo mniejszych instalacjach, takich jak lampy solarne, ławki, zadaszenia, itp. Następstwem tego jest coraz częstsze wykorzystywanie lamp solarnych jako alternatywy dla klasycznego oświetlenia ulicznego (rys.1 i 2). Są one doskonałym rozwiązaniem szczególnie w miejscach odległych od infrastruktury, do których nieopłacalne jest doprowadzenie energii elektrycznej, co za tym idzie wpływają na obniżenie kosztów związanych ze jej zużyciem. Instalacje tego typu są łatwe w montażu, nie wymagają konsultacji z zakładem energetycznym, są gotowe do działania zaraz po zainstalowaniu [8].

Na całym świecie powstają godne uwagi detale architektoniczne i urbanistyczne pozwalające kształtować i organizować przestrzeń w nowoczesny a zarazem ekologicznie zrównoważony sposób. Do tego typu instalacji można zaliczyć tzw.



Rys.1. Lampa solarna [9]
Fig.1. Solar street lamp [9]



Rys. 2.Lampa solarna [10]
Fig.2. Solar street lamp [10]

[2] Kompromis podtrzymuje cele dla wszystkich krajów członkowskich Unii Europejskiej [3]



Rys.3. Drzewo solarne – lampa uliczna [11]

Fig.3. Solar tree Street Lamp [11]



Rys.4. Drzewa solarne zaprojektowane przez Ross'a Lovegrove w Wiedniu w 2007 roku [11]

Fig.4. Solar trees design by Ross Lovegrove in Vienna in 2007 [11]

Słoneczne drzewa (rys.3) zaprojektowane i wykonane przez znanego w Wielkiej Brytanii projektanta Ross'a Lovegrove.

Projekt zrealizowano został przy wiedeńskim Muzeum Sztuki Użytkowej (Museum for Angewandte Kunst) w 2007 roku (rys.4). Inspiracją dla artysty stały się ich naturalne odpowiedniki. Pomysłodawcą umieszczenia interesującej małej architektury wokół muzeum był jego dyrektor Peter Noever. Projekt łączy w sobie nowoczesną technologię, sztukę oraz wyglądem – naturę. Istotny jest również fakt, że doskonale wpisuje się we współczesne wymogi sztuki użytkowej, a przy tym służy ochronie środowiska. Instalacja stała się również rewolucyjna pod względem społecznym – wykorzystanie solarnych technologii ma rozpowszechniać działania ekologiczne, dbać o habitat oraz poprawiać jakość funkcjonowania społeczeństwa. Projekt jest owocem współpracy pomiędzy światowym producentem ogniw fotowoltaicznych – Sharp Solar, firmą zajmującą się wprowadzaniem innowacji w dziedzinie oświetlenia – Artemide oraz Ross'em Lovegrove [11]. Podobne rozwiązania architektoniczne zostały wykonane w Londynie jako kompozycja tymczasowa przed Letnimi Igrzyskami Olimpijskimi w 2012 roku. Solar Tree były projektem stworzonym w ramach Clerkenwell Design Week mającego miejsce w stolicy Wielkiej Brytanii. Również ta koncepcja jest dziełem Ross'a Lovegrove. Drzewo („rzeźba") na swych konarach posiada zamontowane panele słoneczne. Poza nimi instalacja wyposażona została w diody LED znajdujące się na „pniu". Są one odpowiedzialne za czerpanie energii elektrycznej z miejskiej sieci, gdy poziom energii skumulowanej przez panele jest za niski [12].

Elementem urbanistycznym wykorzystującym Słońce jako odnawialne źródło energii do oświetlania ulic są Słoneczne Drzewa (Solar Mallee Tree) zaprojektowane i zrealizowane w Adelaide. Pod względem wizualnym przypominać mają drzewo eukaliptusa (rys.5), które produkować ma około 864 kWh rocznie (zużywając zaledwie 125 kWh). Nadmiar wytworzonej energii przesyłany jest do miejskiej sieci energetycznej. Przedsięwzięcie to pozwala ograniczyć emisję gazów cieplarnianych o około dwie tony rocznie.

Solar Mallee Trees opracowane zostały przez miejscowych architektów – Tony'go Materne, Carlo Pennino oraz Peter'a Hoare. Drzewa zainstalowano w kilku miejscach w mieście m.in. przy Parliament House, South Australian Museum,



Rys.5. Solarne drzewa i ich naturalne odpowiedniki [13]
Fig.5. Solar trees and their natural counterparts [13]

Galerii Sztuki i Bibliotece Państwowej. Poza przedstawionym powyżej przykładem w mieście zlokalizowano jeszcze pojedyncze punktów świetlne wykorzystujące energię Słońca [13,14].

Kolejnym interesującym przykładem ekologicznej małej architektury są Strawberry Trees (rys.6). Pierwsza tego typu instalacja została stworzona przez serbską firmę Strawberry Energy. Projekt publicznej ładowarki urządzeń mobilnych i WiFi został zaprezentowany podczas European Commission's "Sustainable energy week 2011" w Brukseli; zajął wtedy pierwsze miejsce.

Autorem nowych ławek (Strawberry Tree Black)(rys.7), które stanęły w parku Tašmajdane w Belgradzie jest Miloš Milivojević. Detal umożliwia ładowanie tabletów, telefonów dzięki zainstalowanym panelom słonecznym. W oparciach ławek znajdują się różnego typu wejścia, tak by łatwo można było podłączyć dowolne przenośne urządzenie. Drzewo pomimo, że jest produktem sztucznym doskonale wpisuje się w krajobraz parku, spełnia także ważną rolę – dostarcza czystej energii wykorzystując promienie słońca oraz edukuje mieszkańców przypominając o konieczności troszczenia się o środowisko naturalne [15].

W dobie globalizacji oraz rozwoju, przybywające na świecie fabryki, emitują do atmosfery ogromne ilości dwutlenku węgla. Z ostatnich raportów wynikało, że w 2013 roku globalna emisja CO_2 wzrosła do ponad 36 mld ton. Niestety zauważyć można także, że każdego roku maleje liczba drzew, które odpowiedzialne są za



Rys.6. Strawberry Tree w Belgradzie [15]
Fig.6. Strawberry Tree in Belgrade [15]



Rys.7. Solarne drzewko w Belgradzie [15]
Fig.7. Solar Tree in Belgrade [15]

naturalną filtrację i oczyszczanie powietrza. Na niecodzienny pomysł wpadła SHIFT Boston – organizacja powstała w celu promowania projektów zarówno w teorii jak i praktyce (środowisko miejskie); dążąca do uświadamiania społeczeństwa na tematy dotyczące znaczenia architektury, urbanistyki i technologii poprzez organizowane międzynarodowe wystawy, fora i inne wydarzenia [16]. Zleciła ona francuskim designerom zaprojektowanie sztucznych drzew, które odpowiedzialne byłyby za filtrację powietrza w Bostonie. System zobowiązany za prawidłowe działanie instalacji to TREEPOD (rys.8). Drzewa usuwają dwutlenek węgla z atmosfery za pomocą procesu „humidity swing". Poza oczyszczaniem powietrza, drzewa mogą wytwarzać energię elektryczną. W „koronach" zainstalowane zostały panele słoneczne (rys.9). Każde z drzew wyposażone zostało w interaktywne wyświetlacze informujące zainteresowanych o szczegółach dotyczących technologii usuwania CO_2 [17]. Futurystyczne elementy małej architektury mają wyglądem przypominać draceny, a do ich budowy zostaną użyte komponenty pochodzące z recyklingu: drewno i tworzywa sztuczne. Na dzień dzisiejszy projekt pozostaje tylko na papierze i nie wiadomo kiedy będzie realizowany. Wiadomo jednak, że drzewa mogłyby znaleźć zastosowanie nie tylko w centrach dużych miast, lecz także w gorących rejonach, gdzie trudno o roślinność [17].



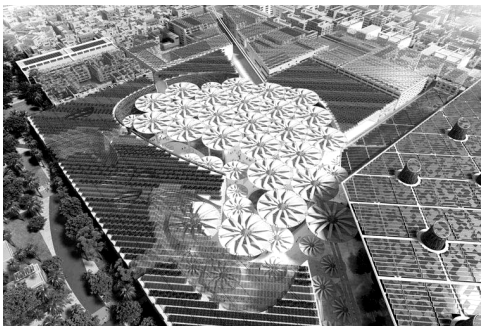
Rys.8. Sztuczne drzewa nocą [17]
Fig.8. Artificial trees at night [17]



Rys.9. Korony z paneli słonecznych [17]
Fig.9. Crown with solar panels [17]

W ostatnich latach coraz bardziej popularne stają się wszelkiego rodzaju przekrycia i zadaszenia projektowane w myśl zasad ekologii i zrównoważonego rozwoju. Jednym z pierwszych tego typu przedsięwzięć było zaprojektowane w 2007 roku zagospodarowanie wielofunkcyjnego placu („centrum") metropolii Masdar City, projektu biura architektonicznego LAVA (Laboratory for Visionary Architecture) pod kierownictwem Chrisa Bosse.

Zaproponowano innowacyjne rozwiązania na miarę XXI wieku. Projektowane parasole swym kształtem przypominające kwiaty słonecznika (rys.10), mają za zadanie magazynowanie energii cieplnej z Słońca, zapewniając przy tym odpowiedni mikroklimat i zacienienie placu. Zamknięte kwiaty oświetlać będą plac a natężenie światła zależeć ma od ilości osób przechodzących przez Central Plaza (rys.11) [18, 19].



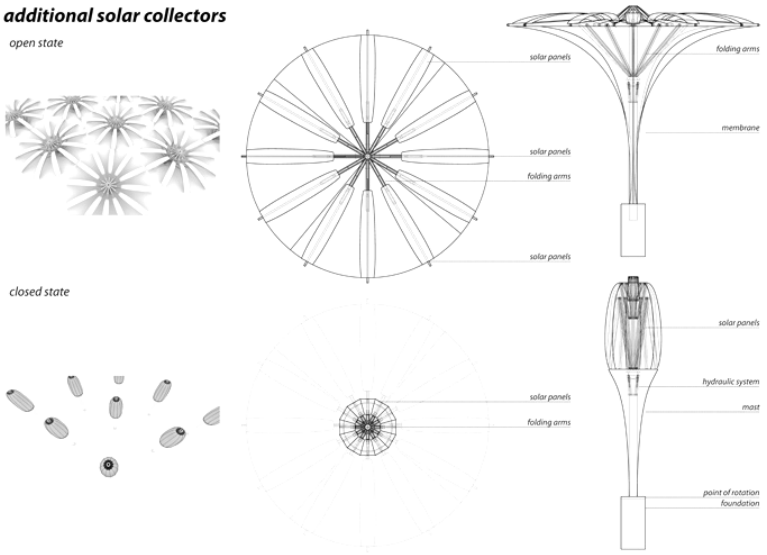
Rys.10. Wygląd Central Plaza i parasoli w ciągu dnia [18]

Fig.10. The Central Plaza and umbrellas during the day [18]



Rys.11. Wygląd Central Plaza i parasoli nocą [18]

Fig.11. Central Plaza and umbrellas at night [18]



Rys.12. Budowa parasola [18]

Fig.12. Construction of an umbrella [18]

Energia gromadzona przy pomocy pokrytych ogniwami fotowoltaicznymi parasoli uwalniana będzie nocą, gdy będą one zwinięte. Posłuży ona przede wszystkim do ogrzewania budynków po zapadnięciu zmroku (rys.12) [18, 19].

Na ciekawy pomysł wpadła Victorian Eco Innovation Lab, organizacja założona przez rząd australijski w 2006 roku. Stworzyła ona system Veil Solar Shades zaprojektowany przez Büro North. Przeznaczeniem układu jest zacienianie a zarazem magazynowania energii słonecznej. Instalacje mogą być wykorzystane w szkołach, na placach zabaw, parkach i miejscach publicznych (rys.13). Kształtem przypominają głowę kobry, której powierzchnia pokryta jest panelami. Całość ma możliwość obracania się w ciągu dnia, by ich orientacja była jak najbardziej efek-



Rys.13. Parasole solarne w Melbourne [20]

Fig.13. Solar umbrellas in Melbourne [20]

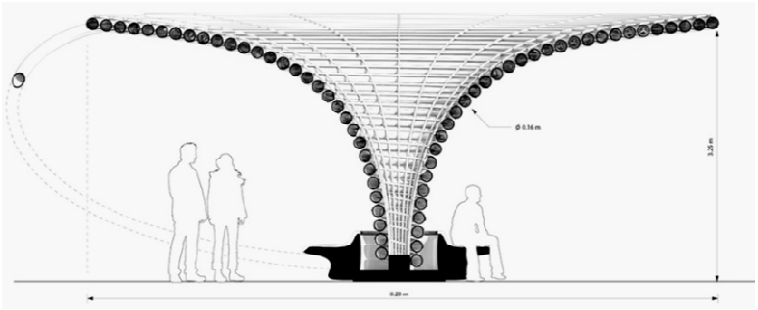


Rys.14. System Veil Solar Shade zaprojektowany przez Buro North [20]

Fig.14. Solar Shade design by Buro North [20]

tywna. Każde urządzenie wyposażone jest w łatwy w obsłudze ekran dotykowy, umożliwiający monitorowanie produkcji oraz magazynowania energii. Poza tym zainstalowane zostały również systemy informacji zwrotnej LED. Za pomocą zielonej i czerwonej diody, otrzymywane są informacje zwrotne, jak np. czy do parasola dociera wystarczająca ilość światła słonecznego. Osoby korzystające z urządzeń mogą dowiedzieć się czy parasol jest w optymalnej pozycji (rys.14)[20].

Współcześnie oczywisty jest fakt, że zapotrzebowanie na alternatywne paliwa wzrasta. Uprawa roślin bioenergetycznych jest rzadkością. Wykorzystanie przestrzeni miejskiej wydaje się w tym wypadku intrygującym pomysłem. Zaprojektowany w Holandii Algae Parasol stanowi samodzielną konstrukcję, wyposażoną w fotobioreaktor do uprawy alg. Całość pełni podwójną funkcję – ochronną, gdyż stwarza miejsce wygodne i zacienione w miejskim środowisku, oraz zapobiega promieniowaniu słonecznemu, które przetwarzane jest w procesie fotosyntezy. Podobnie jak drzewa, pochłaniają one dwutlenek węgla z otoczenia a uwalniają do atmosfery tlen. Można więc stwierdzić, że system ten działa bardzo podobnie jak TREEPOD w Bostonie. Całość instalacji składa się z kilku usztywnionych, równolegle rozłożonych pierścieni, stanowiących stelaż dla uprawy alg. Konstrukcja opiera się na betonowym postumencie, który funkcjonuje zarówno jako przeciwwaga jak i część wypoczynkowa. Wewnątrz konstrukcji zlokalizowane zostało urządzenie odgazowujące, które niezbędne jest do hodowli alg (rys.15) [21].



Rys.15. Konstrukcja Algae Parasol [21]

Fig.15. Algae Umbrella construction [21]

Godną wspomnienia jest konstrukcja solarnego zadaszenia parkingu zaproponowana przez projektanta Neville Mars'a. Parking stałby się miejscem, w którym pojazdy elektryczne miałyby możliwość ładowania akumulatorów za pomocą energii pochodzącej z odnawialnych źródeł (rys.16). Umieszczone na zadaszeniu panele mają możliwość automatycznego obracania w celu znalezienia orientacji najbardziej efektywnej o danej porze dnia. Niestety na chwilę obecną, pomimo faktu, iż proponowana architektura jest zrównoważona i przyjazna środowisku nie została jeszcze zrealizowana [22].



Rys.16. Solarne zadaszenia parkingu samochodowego [22]

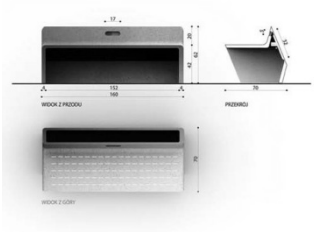
Fig.16. Solar roof of the car park [22]

Także w Polsce coraz częściej inwestuje się w technologie powiązane z odnawialnymi źródłami energii. Poza popularnymi lampami solarnymi bądź hybrydowymi, projektowane są wykorzystujące energię Słońca inne elementy małej architektury. Przykładem takim jest projekt solarnej ławki zaprezentowany podczas konkursu Design for Poznań 2012. Przedmiotem konkursu była propozycja koncepcji obiektu bądź kilku elementów, które mogłyby zostać designerską wizytówką miasta dodatkowo zaspokajając potrzeby obywateli. Koncepcja ławki solarnej „Electricity"(rys.17) zaproponowana zastała przez projektantów – Magdalenę Czapiewską, Karola Murlaka i Zuzannę Lemieszek. Wytwarzana przez ławkę energia posłużyć ma do ogrzewania i suszenia miejsca w chłodne dni oraz do zasilania interaktywnego panelu. Detal zawierający port USB, daje możliwość ładowania telefonu i laptopa (rys.18). Wyposażony jest również w nadajnik bezprzewodowego Internetu oraz głośnik. Nadmiar wytworzonej energii elektrycznej przekazany ma zostać do miejskiej sieci elektrycznej [23].

Obecnie wyznaczane cele dotyczące energii pochodzącej z odnawialnych źródeł stanowią priorytet w polityce europejskiej i nie tylko. W świadomości większości z nas zrównoważone i przyjazne dla środowiska są konstrukcje wielkogabarytowe. Często nie zdajemy sobie sprawy, z tego, jaki mała architektura – detale architektoniczno – urbanistyczne – mogą mieć wpływ na otaczającą nas przestrzeń oraz na nasze samopoczucie. Wprowadzając do miast pomysłowe, ekologiczne a przede wszystkim korzystne wizualnie elementy takiej jak, lampy, ławki, systemy informacji miejskiej, zadaszenia parkingów czy przystanków autobusowych mamy szansę na ożywienie przestrzeni, zachęcenie do przebywania w niej, a co najważ-



Rys.17. Polski przykład solarnej ławki [23]
Fig.17. Polish example of the solar benches [23]



Rys.18. Projekt koncepcyjny ławki [23]
Fig.18. Conceptual design of the bench [23]

niejsze edukuje społeczeństwo. Przedstawione powyżej realizacje oraz koncepcje, nie stanowią tylko ciekawostki czy nowości technologicznych i energetycznych. Stanowią przykład wychodzenia naprzeciw potrzebom, zastanym warunkom pogodowym, oczyszczając powietrze, oświetlając ulice, place, parki, ograniczając koszty oraz emisję szkodliwych gazów do atmosfery [7]. Wszystkie przedstawione przykłady wykorzystują dostępne obecnie zdobycze technologii dla poprawy efektywności energetycznej i maksymalnego wykorzystania zasobów odnawialnych. Pozostaje mam wierzyć, że podobnych rozwiązań będzie więcej nie tylko za granicą, ale również w Polsce.

Literatura

[1] Głodek E., Kalinowski W.: Odnawialne źródła energii w województwie opolskim, Wydawnictwo Instytut Śląski, Opole 2011
[2] Tytko R.: Odnawialne źródła energii, OWG, Warszawa 2009
[3] www.energiaisrodowisko.pl/cop15 [dostęp: 2 maj 2014 r.]
[4] www.energetyka.wnp.pl/polska-niesluszniе-obawia-sie-zaostrzenia-polityki-klimatycznejue, 221074_1_0_0.html Polska niesłusznie obawia się zaostrzenia polityki klimatycznej UE? Dariusz Ciepiela [dostęp: 21 kwietnia 2014 r.]
[5] www.ennergo.alba.home.pl/ennergo/index.php/oze-w-budownictwie/51-ciekawostki/1061-przyszo-energetyczna-polski.html Źródło:„Mix energetyczny 2050. Analiza scenariuszy dla Polski". Instytut Badań Strukturalnych i Demos Europa, listopad 2011 oprac. Lucyna Drążek [dostęp: 1 maj 2014 r.]
[6] www.mg.gov.pl/Bezpieczenstwo+gospodarcze/Energetyka/Czas+na+oszczedzanie+energii - Redaktor wprowadzający: Dworzycki Jacek, Kubel-Grabau Agata [dostęp: 21 kwietnia 2014 r.]
[7] www.oze.pl/energia-sloneczna [dostęp: 3 maj 2014 r.]
[8] www.led-darcom.pl/product.php?id_product=437 Producent lamp solarnych [dostęp: 4 maj 2014 r.]
[9] www.brasit.pl/oswietlenie-led/jak-to-dziala/ [dostęp: 20 marca 2014 r.]
[10] www.biznesdolnoslaski.pl/2013/07/26/lampy-solarne-oswietla-gmine-dzierzoniow/ [dostęp: 21 kwietnia 2014 r.]
[11] www.ekogroup.info/5815/sloneczne-drzewa-wieden/ [dostęp: 28 kwietnia 2014 r.]
[12] www.architekturakrajobrazu.info/przestrze-miejska/141/2882-soneczne-drzewo-londynu Słoneczne drzewo Londynu Bartosz Palewski [dostęp: 6 maj 2014 r.]

[13] www.mpharchitects.com.au - Strona główna biura projektowego MATERNE PENNINO HOARE [dostęp: 8 kwietnia 2014 r.]
[14] www.treehugger.com – TREEHUGGER [dostęp: 24 kwietnia 2014 r.]
[15] www.bryla.pl/bryla/1,85298,12957664,Solarne_drzewko_naladuje_twojego_smartfona.html [dostęp: 10 kwietnia 2014 r.]
[16] www.shiftboston.org - SHIFT Boston – organizacja promująca projekty ekologiczne zarówno w środowisku miejskim [dostęp: 24 kwietnia 2014 r.]
[17] www.ekogroup.info/9503/oczyszczanie-powietrza-przy-pomocy-sztucznych-drzew/ Oczyszczanie powietrza przy pomocy sztucznych drzew Kamil Rogala [dostęp: 24 kwietnia 2014 r.]
[18] www.l-a-v-a.net/projects/masdar-city-centre/ - Strona główna biura projektowego LAVA [dostęp: 15 kwiecień 2014 r.]
[19] www.inhabitat.com/lavas-winning-design-for-masdars-city-center/masdarcitycenter-7/ [dostęp: 5 maj 2014 r.]
[20] www.eko-kreatywni.pl/index.php/poradnik/22-solarne-parasole Słoneczne parasole [dostęp: 21 kwiecień 2014 r.]
[21] www.leoniewelling.nl/portfolio-view/algae-parasol/ - LEONIE ARCHITECTURE Portfolio (Project in collaboration with Marko Koops) [dostęp: 28 kwietnia 2014 r.]
[22] www.ekologia.pl/styl-zycia/eko-auto/zielony-parking-na-elektryczne-auta,9706. html [dostęp: 15 kwiecień 2014 r.]
[23] www.architektura.info/index.php/wnetrza2/wzornictwo/design_for_poznan_meble_miejskie_dla_poznania [dostęp: 28 kwietnia 2014 r.]

EKO-INSTALLATIONS. ARCHITECTURAL AND URBAN DETAILS AS A PART OF CITY ECOSYSTEM

S u m m a r y

The progressive development of modern solar technologies allows using energy from the Sun not only in the south of Europe, but also in Germany, the Czech Republic and Poland. The commonness of this renewable energy source makes it usable also in smaller installations, such as solar lamps and roofing. They are excellent solutions especially in places localized far from infrastructure, to which supplying electric energy is not cost-effective, and hence they lead to a reduction of costs related to energy use. All over the world noteworthy architectural and urban details are created allowing to shape and organize space in a modern and at the same time ecologically balanced way. This group of installations includes the so-called Solar trees, trees which reduce CO_2 and produce oxygen, ecological benches, solar umbrellas (protecting against the Sun and producing electricity) and parking or bus stop roofing. In the perception of the majority of us, these are large-size structures that are balanced and environmentally-friendly. We do not often realize how small architecture – architectural and urban details – may influence our surroundings and our mood. The realizations and concepts presented below are not only curiosities or technological and energy-related innovations. They are examples of facing needs, weather conditions by cleaning the air, illuminating streets, squares and parks, reducing costs and emission of harmful gases to the atmosphere. Let us hope there will be more of such solutions not only abroad, but also in Poland.

Keywords: modern solar technology, renewable energy, space, environment

Przesłano do redakcji: 23.02.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.74

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 459-467

Norbert SZMOLKE[1]

AUDYTORSKIE SPOJRZENIE NA WENTYLACJĘ SZKÓŁ

Skuteczna wentylacja budynków szkolnych stanowi złożony problem w ich eksploatacji. Wydaje się, że spośród budynków użyteczności publicznej obiekty szkolne mają chyba najgorzej rozwiązane systemy wentylacji. Skuteczność wentylacji w takim obiekcie ma olbrzymie znaczenie przy uzyskiwaniu komfortu uczenia się dzieci jak i ich ogólnego samopoczucia. Słaba wentylacja to także przyczyna zasłabnięć i omdleń osób przebywających w pomieszczeniach szkolnych, spowodowana nadmiernym stężeniem dwutlenku węgla a czasem również tlenku węgla. Budynek szkolny to także miejsce pracy dla grona pedagogicznego oraz służb technicznych. Niestety zdarzają się przypadki lekceważenia tych problemów w szkołach. W pracy przedstawiono podejście audytora energetycznego do zagadnień wentylacji w placówkach szkolnych. Wskazano, że funkcjonujący system wentylacji pozwala również na usunięcie z budynku nadmiaru wilgoci. Jeśli wentylacja nie działa skutecznie a w pomieszczeniu występuje tzw. „przemarzanie ścian" może dojść do wykroplenia pary wodnej i pojawienia się korozji mykologicznej. Zwrócono również uwagę na tendencje uszczelniania budynków, głównie przez stosowanie hermetycznych okien, które chroniąc przed hałasem i stratami ciepła skutecznie blokują dopływ świeżego powietrza do pomieszczeń. Ponadto omówiono występowanie w przewodach wentylacyjnych tak zwanego ciągu wstecznego, spowodowanego głównie warunkami atmosferycznymi i uszczelnieniem budynku oraz niewłaściwą konstrukcją przewodów wentylacyjnych. Przedstawiono także, najczęściej stosowany, sposób poprawy wentylacji jakim jest przewietrzanie sal lekcyjnych. W końcowej części pracy wskazano na energetyczne aspekty wentylacji w budynkach szkolnych. Całość wzbogacono przykładami niekorzystnych rozwiązań wentylacji w szkołach, które autor tej pracy zauważył, wykonując audyty energetyczne budynków oświatowych, zlokalizowanych w Polsce południowo-zachodniej.

Słowa kluczowe: wentylacja grawitacyjna, energochłonność obiektu, skutki złej wentylacji, sposoby przewietrzania szkół

[1] Dr hab. inż. Norbert Szmolke, prof. PO, Politechnika Opolska, Katedra Inżynierii Środowiska, ul. S. Mikołajczyka 5, 45 – 271 Opole, Tel. 77 449 83 91, e-mail: n.szmolke@po.opole.pl

1. Wprowadzenie

Jak powszechnie wiadomo głównym celem wentylacji jest usunięcie z pomieszczenia powietrza zanieczyszczonego i zastąpienie go powietrzem świeżym. Ten proces dotyczy wszystkich obiektów budowlanych a przede wszystkim przeznaczonych na pobyt ludzi. Dla wielu typów budynków określono nawet szczegółowe warunki, jakie muszą być spełnione przez systemy wentylacyjne w nich funkcjonujące. Niestety, dla budynków szkolnych, będących przedmiotem tej publikacji obecnie brak takich jednoznacznych warunków. Co prawda w [3] w paragrafie 9 znajduje się zapis „*W pomieszczeniach szkoły i placówki zapewnia się właściwe oświetlenie, wentylację i ogrzewanie*" to jego praktyczna przydatność jest znikoma ze względu na brak szczegółowych wytycznych.

W związku z tym sięga się do warunków ogólnych, zawartych np. w Warunkach technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [4] oraz normie PN - 83/B-03430 [1]. W tej ponad trzydziestoletniej, a wciąż obowiązującej, normie znaleźć można zalecenie takiego projektowania systemów wentylacji, aby w budynkach użyteczności publicznej (także szkolnych) została zapewniona wymiana powietrza na poziomie 20 m^3/h na osobę. To na tych dokumentach opiera się ocena systemów wentylacji, wykonywana przez audytora energetycznego, co stanowi treść tej publikacji.

Wszystkie, zamieszczone w dalszej części zdjęcia zostały wykonane przez autora publikacji w placówkach szkolnych, zlokalizowanych w Polsce południowo-zachodniej.

2. Przyczyny i skutki niewłaściwej wentylacji w budynkach szkolnych

Systemy wentylacji mają spełniać podstawowe zadanie, jakim jest usuwanie powietrza zanieczyszczonego z pomieszczeń oraz doprowadzenie powietrza świeżego. W klasie, w której w czasie lekcji przebywa wiele osób, wzrasta ilość dwutlenku węgla a maleje ilość tlenu (czasem również CO). Wzrost stężenia dwutlenku węgla w zamkniętym pomieszczeniu powoduje negatywne skutki, takie jak senność, ból głowy.

Słaba wentylacja to także przyczyna zasłabnięć i omdleń osób przebywających w pomieszczeniach szkolnych. Należy wspomnieć, że budynek szkolny to także miejsce pracy dla grona pedagogicznego oraz służb technicznych.

Dobrze funkcjonujący system wentylacji pozwala również na usunięcie z budynku nadmiaru wilgoci. Jeśli wentylacja nie działa skutecznie a w pomieszczeniu występuje tzw. „przemarzanie ścian" może dojść do wykroplenia pary wodnej i pojawienia się korozji mykologicznej tak, jak przedstawiono na rys. 1. Niestety zdarzają się przypadki lekceważenia tych problemów w szkołach.

Większość klas szkolnych wentylowanych jest w sposób naturalny. Jedynie w niektórych współcześnie budowanych obiektach stosuje się wentylację mechaniczną a zastosowanie odzysku ciepła wciąż należy do rzadkości; głównie z powodu wysokich kosztów realizacji takiej inwestycji. Chociaż w tej kwestii widać poprawę spowodowaną, zdaniem autora tej publikacji, zmianą pokoleniową na stanowiskach dyrektorskich; zarządzanie oświatą powoli przejmują ludzie którzy rozumieją potrzebę poprawy warunków higienicznych w kierowanych placówkach.

Innym problemem jest występowanie wilgoci i pleśni na wewnętrznych powierzchniach ścian co może być wynikiem słabej izolacji cieplnej lub jej braku, ale też złej wentylacji oraz niedostatecznego ogrzewania, co w praktyce oznacza niewłaściwy sposób eksploatacji i konserwacji obiektu.

a)  b) 

Rys. 1. Skutki: a) wadliwej wentylacji sali gimnastycznej, b) i mostka termicznego w sali lekcyjnej, zlokalizowanej w przyziemiu

Fig. 1. Effects: a) of faulty ventilation in a gymnastic hall, b) and a thermal bridge in a classroom located in the basement

Niedostateczna izolacyjność cieplna przegród powoduje utrzymywanie się na ich powierzchni zbyt niskiej temperatury, co w chłodnych okresach roku w licznych przypadkach doprowadza do kondensacji pary wodnej na powierzchni. Kondensacja następuje wskutek tego, że powietrze stykające się ze ścianą ochładza się poniżej temperatury punktu rosy i nadmiar pary wodnej musi się skroplić.

Wilgoć w przegrodach staje się przyczyną zwiększenia strat ciepła i obniżenia temperatury w pomieszczeniach. W wyniku tego w pomieszczeniach rozwijają się różne mikroorganizmy, które oddziaływają na zdrowie ludzi (są przyczyną kłopotów z układem oddechowym, alergiami a nawet zaczątkiem chorób nowotworowych). Pojawia się tzw. syndrom chorego budynku. Powstają szkodliwe warunków higieniczne w takim budynku; usunięcie ich skutków jest trudne, czasochłonne i kosztowne.

Należy wyraźnie zaznaczyć, że kolejnym z celów wentylacji, poza wymianą powietrza, jest usunięcie pary wodnej z pomieszczeń. Sprawna wentylacja zdecydowanie zmniejsza zagrożenie wykraplania się pary wodnej.

W Polsce w ostatnich latach widoczna jest tendencja do uszczelniania budynków, głównie przez stosowanie hermetycznych okien. Wiele produkowanych i montowanych obecnie jest zbyt szczelnych. Co prawda świetnie chronią nas od środowiska zewnętrznego, np. hałasu, lecz skutecznie zapobiegają doprowadzaniu świeżego powietrza drogą infiltracji.

Problem jest istotny na tyle, że w obowiązujących Warunkach technicznych [4] pojawił się zapis, nakazujący montaż nawiewników w oknach lub innych częściach przegród zewnętrznych w przypadku zastosowania w pomieszczeniach innego rodzaju wentylacji niż wentylacja mechaniczna nawiewna lub nawiewno-wywiewna.

Warto w tym miejscu zwrócić uwagę na fakt, iż o ile w odniesieniu do wszystkich budynków naturalny dopływ powietrza zewnętrznego może być realizowany do wielkości nie przekraczającej 2 wymian na godzinę, to w drodze wyjątku dla pomieszczeń w szkołach i przedszkolach dopuszcza się w uzasadnionych przypadkach doprowadzanie powietrza zewnętrznego pod wpływem podciśnienia w ilościach do 3 wymian na godzinę [1].

Uszczelnianie budynku w obawie przed nadmiernymi stratami ciepła odbywa się zarówno na etapie projektowania, budowy jak i eksploatacji; może doprowadzić do niespełnienia wymagań stawianych układom wentylacyjnym. Zbyt duża i bezkrytyczna hermetyzacja budynków wpływa negatywnie na jakość powietrza w pomieszczeniach, a tym samym na ich mikroklimat.

Inna przyczyna złej wentylacji w budynkach szkolnych to tzw. ciąg wsteczny spowodowany głównie warunkami atmosferycznymi i uszczelnieniem budynku oraz niewłaściwą konstrukcją przewodów wentylacyjnych. Nadmierne uszczelnienie budynku, skutkujące drastycznym zmniejszeniem ilości powietrza dostarczanego do niego, może spowodować tzw. „cofkę kominową" tj. przez przewód wentylacyjny dostarczane jest świeże powietrze do budynku, a powinno być z niego usuwane. Działania „naprawcze" obsługi budynku polegają przeważnie na zasłonięciu kratek wentylacyjnych (rys. 2a) co nie eliminuje tego problemu. Wymagana jest pełna diagnostyka systemu wentylacji, której celem jest zdefiniowanie przyczyn takiego stanu i wskazanie właściwych rozwiązań. Trzeba mieć również na uwadze fakt, że montowane na kominach nasady nie rozwiązują problemu jeśli ich zastosowanie nie będzie uzależnione od wymaganej przepustowości przewodu wentylacyjnego.

Zdarza się, że powodem niesprawnej wentylacji jest za niski komin; wtedy wymagane jest jego przedłużenie np. poprzez zamontowanie wkładu kominowego, koniecznie ocieplonego. W nieocieplonym, wyższym kominie dochodzi do wychłodzenia powietrza co powoduje dalsze obniżenie ciągu.

Nie mniej istotnym problemem jest wentylacja sanitariatów. Wymagają one, zgodnie z [3], wentylacji na poziomie co najmniej $30 m^3/h$ na jeden ustęp. Wyprowadzenie takiej ilości powietrza na zewnątrz budynku jest możliwe tylko w przypadku, gdy jest zapewniony odpowiedni dopływ powietrza do pomieszczenia oraz wystarczająca ilość sprawnych przewodów wentylacyjnych. Infil-

tracja powietrza do takich pomieszczeń często sprowadza się do jego napływu przez drzwi. Dlatego drzwi wejściowe powinny być zaopatrzone w otwory o powierzchni co najmniej 200 cm^2, umieszczone w ich dolnej części. W praktyce spotyka się niestety takie rozwiązania jak pokazane na rys.2b. W tym przypadku suma powierzchni otworów i powierzchnia szczeliny pomiędzy dolną krawędzią drzwi a podłogą nie zapewniają odpowiedniego dopływu powietrza. Dodatkowo coraz powszechniej montowane w drzwiach wewnętrznych uszczelki przylgowe utrudniają infiltrację powietrza do wnętrza takiego pomieszczenia.

a)  b) 

Rys. 2. Skuteczny sposób ograniczenia wentylacji: a) zasłonięcie kratki wentylacyjnej, spowodowane ciągiem wstecznym, b) zbyt mała powierzchnia otworów nawiewnych w drzwiach, prowadzących do sanitariatów

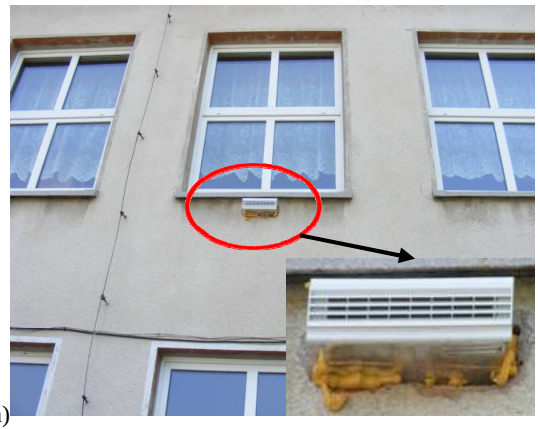
Fig. 2. An effective way of limiting ventilation as a result of: a) obstruction of the ventilation grill, caused by back air draw in the shaft, b) too small a surface of the inlet holes in the doors leading to toilets

Czasem zauważa się zamontowane nawiewniki w oknach pomieszczeń sanitarnych. Zdaniem autora tej publikacji jest to postępowanie niewłaściwe, ponieważ przy niedoborze powietrza w budynku może dojść do jego infiltracji z sanitariatu do pozostałej kubatury budynku, powodując zanieczyszczenie powietrza. W takim przypadku wchodząc do budynku i posługując się jedynie węchem bez problemu można zlokalizować WC i inne pomieszczenia sanitarne. Niejednokrotnie taka sytuacji dotyczy również sal gimnastycznych.

Na rysunku 3a pokazano próbę poprawy wentylacji klasy poprzez montaż nawietrzaka ściennego. Wymiana stolarki okiennej w tym pomieszczeniu spowodowała jego hermetyzację, która dość szybko doprowadziła do pojawienia się pleśni na ścianie zewnętrznej. Montaż nawietrzaka poprawił stan higieniczny klasy lecz obniżył komfort uczenia się dzieciom, które siedziały blisko jego mocowania; dochodziło do lokalnego obniżenia temperatury w tym miejscu co skutkowało przeziębianiem się uczniów. W konsekwencji zlikwidowano nawietrzak, a w stolarce okiennej zamontowano nawiewniki.

Na kolejnym rysunku (rys.3b) pokazano, spotykany głównie w budynkach przedwojennych, przypadek zakończenia przewodów wentylacyjnych na pod-

daszu. Nie jest to rozwiązanie prawnie dopuszczalne, lecz wydaje się być skuteczne szczególnie, gdy poddasze posiada dużą kubaturę a pokrycie dachowe pozwala na wymianę powietrza poprzez infiltrację.

a)  b) 

Rys. 3. Przypadki rozwiązań wentylacji w szkołach: a) nawietrzak ścienny, b) zakończenie przewodów wentylacyjnych na poddaszu

Fig. 3. Ventilation solutions in schools: a) air intake wall, b) ends of ventilation ducts in the attic

3. Przewietrzanie sal lekcyjnych

Poprawę skuteczności wentylacji w szkole można osiągnąć poprzez okresowe przewietrzanie sal lekcyjnych. Można je realizować na kilka sposobów (tabela 1). Najskuteczniejsze są dwa: przewietrzanie przy szeroko otwartych oknach i drzwiach oraz jedynie przy szeroko otwartych oknach.

Krótki czas przewietrzania pozwala na efektywną wymianę powietrza podczas przerw międzylekcyjnych. Przy okazji realizowany jest zapis o konieczności wietrzenia sal w czasie przerwy, zawarty w rozporządzeniu [3].

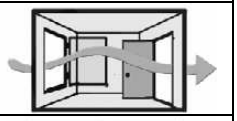
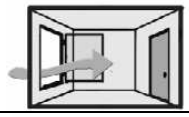
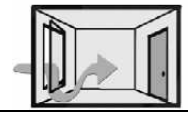
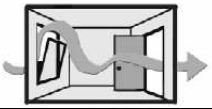
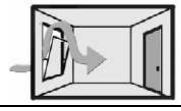
Niestety są to działania krótkotrwałe; jeśli podczas dziesięciominutowej przerwy klasa zostanie skutecznie przewietrzona to efekt tego działania znika po 10-15 minutach lekcji, gdy wejdzie do niej 25-30 uczniów, co z kolei nie jest rzadkością w wielu oddziałach szkolnych. Praktycznie w polskiej oświacie nie stosuje się przerw w czasie lekcji, wykorzystywanych do przewietrzenia klasy.

4. Aspekt energetyczny wentylacji w budynkach szkolnych

Audytor energetyczny dokonujący oceny energetycznej budynku szkoły stwierdzi, że obiekt dużo energii traci poprzez wentylację a po jego ociepleniu i wymianie okien udział strat wentylacyjnych w stratach całkowitych ciepła znacznie wzrośnie co pokazano na rysunku 4.

Tabela 1. Przewietrzanie sal lekcyjnych, wg [5,6]

Table 1. Classroom airing standards in accordance with [5,6]

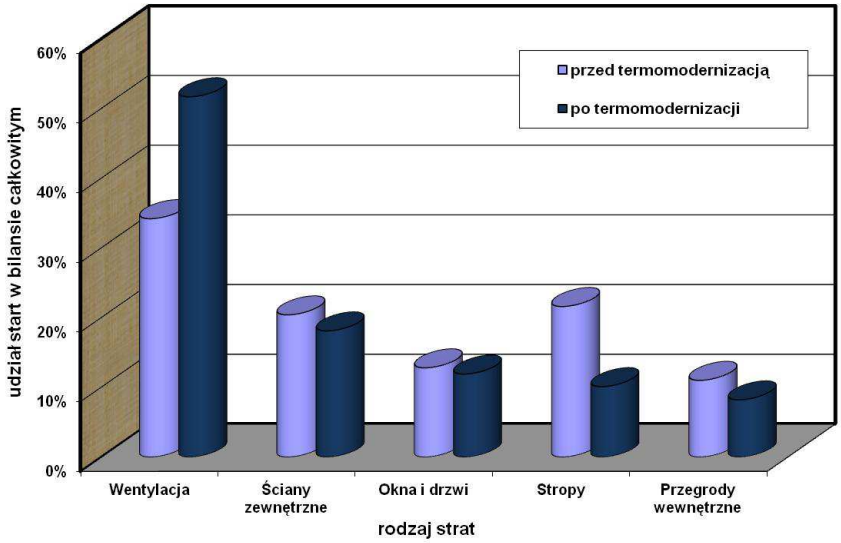
Sposób przewietrzania	Czas realizacji	Ilustracja sposobu
szeroko otwarte okna i drzwi	3 – 5 min.	
szeroko otwarte okna	5 – 10 min.	
uchylone okna	10 – 15 min.	
uchylone okna i otwarte drzwi	15 – 20 min.	
uchylone okna	20 – 30 min.	

Istotnym powodem powstawania dużych, lecz jedynie obliczeniowych, strat ciepła jest metoda ich wyznaczenia. Zgodnie z obowiązującą normą PN-83/B-03430 w budynkach oświatowych należy przyjmować wymianę ciepła na poziomie 20 m^3/h na jednego ucznia czy nauczyciela przez całą dobę. Dodatkowo należy uwzględnić 30 m^3/h na pojedynczy sanitariat, 50 m^3/h dla łazienki (z ustępem lub bez), 1,5 – 2 wymiany powietrza w ciągu godziny dla kuchni i stołówki oraz wiele dodatkowych składników tego bilansu.

Uwzględniając obliczeniowe temperatury wewnętrzne (20^OC) oraz zewnętrzne (zależnie od strefy klimatycznej wahają się od -16^OC do -24^OC) otrzymuje się znaczne straty ciepła na wentylację. Np. dla obiektu nieocieplonego o konstrukcji tradycyjnej murowanej, powierzchni ogrzewanej 2100 m^2 i kubaturze 5895 m^3 przy niemodernizowanym systemie centralnego ogrzewania wynieść mogą one nawet ponad 500 GJ w ciągu roku.

Powyższy wynik uzyskano wykonując obliczenia zgodnie z normą PN-EN ISO 13790 [2].

Należy zwrócić uwagę na fakt, że wielkość strat na wentylację silnie zależy od liczby użytkowników obiektu. W przypadku znacznego zmniejszenia liczby uczniów i pracowników szkoły pokazane na rys. 4 proporcje mogą ulec zasadniczym zmianom.



Rys. 4. Straty ciepła w przykładowym budynku szkolnym przed i po wykonaniu termodernizacji

Fig. 4. Heat losses in an examples school building before and after its thermal upgrading

5. Podsumowanie

Uzyskanie skutecznej wentylacji w placówkach szkolnych jest zadaniem niełatwym szczególnie, gdy realizowana jest ona w sposób naturalny (grawitacyjnie). Zależy ona nie tylko od geometrii kanałów wentylacyjnych i konstrukcji budynku, ale także od rozmieszczenia pomieszczeń i otoczenia budynku oraz od warunków atmosferycznych.

W wielu przypadkach jedyną możliwością poprawy skuteczności wentylacji jest otwieranie okien, co czasem jest niemożliwe np. ze względu na panujący w okolicy budynku hałas uliczny. Stąd bierze się konieczność upowszechniania stosowania nawiewników.

Nawiewniki okienne są najczęściej wystarczającym elementem uzupełniającym istniejący system wentylacji grawitacyjnej. Montowane w górnej części okna dostarczają do pomieszczenia świeże powietrze; powietrze zanieczyszczone i wilgotne skutecznie usuwane zostaje przez system wentylacji grawitacyjnej.

Przy wykonywaniu prac termomodernizacyjnych wskazane byłoby montowanie wentylacji nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła, lecz pociąga to za sobą duże koszty. Publiczne placówki szkolne nie stać na takie rozwiązania.

Ciągle nierozstrzygnięty jest problem: wentylować czy oszczędzać. Biorąc pod uwagę potencjalne skutki zdrowotne złej wentylacji odpowiedź na to pytanie jest oczywista: wentylować!

Literatura

[1] PN-83/B-03430, 1983: Wentylacja w budynkach mieszkalnych, zamieszkania zbiorowego i użyteczności publicznej. Wymagania.

[2] PN-EN ISO 13790: 2009: Energetyczne właściwości użytkowe budynków – Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia.

[3] Rozporządzenie Ministra Edukacji Narodowej i Sportu z dnia 31 grudnia 2002 roku w sprawie bezpieczeństwa i higieny w publicznych i niepublicznych szkołach i placówkach (Dz. U. z 2002 r.. nr 6, poz.69 z późn. zm.).

[4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z 2002 r. nr 75, poz. 690 z poźn. zm.).

[5] Szmolke N.: Wentylacja w placówkach oświatowych okiem audytora energetycznego. Rozdział w monografii Nowoczesne systemy odprowadzania spalin w zjednoczonej Europie. Fakty, trendy i argumenty, s. 115, Wyd. Schiedel Polska, Opole 2009.

[6] www.teachers4energy.eu [dostęp w dniu 5 sierpnia 2013 r.].

AN AUDITOR'S LOOK ON VENTILATION IN SCHOOLS

S u m m a r y

Ventilation of school buildings forms a complex issue during their exploitation. The effectiveness of air conditioning plays an important role both to the benefit of the comfort of children learning at school and their general well-being. Poor ventilation also forms a reason for instances of loss of consciousness and fainting of people who stay inside school buildings, caused by the excessive concentration of carbon dioxide and lack of oxygen. This paper presents the approach of an energy auditor towards the issues regarding ventilation inside a school building. It was indicated that the operating system does not enable the removal of sufficient moisture from a building. If a ventilation does not operate adequately and the conditions enable frost penetration, it is possible that the phenomenon of water vapor condensing and occurrence of mycological corrosion will have to be faced. Another issue addressed in the paper involved the tendency to make the buildings extremely tight, mainly as a result of applying hermetic windows, which due to their purpose of protecting from noise and heat losses tend to completely impede access to fresh air inside the building. The most common technique used for improving air circulation, which involves quick window ventilation of classrooms is discussed in the paper. The final part of the paper indicates the energy aspects of ventilation of school buildings. The paper is complemented by examples of incorrect ventilation solutions in schools noted by the author during his work as energy auditor in educational facilities located in south-western Poland.

Keywords: gravitational ventilation, energy consumption of buildings, effects of poor ventilation, ways of airing schools

Przesłano do redakcji: 22.02.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.75

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 469-476

Norbert SZMOLKE[1]

DIAGNOSTYKA OBIEKTÓW Z WYKORZYSTANIEM KAMERY TERMOWIZYJNEJ

Termowizja to dziedzina techniki, zajmująca się detekcją, rejestracją i zobrazowaniem promieniowania podczerwonego, emitowanego z powierzchni badanego obiektu. W efekcie powstaje termogram, pokazujący rozkład temperatury na powierzchni obserwowanego obiektu. Ta technika pomiarowa stosowana jest między innymi w medycynie, podczas realizacji prac badawczych i rozwojowych, w niektórych gałęziach przemysłu, transporcie, ratownictwie oraz w wojskowości. Jest to także metoda szybkiej, w miarę dokładnej i, co ważne, nieinwazyjnej oceny cech termicznych budynku. Pozwala np. na lokalizację mostków cieplnych, nieciągłości izolacji, zawilgocenia przegród, nadmiernej infiltracji powietrza czy wreszcie wyznaczanie przebiegu instalacji grzejnych i elektrycznych. Należy pamiętać, że badania termowizyjne są bardzo ważnym składnikiem szerszego procesu jakim jest diagnostyka obiektów budowlanych. Celem tej pracy jest przedstawienie wybranych informacji nt. zastosowania pomiarów termowizyjnych w ocenie budynków. Wskazano na powszechnie popełniane błędy przy wykonywaniu termogramów, a w szczególności na wyznaczanie właściwego współczynnika emisyjności badanej powierzchni. Wspomniano również o innych uchybieniach w pomiarach, mających wpływ na osiągnięte wyniki np. nieostrość obrazu, niezachowanie kilkunastostopniowej różnicy temperatur na zewnątrz i wewnątrz budynku czy zignorowanie nasłonecznienia w dniu pomiaru (im mniejsze tym pomiar dokładniejszy). W części praktycznej tej pracy zawarto kilka przykładów zastosowania termowizji do wyznaczenia mostków w wykonanej izolacji termicznej ścian zewnętrznych, poszukiwania instalacji umieszczonej pod tynkiem czy stwierdzania nadmiernej infiltracji powietrza przez drzwi. Całość zilustrowano termogramami, wykonanymi w większości przez autora tej publikacji przy zastosowaniu kamery termowizyjnej Fluke TiR32.

Słowa kluczowe: podczerwień, termogram, mostki termiczne, emisyjność powierzchni

[1] Dr hab. inż. Norbert Szmolke, prof. PO, Politechnika Opolska, Katedra Inżynierii Środowiska, ul. S. Mikołajczyka 5, 45 – 271 Opole, Tel. 77 449 83 91, e-mail: n.szmolke@po.opole.pl

1. Wprowadzenie

Pod pojęciem termowizji kryje się, wykorzystywana od lat 60-tych ubiegłego wieku, technika pomiarowa, polegająca na rejestracji obrazu, emitowanego w podczerwieni przez badany obiekt. Stosowana jest powszechnie w wielu dziedzinach nauki i techniki, m.in.:

- wspomagania przemysłu (kontrola linii produkcyjnych, wykrywanie i lokalizacja defektów w obiektach budowlanych, monitorowanie linii przesyłowych energii elektrycznych, diagnostyka maszyn i urządzeń, kontrola dystrybucji ciepła),
- w medycynie (diagnostyka medyczna, wspomaganie operacji czy badania skuteczności leków); tutaj wykorzystuje się ważną cechę organizmu ludzkiego jaką jest to, że rozkład temperatury na powierzchni ciała ludzkiego zależy m.in. od temperatury narządów wewnętrznych,
- badań i rozwoju (obserwacje meteorologiczne, obserwacja wulkanów i innych fragmentów powierzchni Ziemi, analiza strat ciepła i mechanizmów przewodzenia ciepła, projektowanie silników),
- w wojskowości (wykrywanie celów, systemy śledzenia obiektów i naprowadzania na nie, broń „inteligentna"),
- w ratownictwie (lokalizacja ofiar, lokalizacja ognia, obserwacja zjawisk w przestrzeniach zadymionych),
- w transporcie (monitorowanie ruchu pojazdów samochodowych i lotniczych),
- w ochronie (ochrona granic, wykrywanie intruzów, systemy alarmowe) [2].

Celem tej pracy jest przedstawienie wybranych informacji nt. zastosowania pomiarów termowizyjnych w diagnostyce obiektów budowlanych. Zostaną omówione popełniane błędy przy wykonywaniu termogramów. W części praktycznej zawarto kilka przykładów zastosowania termowizji do wyznaczenia mostków w wykonanej izolacji termicznej ścian zewnętrznych, poszukiwania instalacji umieszczonej pod tynkiem czy stwierdzania nadmiernej infiltracji powietrza przez drzwi. Całość zilustrowano termogramami, wykonanymi przez autora tej publikacji przy zastosowaniu kamery termowizyjnej Fluke TiR32 [1].

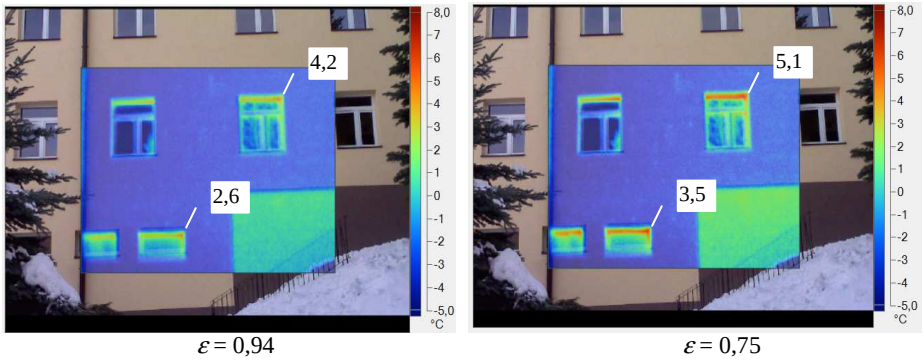
2. Termowizja w budownictwie

Głównym zadaniem badań termowizyjnych, wykonywanych na obiektach budowlanych, jest kontrola jakości izolacji termicznej i lokalizacja mostków termicznych. Pozwalają one na szybką, nieinwazyjną diagnostykę wykonanych prac termoizolacyjnych, a szczególnie jakości ich wykonania. Należy pamiętać, że ze względu na szereg trudności w przeprowadzeniu badań na tego typu obiektach ich wyniki często mają charakter jakościowy. Możliwe jest wskazanie miejsc o innej temperaturze niż temperatura otoczenia bez wyznaczania jej

konkretnej wartości. Ponadto należy zauważyć, że badania termowizyjne są bardzo ważnym składnikiem szerszego procesu jakim jest kompleksowa diagnostyka obiektów budowlanych.

Podstawowym problemem, który pojawia się podczas pomiarów termowizyjnych jest wyznaczenie współczynnika emisyjności ε powierzchni emitującej promieniowanie podczerwone. Jego błędne wyznaczenie może prowadzić do uzyskania wyników, znacznie odbiegających od wartości rzeczywistej (rys.1). Im niższa jest wartość tego parametru tym wyznaczona, na podstawie termogramu, temperatura jest wyższa. Istotna rolę odgrywa także temperatura odniesienia.

Badania termowizyjne w budownictwie wykorzystywane są do sprawdzania jakości i szczelności izolacji budynków. Są szybką, nowoczesną i niezawodną metodą diagnostyczną izolacyjności cieplnej budynków oraz jakości wykonania izolacji. Na wiarygodność pomiaru temperatury przy pomocy termowizji ma wpływ szereg czynników towarzyszących pomiarowi. Dokładny pomiar rozkładu temperatury wymaga dodatkowych zabiegów mających na celu określenie emisyjności badanej powierzchni, wyeliminowanie wpływu ewentualnych błędów w jej wyznaczeniu oraz określenie wpływu otoczenia na wynik pomiaru. Z powodu tych trudności w termowizyjnych badaniach izolacyjności cieplnej ścian budynków stosuje się na ogół podejście jakościowe, lokalizując jedynie miejsca o podwyższonej temperaturze i tym samym o nadmiernych stratach ciepła, nie dążąc się do wyznaczenia dokładnej wartości temperatury.



$\varepsilon = 0{,}94$ $\varepsilon = 0{,}75$

Rys.1. Przykład wpływu współczynnika emisyjności ε na wyniki pomiarów temperatury

Fig.1. Example of the effect of heat emissivity coefficient ε on the results of temperature measurements

Dodatkowo, aby badanie było wiarygodne i doszło do skutku, różnica temperatur na zewnątrz i wewnątrz budynku powinna wynosić przynajmniej 15°C. Istotnym czynnikiem jest również nasłonecznienie (im mniejsze tym lepiej).

W budownictwie badania termowizyjne stosowane są również w celu określenia np. czy ramy stolarki okiennej są osadzone poprawnie, do wykrywania wad ogrzewania podłogowego oraz niedrożności instalacji grzewczej.

W ostatnich latach pomiary termowizyjne służą producentom okien, wykonywanych z PVC i nie tylko, do oceny jakości tzw. „ciepłej ramki" co staje się niestety elementem ich walki o utrzymanie pozycji na rynku wytwórców.

Wspomnieć należy także, że okres wykonywania badań z użyciem kamery termowizyjnej ograniczony jest w zasadzie do tzw. sezonu grzewczego, co spowodowane jest koniecznością uzyskania odpowiedniej różnicy temperatur po obu stronach przegrody.

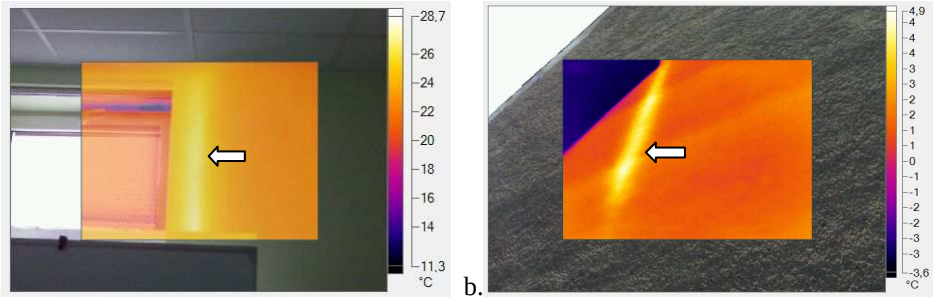
3. Przykłady badań z zastosowaniem kamery termowizyjnej

W tej części pracy pokazano przykłady termogramów, powstałych podczas diagnostyki obiektów budowlanych, zlokalizowanych w Polsce południowo-zachodniej.

Jako pierwszy (rys.2a) pokazano termogram pozwalający na lokalizację pionu grzejnego ulokowanego w bruździe ściennej. Kolejny rysunek (rys.2b) przedstawia ułożenie kanału spalinowego, zlokalizowanego w ścianie zewnętrznej.

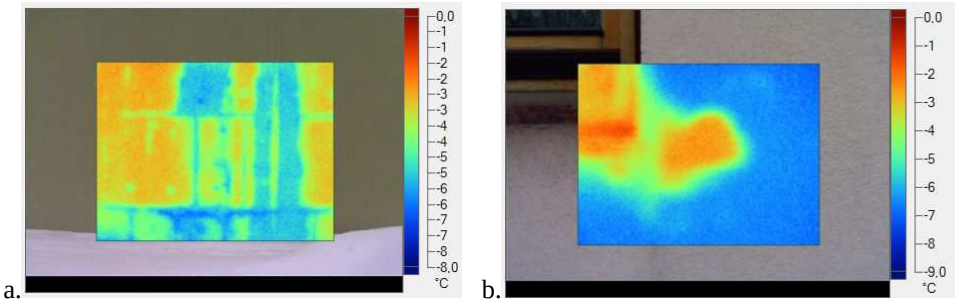
Na rys. 3a pokazano liczne mostki cieplne, które powstały w wyniku niestarannego ułożenia ocieplenia ze styropianu. Widoczne są krawędzie płyt co oznacza, że podczas ich przyklejania nie przylegały do siebie a powstałe w ten sposób szczeliny wypełniono masą klejową.

Na rys. 3b pokazano mostek termiczny, powstały w skutek niedbałego ułożenia izolacji termicznej w okolicy narożnika wnęki okiennej. Zapewne spowodowany jest złym docięciem płyty izolacyjnej i słabym wypełnieniem powstałej w ten sposób szczeliny.



Rys.2. Lokalizacja instalacji w budynku
a. pion grzejny w ścianie
b. komin spalinowy

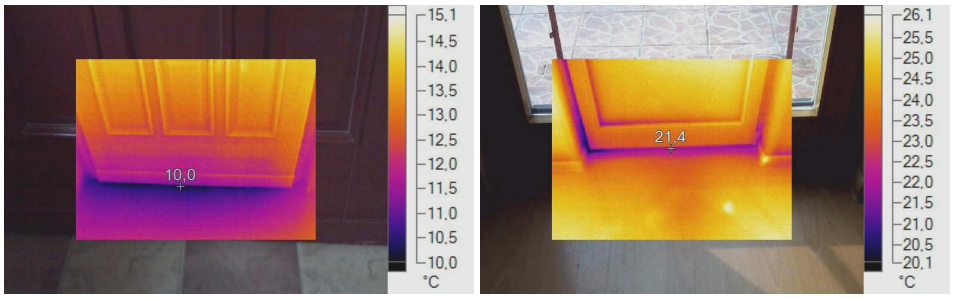
Fig.2.Location of building installations
a. riser heating in the wall
b. combustion stack.



Rys.3. Diagnostyka ocieplenia – mostki termiczne
a. ściana zewnętrzna
b. narożnik wnęki okiennej

Fig.3. Diagnostics insulation - thermal bridges
a. of external wall
b. corner of window alcove

Następne termogramy, pokazane na rysunku 4, wskazują na infiltrację powietrza przez stolarkę drzwiową. Aby ocenić, czy jest ona właściwa i dopuszczalna należałoby odnieść wyniki pomiarów do warunków jej występowania w badanym obiekcie. Bez przeprowadzenia tych czynności wyciąganie jakichkolwiek wniosków będzie błędem.



Rys.4. Infiltracja powietrza przez stolarkę drzwiową

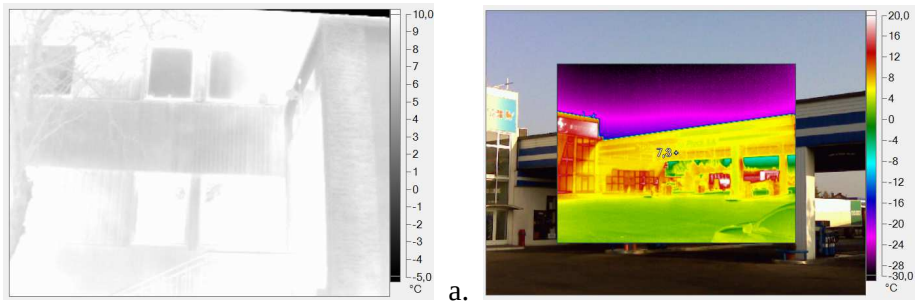
Fig.4. Air infiltration through the door joinery

4. Błędy popełniane podczas pomiarów termowizyjnych

Do powszechnie popełnianych błędów podczas wykonywaniu badań za pomocą kamery termowizyjnej należy zaliczyć:

- niewłaściwe wyznaczenie bądź oszacowanie współczynnika emisyjności (p. rozdział 2),
- niewłaściwie określoną wielkość rejestrowanego obrazu, co powiązane jest ze zbyt dużą odległością kamery od badanego obiektu oraz jej ustawienia w stosunku do badanej powierzchni,

- niewłaściwie ustawioną ostrość obrazu (rys.5a),
- wyeksponowanie nieboskłonu (rys.5b),



a. b.

Rys.5. Błędy pomiarowe
a. obraz nieostry
b. wyeksponowanie nieboskłonu

Fig.5. Measurement errors
a. picture out of focus
b. visibility the firmament

- brak umiejętności operatora,
- zlekceważenie wpływu warunków atmosferycznych w jakich przeprowadzony jest pomiar,
- zbyt mała różnica temperatur pomiędzy wnętrzem budynku a jego otoczeniem,
- niepoprawna interpretacja termogramów,
- brak rozpoznania obiektu badań przed wykonaniem pomiarów,
- pominięcie takich istotnych elementów jak nadmiernie rozgrzane grzejniki centralnego ogrzewania, działające oświetlenie pomieszczeń, zły kąt ustawienia kamery w stosunku do badanej powierzchni .

Powyższe zestawienie nie wyczerpuje wszystkich możliwych błędów; jest ich znacznie więcej, a ich obszerne omówienie można znaleźć w pracy [3]. Tam też zwrócono uwagę, że aby uniknąć większości błędów należy mieć świadomość ograniczeń samej metody pomiarowej oraz należy konsekwentnie przestrzegać procedur i zasad wykonywania pomiarów.

Autor tej pracy zauważył także, w nawiązaniu do interpretacji termogramów, że nie każde zróżnicowanie rozkładu temperatur na granicznych powierzchniach przegród świadczy o usterkach w ich izolacji, nadmiernej infiltracji powietrza przez przegrody czy ich zawilgoceniu. Często pobieżna analiza obrazu z kamery termograficznej może doprowadzić do wyciągnięcia pochopnych wniosków.

5. Podsumowanie

Pomiary z wykorzystaniem kamer termowizyjnych będą w najbliższej przyszłości wykonywane coraz częściej ze względu na ich prostotę, szybkość realizacji i przydatność. Osiągane wyniki wydają się być coraz dokładniejsze, szczególnie jeśli oczekuje się jakościowego podejścia do rezultatów. Jednakże, jak wynika również z doświadczeń autora tej pracy, ilościowa informacja o temperaturze na powierzchni przegrody jest bezwartościowa jeśli nie zostaną podane (i uwzględnione w analizie) informacje o warunkach wykonania pomiarów. Sam termogram podaje informacje o rozkładzie temperatury w wybranym obszarze pomiarowym, które mogą być istotne, pod warunkiem odniesienia ich do charakterystyki analizowanego obiektu i, idących za tym, informacji o mechanizmach przepływu ciepła w nim występujących.

Celem tej pracy było przedstawienie wybranych informacji nt. zastosowania pomiarów termowizyjnych w diagnostyce budynków. Wskazano na powszechnie popełniane błędy przy wykonywaniu termogramów, w tym trudności w wyznaczaniu współczynnika emisyjności przegrody. Całość zilustrowano termogramami, obrazującymi występowanie mostków termicznych czy nieciągłości w wykonanej izolacji cieplnej.

Literatura

[1] Fluke: Test tools catalog 2013-14, Wydawca Fluke Europe BV, Eindhoven, Holandia 2013.

[2] Madura H., Minkinia W.: Budowa, parametry i zastosowania kamer termowizyjnych. Pomiary termowizyjne w praktyce. Wydawnictwo Agencja Wydawnictwa PAK, 2004.

[3] Nowak H.: Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie. Wydawnictwo Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.

DIAGNOSTICS OF BUILDINGS USING THERMAL IMAGING TECHNIQUES

S u m m a r y

Thermal imaging is a field of engineering which deals with detecting, recording and imaging of ultra-violet radiation emitted from the surface of the examined object. As a result, a thermogram can be formed to illustrate the distribution of temperatures along the surface of the observed object. This method enables a quick, precise and non-invasive assessment of thermal parameters of a building. This also makes it possible to locate thermal bridges, non-continuous elements in insulation, moisture in the internal barriers, excessive air infiltration and the course of the thermal and electrical installations. This paper deals with selected information regarding the application of thermal visual measurement in the assessment of buildings. The common errors during the preparation of thermograms are presented. Other subjects dealt with cover other types of errors made in

measurements which affect their results, such as: blurred image quality, lack of specific range of temperature intervals between the exterior and interior of a building or the fact of ignoring the influence of sun on the days of the measurement (the smaller the sun exposition, the more precise measurement can be made). The practical part of the paper includes a few examples of applying thermal imaging for determining thermal bridges in the thermal insulation installed on the external walls, search for wall installation or indication of excessive air infiltration through the doors. The paper is complemented with thermograms which were predominantly prepared by the author of this paper with the use of Fluke TiR32 camera for thermal imaging.

Keywords: infrared, thermogram, thermal bridges, the emissivity of the surface

Przesłano do redakcji: 22.02.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.76

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 477-486

Mateusz SZUBEL[1]
Mariusz FILIPOWICZ[2]

ANALIZA NUMERYCZNA PRACY URZĄDZEŃ GRZEWCZYCH MAŁEJ MOCY ZASILANYCH BIOMASĄ

Współczesne urządzenie grzewcze niewielkiej mocy, do zastosowań w energetyce rozproszonej, powinno cechować się wysoką sprawnością konwersji energii i parametrami pracy spełniającymi wymagania, związane z ochroną środowiska. Ponadto istotne jest zachowanie prostoty budowy, co pozwala na redukcję kosztów wykonania takiej jednostki. Analiza numeryczna to obecnie najefektywniejsza forma prowadzenia procesu optymalizacji parametrów pracy pieców, czy kotłów, ze względu na szybkość uzyskiwania wyników i brak konieczności wykonania kolejnych prototypów. Sprowadzenie rzeczywistego urządzenia do postaci modelu teoretycznego pozwala na rozwiązanie wielu problemów, dotyczących m.in. optymalizacji transferu ciepła, dystrybucji powietrza w procesie spalania, charakterystyki procesu spalania, czy parametrów spalin. W artykule przedstawiono szereg możliwości zastosowania narzędzi analizy numerycznej do określenia parametrów pracy wymiennika akumulacyjnego, stanowiącego element instalacji pieca grzewczego małej mocy, zasilanego biomasą (głównie drewnem kawałkowym). W ramach prac badawczych wykonano pomiary temperatury spalin i prędkości ich przepływu wewnątrz kanału wymiennika. Walidację modelu przeprowadzono na podstawie pomiaru temperatury na wlocie i wylocie z przewodu, łączącego komorę spalania z czopuchem, przy czym osiągnięty został satysfakcjonujący stopień zgodności danych eksperymentalnych i rezultatów obliczeń. Prezentowane wyniki symulacji pozwoliły m.in. na ocenę wpływu geometrii akumulacyjnego wymiennika ciepła na stopień odzysku energii cieplnej ze spalin oraz obserwację rozkładu temperatury na powierzchni masy akumulacyjnej. Przeprowadzono także analizy, dotyczące charakterystyki przepływu gazów w obrębie kanału spalinowego wymiennika.

Słowa kluczowe: piece na biomasę, modelowanie numeryczne, CFD, drewno

---

[1] Autor do korespondencji: Mateusz Szubel, AGH Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, 0126173428, mszubel@agh.edu.pl.

[2] Mariusz Filipowicz, AGH Akademia Górniczo – Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, Al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, 0126175192, filipow@agh.edu.pl.

1. Wstęp

1.1. Urządzenia grzewcze zasilane biomasą a generacja rozproszona

Aż do epoki industrialnej, drewno stanowiło podstawowy nośnik energii pierwotnej [1]. Obecnie ze względu na ogromną popularność biopaliw i potencjał energetyczny biomasy, wykorzystanie drewna jako paliwa wzrasta. Niska zawartość popiołu (rzędu 1% dla drewna odpadowego [2]), siarki czy chloru (po ok. 0,1% dla drewna odpadowego [2]), a także dostępność i koszt paliwa zdecydowanie niższy w porównaniu z węglem i gazem ziemnym, to argumenty, które sprawiają, iż rzesza zwolenników ogrzewania domów ciepłem z drewna rośnie. Doświadczenia wskazują, iż ze względów technologicznych i logistycznych wykorzystanie biomasy w instalacjach polskiej energetyki zawodowej, opartej na węglu jest niezwykle problematyczne. Mimo to, w najbliższej przyszłości warto wciąż rozpatrywać biomasę jako nośnik energii pierwotnej, w tym szczególnie słomę i drewno, w kontekście dążeń do wypełnienia zobowiązań międzynarodowych, dotyczących zwiększania udziału energii ze źródeł odnawialnych (OZE) w całkowitym zużyciu energii końcowej. Szczególnie zasadne zdaje się stosowanie drewna w domowych urządzeniach grzewczych, przystosowanych lub dedykowanych do spalania tego typu paliwa. w odpowiedzi na wzrastającą popularność kotłów zasilanych drewnem, w ostatnich latach producenci zaoferowali wiele nowych jednostek z serii tzw. „kotłów zgazowujących" (przykładem mogą być urządzenia opisane w [3, 4]), zasilanych drewnem kawałkowym (szczapy), o mocach od kilkunastu nawet do 100kW. Inny kierunek rozwoju generacji rozproszonej opartej na drewnie to piece ze zintegrowanym ceramicznym wymiennikiem akumulacyjnym. Są to wysokosprawne jednostki grzewcze, cechujące się zdecydowanie prostszą niż kotły zgazowujące budową i zasadą działania. Komora paleniskowa nowoczesnej jednostki tego typu konstrukcyjnie zbliżona jest do klasycznych wkładów kominkowych z szybą, przy czym korpus paleniska wykonany jest z materiału ceramicznego [5].

1.2. Akumulacyjne wymienniki ciepła

W przypadku pieców na drewno ze zintegrowanym wymiennikiem akumulacyjnym, właśnie ten ostatni element decyduje o wysokim stopniu wykorzystania energii zawartej w paliwie.

Dzięki zastosowaniu przewodu dymowego w postaci ceramicznego (akumulacyjnego) kanału, wymuszającego wielokrotne zmiany kierunku ruchu spalin, droga ich przepływu do zasadniczej części komina zostaje wydłużona. Skutkuje to ogrzaniem materiału akumulacyjnego kosztem temperatury spalin. Materiał, z którego wykonany jest taki wymiennik ciepła powinien być dobrany tak, aby pojemność cieplna i współczynnik przewodzenia ciepła (λ) były możliwie jak najwyższe, dzięki czemu energia cieplna przejęta w przewodzie dy-

mowym jest oddawana długo i równomiernie (nawet przez 8 do 12 godzin [5]). Akumulacyjne wymienniki ciepła budowane są z prefabrykowanych elementów odlewanych w formach. Przykład podstawowego modułu do budowy masy akumulacyjnej pieca na drewno przedstawiony jest na rysunku 1.



Rys. 1. Przykład podstawowego ceramicznego elementu prefabrykowanego do budowy akumulacyjnego wymiennika ciepła

Fig. 1. An example of basic prefabricated ceramic element of accumulative heat exchanger

1.3. Analiza pracy i proces optymalizacji urządzeń grzewczych małej mocy z wykorzystaniem metod numerycznych

Proces implementacji przepisów wprowadzanych przez Unię Europejską (UE) wymusza zwiększanie sprawności urządzeń grzewczych oraz redukcję emisji zanieczyszczeń do poziomu niższego niż obowiązujące progi (np. w przypadku pieców z paleniskiem i wymiennikiem akumulacyjnym wymagania określa [6]).

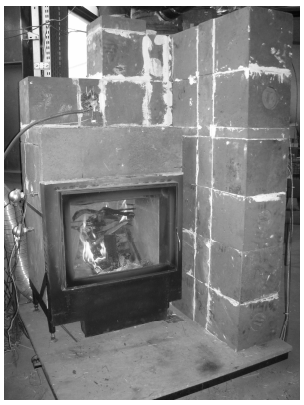
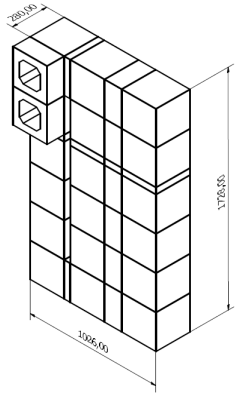
Osiąganie satysfakcjonujących warunków pracy urządzeń grzewczych wymaga ciągłej optymalizacji ich parametrów. Efektywną metodę wspomagania decyzji w zakresie wdrażania innowacji technicznych stanowi modelowanie numeryczne, w tym CFD (ang. „Computational Fluid Dynamics") – narzędzie łączące eksperymentalne i analityczne podejście do badań naukowych, poprzez umożliwianie wykonywania symulacji, związanych przede wszystkim z przepływem płynów i transferem ciepła w obrębie jednego i wielu ośrodków [7].

2. Charakterystyka badanego wymiennika akumulacyjnego oraz celu analizy numerycznej

W dalszej części niniejszego artykuł opisano proces przygotowania oraz rezultaty symulacji numerycznej pracy akumulacyjnego wymiennika ciepła, zintegrowanego z piecem dedykowanym do spalania drewna. Analizy eksperymentalne przeprowadzono w oparciu o jednostkę widoczną na rysunku 2.

W przypadku badanego urządzenia, spaliny opuszczające komorę spalania przemieszczają się w górę, ponad deflektor, a następnie do kanału wymiennika, stanowiącego „ścianę grzewczą" umieszczoną obok paleniska.

Wymiennik zbudowany jest z betonu akumulacyjnego. Kanał wewnętrzny tworzy „meander", przy czym zmiana kierunku następuje w każdym kolejnym rzędzie prefabrykowanych elementów. Szyber zamontowany w centralnym elemencie nad komorą paleniskową umożliwia skierowanie strumienia gorących spalin do wymiennika, a następnie pionowym odcinkiem kanału do najniższego jego poziomu, albo bezpośrednio do komina. Ta ostatnia nastawa jest stosowana w fazie rozpalania wsadu paliwa, dla uzyskania odpowiedniego podciśnienia – ciągu kominowego.

a)  b) 

Rys. 2. Piec na biomasę złożony z paleniska oraz akumulacyjnego wymiennika ciepła: (a) kompletna jednostka, (b) schemat wymiennika

Fig. 2. Biomass furnace consist of the fireplace and the accumulative heat exchanger: (a) complete unit, (b) schematic of exchanger

Celem analizy numerycznej opisanego wyżej wymiennika było zbadanie wpływu geometrii kanału wewnętrznego na prędkość i turbulentność strumienia spalin oraz obserwacja stopnia nagrzewania się róznych obszarów konstrukcji. Rozkład temperatury obserwowano dla powierzchni zewnętrznej wymiennika oraz dla przekroju poprzecznego, gdzie możliwa była jednoczesna analiza wartości temperatury w róznych obszarach masy akumulacyjnej i strumienia spalin.

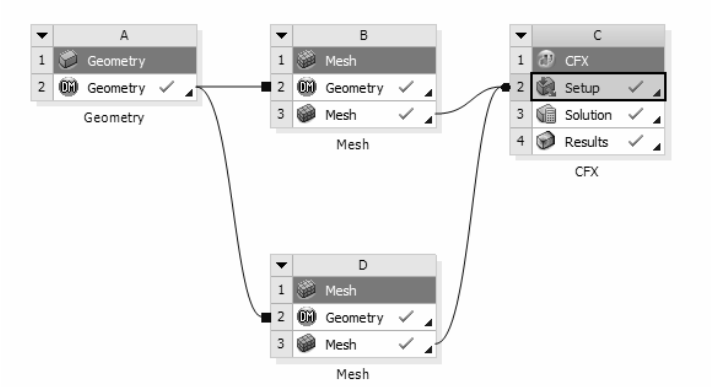
Informacje zdobyte w wyniku obliczeń mogą stanowić podstawę zmian w zakresie budowy całego wymiennika oraz indywidualnych elementów konstrukcyjnych, dostarczają danych dotyczących optymalnych wymiarów (szczególnie wysokości) wymiennika, punktów usytuowania

wyczystek, czy czujników pomiarowych zintegrowanych z ewentualnym kontrolerem procesu spalania.

3. Model numeryczny akumulacyjnego wymiennika ciepła

Do przeprowadzenia obliczeń wykorzystano komercyjne oprogramowanie ANSYS CFX, wchodzące w skład środowiska ANSYS Workbench 14.

Ze względu na charakter modelowanych zjawisk, zachodzących w obrębie rozpatrywanego wymiennika ciepła, na potrzeby przeprowadzenia symulacji zdefiniowano dwie domeny, reprezentujące materiał akumulacyjny (ciało stałe) oraz strumień spalin wewnątrz kanału (płyn). Następnie domeny zostały poddane indywidualnej obróbce w zakresie generacji siatki, definicji warunków brzegowych, wartości parametrów fizycznych itp. Sprzężenie obydwu części modeli zrealizowano za pośrednictwem funkcji „Interface". Rysunek 3 prezentuje budowę modelu w środowisku Workbench 14.



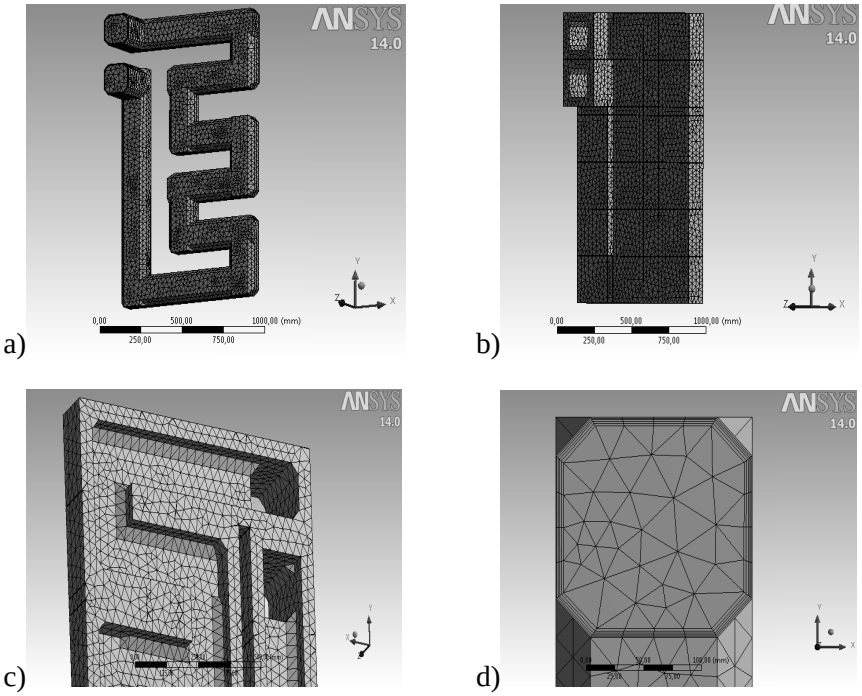
Rys. 3. Zależności pomiędzy poszczególnymi elementami modelu reprezentującymi procesy przygotowania i przeprowadzenia symulacji

Fig. 3. Relations between elements of model, which represent processes of preparation and performance of the simulation

3.1. Geometria i siatka

Projekt wymiennika ciepła został wykonany w programie Inventor2013, a następnie zaimportowany do środowiska ANSYS Workbench 14, gdzie za pośrednictwem narzędzia „Design Modeler" geometria została przeniesiona do generatora siatek „ANSYS Meshing". Zarówno w przypadku domeny płynu, jak i ciała stałego, siatka została wygenerowana automatycznie, przy czym w pierwszym przypadku liczba elementów siatki wyniosła $7 \cdot 10^4$, w drugim natomiast $7{,}7 \cdot 10^4$. Dalsze zagęszczanie siatki okazało się bezzasadne, z uwagi na uzyskanie zadowalającej zbieżności wyników obliczeń i danych

z pomiarów eksperymentalnych. Widok ogólny wygenerowanych siatek jest prezentowany na rysunkach 4-a, 4-b. Dodatkowo rysunek 4-c przedstawia przekrój poprzeczny wymiennika.



Rys. 4. Siatki wygenerowane dla domeny płynu i wymiennika: (a) płyn – widok ogólny, (b) wymiennik – widok ogólny, (c) warstwa przyścienna płynu, (d) przekrój przez wymiennik

Fig. 4. Meshes generated for fluid and solid domain: (a) fluid - general view, (b) solid - general view, (c) cross-section of heat exchanger, (d) inflation layer in fluid domain

W celu uchwycenia zjawisk zachodzących w warstwie przyściennej płynu, siatka została w tym obszarze zagęszczona. Zastosowano 5 warstw, przy współczynniku wzrostu grubości warstwy równym 1,2 i maksymalnej grubości warstwy równej 5mm. Siatka w obszarze warstwy przyściennej jest widoczna na rysunku 4-d.

3.2. Dobór warunków brzegowych oraz parametrów obliczeń

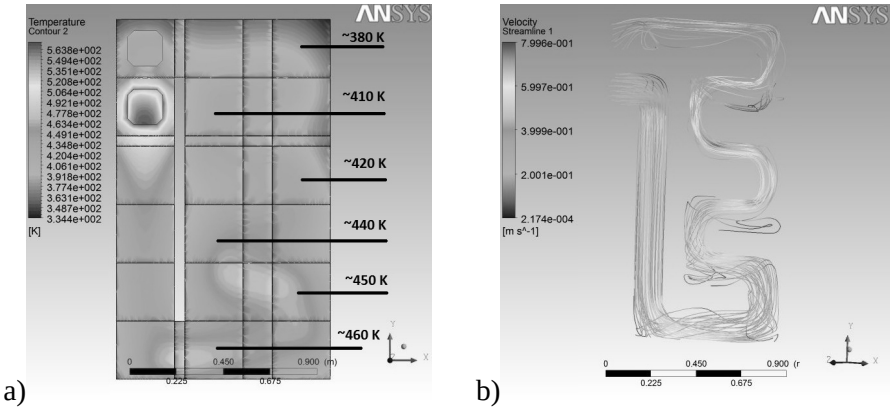
Uwzględnienie zjawisk turbulencji przepływu spalin zrealizowano poprzez zastosowanie modelu turbulencji SST (ang. Shear – Stress Transport), rekomendowanego dla tego typu obliczeń [7]. Jest to podejście bazujące na połączeniu równań modelu k-ε oraz k-ω, przy czym o wykorzystaniu danego modelu decyduje wartość funkcji dwustanowej (0 lub 1 w zależności od położenia obli-

czanego elementu względem ścianki domeny). W zakresie warunków inicjalizacji przepływu spalin założono dla tej domeny średnią intensywność turbulencji na poziomie 5%. Przyjęto, iż jest to domena ciągła. Pominięto natomiast oddziaływania wynikające z siły grawitacji. Dane graficzne prezentowane w dalszej części artykułu wygenerowano w post – procesorze dla prędkości płynu na wlocie do wymiennika równej 0,2m•s^{-1} i temperatury 300˚C. Parametrem zdefiniowanym na wylocie z wymiennika było podciśnienie równe -12Pa (jest to wartość zalecana przez producenta dla analizowanego urządzenia). Płaszczyznę przekroju wymiennika, przebiegającą prostopadle do podłoża w równej odległości od obu dużych powierzchni grzewczych wymiennika akumulacyjnego zdefiniowano jako płaszczyznę symetrii. Założono temperaturę pokojową (20˚C) w otoczeniu jednostki grzewczej.

Pomiar temperatury wejściowej spalin wykonywano przy użyciu termopary PTTK, natomiast temperaturę wyjściową mierzono czujnikiem rezystancyjnym PT100. W celu określenia prędkości płynu wykonano szereg pomiarów sondą anemometryczną (DELTA OHM), przy czym sonda była umieszczana w otworach wywierconych w wybranych punktach akumulacyjnego wymiennika ciepła. Odpowiednią wartość ciągu kominowego zapewniała nastawa miarkownika ciągu, zamontowanego na przewodzie dymowym.

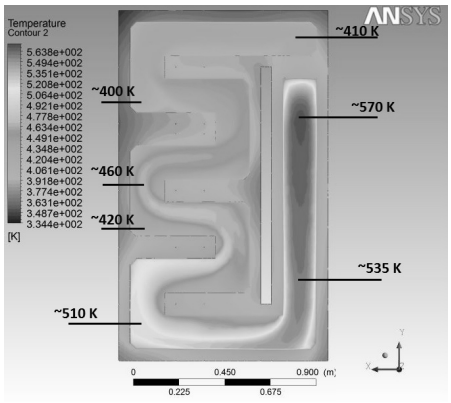
4. Prezentacja i omówienie wyników symulacji pracy akumulacyjnego wymiennika ciepła

Rysunek 5-a prezentuje rozkład temperatury na powierzchni akumulacyjnego wymiennika ciepła przy ustabilizowanym strumieniu energii przez ściankę konstrukcji do otoczenia. Z uwagi na fakt stopniowego wychładzania się spalin obserwujemy systematyczny spadek temperatury powierzchni zewnętrznej kanału w miarę przemieszczania się ku wylotowi. Porównanie rysunku 5-a z rysunkiem 5-b umożliwia zaobserwowanie wpływu wielokrotnych zmian kierunku przepływu spalin na rozkład temperatury w obrębie wymiennika. Obszary, w których obserwujemy dużą turbulentność przepływu oraz relatywnie niską prędkość strumienia spalin cechują się intensywniejszym transferem ciepła z płynu do ścianek wymiennika. W związku z tym także temperatura notowana na powierzchni ściany zewnętrznej jest wyższa. Wewnętrzne „półki" tworzone przez meander kanału są wyraźnie chłodniejsze niż ściany zewnętrzne wymiennika, ze względu na nagły wzrost prędkości strumienia spalin, przepływającego pod półką do obszaru wzniesienia się na kolejną kondygnację wymiennika i zmiany kierunku ruchu.



Rys. 5. Przykładowe rezultaty symulacji numerycznej pracy akumulacyjnego wymiennika ciepła: (a) rozkład temperatury na powierzchni ściany, (b) linie prezentujące przepływ płynu

Fig. 5. Examples of results of numerical simulation of accumulative heat exchanger operation: (a) distribution of temperature on the surface of wall, (b) stream lines of fluid flow



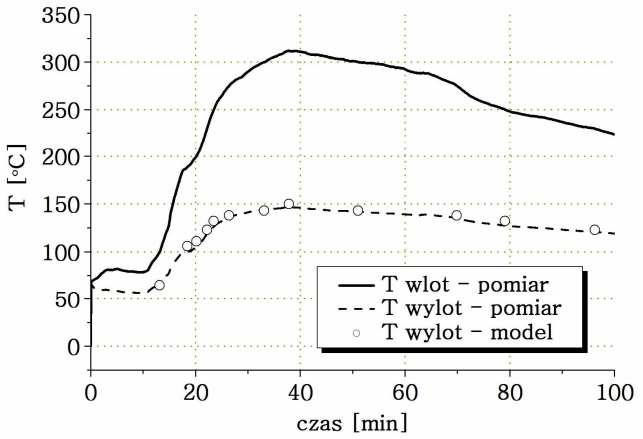
Rys. 6. Rozkład temperatury w obrębie wymiennika ciepła i płynu dla przekroju poprzecznego (płaszczyzna symetrii)

Fig. 6. Distribution of temperature in area of heat exchanger and fluid in cross-section (symmetry plane)

Na podstawie rysunku 6 można stwierdzić, iż moc paleniska w rozpatrywanym układzie pozwala na niewielkie zwiększenie wymiarów wymiennika, z uwagi na relatywnie wysoką temperaturę spalin ulatujących do komina.

Na poniższym wykresie (Rys. 7.) widoczne jest porównanie krzywej temperatury na wylocie z wymiennika spalin, mierzonej przez termoparę i wybranych punktów, stanowiących wynik symulacji. W wyniku symulacji uzyskano satysfakcjonujący poziom zbieżności obliczeń z danymi pomiarowy-

mi, przy czym najwyższa wartość odchyłki bezwzględnego dla danego punktu wyniosła 6,5K, natomiast najmniejsza 1,2K, przy średniej temperaturze ok. 150˚C. Średnia wartość błędu wyniosła 3,5K.



Rys. 7. Porównanie krzywej temperatury spalin na wylocie z wymiennika, wyznaczonej eksperymentalnie oraz stanowiącej rezultat obliczeń, przeprowadzonych na podstawie temperatury spalin na wlocie do wymiennika

Fig. 7. Comparison of outlet temperature curve, which was found as a result of experiment, with result of numerical simulation, calculated based on inlet temperature

5. Podsumowanie

Budowa modelu numerycznego, przeprowadzenie symulacji i pomyślnej walidacji uzyskanych danych umożliwia prowadzenie kompleksowych analiz pracy badanego akumulacyjnego wymiennika ciepła. Zamodelowanie układu z wykorzystaniem CFD pozwoliło na uzyskanie danych, stanowiących podstawę dla ustalenia nominalnego wsadu drewna dla danego paleniska oraz optymalnych wymiarów wymiennika ciepła, pozwalających na maksymalne wykorzystanie energii, generowanej w procesie spalania, a co za tym idzie maksymalizację sprawności wypadkowej układu. Aby w pełni określić warunki pracy urządzenia sugeruje się rozbudowę modelu o proces spalania, dzięki czemu zestaw wyników wzbogaci się o poziom emisji substancji szkodliwych.

Artykuł opracowany w ramach projektu badawczego Województwa Małopolskiego realizowanego przez firmę CEBUD we współpracy z WEiP AGH.

Literatura

[1] Kordylewski W.: Spalanie i Paliwa, Oficyna wydawnicza politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.

[2] Kruczek K.: Kotły. Konstrukcje i obliczenia, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001.

[3] Ogrzewanie drewnem, http://www.viessmann.pl/content/dam/internet-pl/pdf_documents/ogrzewanie_drewnem [dostęp: 8 maja 2014 r.].

[4] Kotły na drewno, http://www.atmos.cz/poland/kotle-001-kotle-na-drevo [dostęp: 8 maja 2014 r.].

[5] Materiału informacyjne firmy CEBUD, http://www.cebud.eu/index.php?page=news&kid=2&pkid=29 [dostęp: 7 maja 2014].

[6] PN-EN 13229: wkłady kominkowe wraz z kominkami otwartymi na paliwa stałe. Wymagania i badania.

[7] Chaoqun L., Jiyuan T., Guan-Heng Y., Computational Fluid Dynamics. A practical Approach, Butterworth-Heinemann, Oxford 2013.

THE NUMERICAL ANALYSIS OF OPERATION OF THE SMALL – SCALE BIOMASS HEATING DEVICES

S u m m a r y

Contemporary small-scale heating devices for applications in households have to be characterized by high efficiency of the energy conversion and operation parameters, which meet requirements related with the environment protection. Moreover, it is important to maintain relatively simple design, what provides reduction of the production costs. The numerical analysis is currently the most effective method for conduction of the optimization process, also in case of heating devices, such as biomass boilers or accumulative furnaces. The paper presents serie of possibilities to use numerical analysis tools for definition of the parameters of accumulative heat exchanger operation. Studied device is an integral element of system of small-scale biomass (mainly hardwood) furnace. In frames of experimental works, measurement of temperature and velocity of exhaust inside exchanger duct has been performed. The temperature distribution on the outer surface of accumulative mass has been found with use of infrared camera. Validation of numerical model was performed by measurement of temperature at the inlet and outlet of heat exchanger. Good agreement of experimental data and simulation has been reached. Results of numerical modeling, which are presented in the paper allowed to evaluate influence of exchanger geometry on degree of thermal energy accumulation and observation of temperature distribution on the surface of accumulative mass. Characteristic of the gas flux inside exhaust duct has been defined.

Keywords: Biomass furnaces, numerical modeling, CFD, wood

Przesłano do redakcji: 9.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.77

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 487-494

Marek SZYMCZAK[1]
Andrzej TOMPOROWSKI[2]

WYSUSZONY OSAD ŚCIEKOWY I BIOMASA JAKO PALIWO ODNAWIALNE

W artykule przedstawiono sposób termicznej utylizacji wysuszonego osadu ściekowego, w procesie zgazowania biomasy powstałej ze słomy oraz kory w postaci luźnej bądź sprasowanej, co stanowi mieszaninę paliwa odnawialnego o różnych udziałach masowych w celu podniesienia efektywności wykorzystania wysuszonego osadu ściekowego o zawartości 90% s.m. w gospodarce cieplnej i energetycznej. Stosowanie techniki zgazowywania i pirolizy w procesach termicznych konwersji energii chemicznej paliw odnawialnych w tym słomy i kory jest możliwe. Wytworzony gaz ulega spalaniu w komorze spalania kotła, a uzyskane ciepło w wyniku procesów termicznych, wykorzystywane może być do celów grzewczych. Stosowanie paliw odnawialnych w energetyce i ciepłownictwie może przyczynić się do wdrożenia recyklingu odpadów. Zastąpienie węgla kamiennego w ciepłownictwie zmniejszy emisję pyłów, szkodliwych związków do atmosfery przez zastosowanie bezodpadowego i nisko emisyjnego spalania biomasy z wykorzystaniem pirolizy i spaleniu wytworzonego gazu. Nowe technologie przetwarzania i spalania paliw odnawialnych, szczególnie technologia zgazowywania jest bezpieczna dla środowiska ze względu na niski stopień zanieczyszczenia spalin szkodliwymi związkami siarki i azotu. Wysoka sprawność konwersji energii zapewnia opłacalność inwestycji związanych z wytwarzaniem paliw z biomasy i spalania gazu generatorowego w celu wytworzenia energii cieplnej lub elektrycznej. Spalając paliwa odnawialne powstaje znikoma ilość popiołu, który może być wykorzystywany jako nawóz. Zastosowanie takiego rodzaju paliwa ma na celu zwiększenia możliwości uzyskania dodatkowych odnawialnych źródeł energii. Przedstawiono wyniki badań.

Słowa kluczowe: biomasa, wysuszony osad ściekowy, współspalanie, zgazowanie, procesy termiczne, ciepło

1. Wprowadzenie

Podpisanie przez Polskę w 2002 roku Protokołu z Kyoto wprowadza obowiązek zredukowania emisji gazów cieplarnianych i pyłów. Zagadnienia te wspiera Unia Europejska poprzez wprowadzenie Dyrektywy 2001/77/WE

[1] Autor do korespondencji: Marek Szymczak, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, 85-793 Bydgoszcz, ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 52 340 8258, marszym@utp.edu.pl
[2] Andrzej Tomporowski, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, 85-793 Bydgoszcz, ul. Prof. S. Kaliskiego 7, 52 340 8255, andrzej.tomporowski@utp.edu.pl

w sprawie produkcji energii elektrycznej wytworzonej z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. Rozporządzenie Ministra Gospodarki, Pracy i Polityki Socjalnej z dnia 30 maja 2003 roku *w sprawie szczegółowego obowiązku zakupu energii elektrycznej i ciepła z odnawialnych źródeł energii oraz energii elektrycznej wytworzonej w skojarzeniu z wytwarzaniem ciepła*, co w efekcie daje możliwość współspalania paliw.

Na świecie zasoby biomasy kalkulowane są na poziomie 280 EJ/rok i są o około 6 razy wyższe od ich stopnia wykorzystania. Natomiast zwiększenie produkcji biomasy wiąże się z koniecznością przeznaczenia znacznych powierzchni ziemi pod uprawę roślin energetycznych. Światowe zasoby biomasy obecnie stanowią od 9 do 13% zapotrzebowania na energię. [9]

Wdrożenie technologii spalania niekonwencjonalnego paliwa odnawialnego, jakim jest biomasa, przyczyni się do ograniczenia zanieczyszczenia środowiska odpadami i szkodliwymi produktami spalania, zawierającymi szkodliwe związki azotu i siarki. Prowadzone badania zwiększają zasób wiedzy o przebiegu procesów termodynamicznych podczas spalania biomasy, prowadząc jednocześnie do udoskonalania urządzeń do spalania.

W celu uzyskania wysokiej sprawności spalania, konieczna jest aglomeracja ciśnieniowa biomasy zwana potocznie brykietowaniem. Zabieg ten wprawdzie energochłonny, jednocześnie zwiększa efektywność energetyczną takiej postaci paliwa w wyniku zwiększenia gęstości, niższej wilgotności, przechowywania i możliwości spalania w konwencjonalnych paleniskach.

Biomasa w postaci brykietu jest jednorodna, ma ustabilizowane parametry cieplne, gęstość i wilgotność. Spalanie brykietów przebiega bez zakłóceń w ustalonych warunkach przy wysokiej sprawności cieplnej procesów termicznych i konwersji energii chemicznej paliwa na ciepło.

2. Osad ściekowy

Suszenie osadów ściekowych stanowi podstawowy warunek, umożliwiający ich ewentualne zagospodarowanie jako paliwa. Spalanie osadów odwodnionych po prasowaniu, o wilgotności 75 ÷84% jest praktycznie procesem niemożliwym technologicznie i nieefektywnym ekonomicznie.

Suszenie osadu jest niezwykle energochłonnym zabiegiem technologicznym. Ciepło do suszenia można pozyskać spalając biogaz z fermentacji ścieków. Traktując część osadu ściekowego jako biomasę i poddaniu jej termicznemu przekształceniu pozwoli uzyskać dodatkową energię. Z osadu ściekowego, który jest poddany w suszarniach procesowi odparowania wody, uzyskujemy nawóz organiczny w postaci granulowanej o zawartości 90% s.m. Wysuszony osad ściekowy można ponownie wykorzystać do współspalania jako mieszanki paliwa z odpadami drewna, słomy czy węgla kamiennego w różnych proporcjach masowych. Wartość opałowa wysuszonego osadu ściekowego użytego w badaniach wynosiła około 14 MJ/kg, przy zawartości 32% popiołu.

Współspalanie wysuszonego osadu ściekowego i biomasy może stanowić postać paliwa alternatywnego. Taka postać paliwa może być poddana procesowi zgazowania, co zwiększy efektywność spalania.[1, 5-8].

3. Kora

Nazwą kora określa się wszystkie tkanki pierwotne i wtórne znajdujące się na przekroju poprzecznym rośliny na zewnątrz od miazgi. Problem wykorzystania kory odpadowej powstał najpierw w Ameryce, następnie w Europie z chwilą wprowadzenia mechanizacji procesu korowania. Udział kory w stosunku do ogólnej masy pnia jest zróżnicowany w zależności od gatunku drzewa wynosi dla sosny od 10 do 17 %. Kora przewyższa drewno zawartością popiołu i jego zawartość w lustrzance młodych drzew wynosi około 3,5%, a w martwicy 1,7%. Kora nie jest wartościowym, pod względem energetycznym, odpadem przemysłu drzewnego, stanowiącym od 10 do 15% masy pozyskiwanego drewna. Jej wartość opałowa wynosi 18,5÷20 MJ/kg, wilgotność 55÷65%, a zawartość popiołu, który ma tendencję do żużlowania stanowi 1÷3% suchej masy [6].

Przez pirolizę kory (destylację rozkładową) należy rozumieć rozkład termiczny kory przy ograniczonym dostępie powietrza. Rozdrobniona kora, o małej wilgotności, łatwo stosunkowo ulega rozkładowi termicznemu w temperaturze od 270 do 400°C, przy użyciu techniki fluidyzacyjnej z azotem.

Jako produkt pirolizy kory otrzymuje się gaz zawierający tlenek i dwutlenek węgla, metan, wodór, substancje ciekłe, składające się w 20% z metanolu i kwasu octowego i acetonu a także smoły i produktów rozkładu termicznego żywicy w przypadku kory sosnowej. Zamiast pirolizy możemy przeprowadzić zgazowanie kory, czyli termiczny rozkład przy dopływie powietrza z parą wodną. W wyniku takiego spalania tworzy się gaz oraz powstają substancje mineralne w postaci popiołu. Składnikami gazu są: wodór, tlenek węgla, metan, oraz składniki niepalne dwutlenek węgla i azot. Wartość opałowa uzyskanego gazu wzrasta wraz z udziałem gazów palnych. W przypadku zgazowania kory z domieszką odpadów drzewnych, z 1kg bezwzględnie suchej substancji można uzyskać około 4m^3 gazu, który może być używany do spalania również w stanie nieoczyszczonym.

4. Słoma

Produkcja rolnicza w Polsce przynosi zbiory słomy zbóż w ilości 25 mln ton rocznie, jednak spora jej część wykorzystywana jest jako ściółka, pasza lub komponent nawozu naturalnego. Gdyby z wymienionych wcześniej 25 mln ton słomy wykorzystać na cele energetyczne około 50% (12,5 mln ton), możliwe byłoby zaoszczędzenie około 5 mln ton węgla rocznie, przy założeniu wartości opałowej słomy na poziomie 16 MJ/kg. Należy także uwzględnić korzyści związane z mniejszą uciążliwością dla środowiska. Słoma charakteryzuje się również obojętnym bilansem emisji dwutlenku węgla, znacznie mniejsza jest emisja dwutlenku siarki niż w przypadku paliw kopalnych, a emisja tlenków azotu jest na porównywalnym poziomie.

Wartość opałowa słomy uzależniona jest między innymi od takich czynników jak zawartość wilgoci, rodzaj zboża, rodzaj gleby i sposób nawożenia. Przy wykorzystania słomy jako paliwa odnawialnego maksymalna zawartość wilgoci powinna wahać się w granicach 15% ÷ 22%. Energia chemiczna 1 kg słomy o wilgotności 15% wynosi 14,3 MJ, co odpowiada energii chemicznej zawartej w 0,81 kg drewna opałowego lub 0,41 m^3 gazu ziemnego wysokometanowego [1,5-8].

5. Badania nad wykorzystaniem biomasy i osadu ściekowego

Termiczną utylizację mieszaniny wysuszonego osadu ściekowego o zawartości 90% s.m. z biomasą w postaci kory i słomy przeprowadzono w kotle niskotemperaturowym z nagrzewnicą powietrza VIGAS-25N. Wnętrze kotła stanowi komora załadowcza, w której umieszcza się badany rodzaj biomasy. W komorze tej biomasa ulega spaleniu i zgazowaniu. Następnie powstały gaz przechodzi przez dysze wykonana z betonu ogniotrwałego do komory spalania, gdzie ulega spaleniu przy wykorzystaniu dodatkowego nadmuch powietrza, które przepływa przez wymiennik ciepła dwurzędowy płomieniówkowy o wymiarach 57 x 5 mm po 6 sztuk w każdym rzędzie. Wydmuchiwane powietrze może być odprowadzane do ogrzewanych pomieszczeń. Badania współspalania słomy, kory z wysuszonym osadem ściekowym o 90 % s.m. przeprowadzono dla różnych udziałów masowych paliwa. Przyjęto następujące procentowe proporcje wysuszonego osadu ściekowego: 20% i 40%. Do badań użyto zaproponowaną mieszaninę biomasy o łącznej masie 5 kg z uwzględnieniem procentowych udziałów dla poszczególnych biomas. Zakres badań obejmował następujące zagadnienia:

- analizę możliwości wykorzystania wysuszonego osadu ściekowego i biomasy w postaci kory i słomy w technice zgazowania,
- badania techniczne biomasy i wysuszonego osadu ściekowego dla wyznaczenia własności tych paliw,
- badania w skali półtechnicznej zgazowania paliwa i spalenia wytworzonego gazu w nagrzewnicy powietrza VIGAS,
- analizę spalin i ciepło uzyskane w procesie.

Cykl pomiarowy prowadzony podczas procesu współspalania i zgazowania biomasy został podzielony na trzy etapy. Pierwszy etap obejmował proces rozpalania biomasy, drugi to właściwe współspalanie i zgazowanie, trzeci to proces końcowego dopalania biomasy.

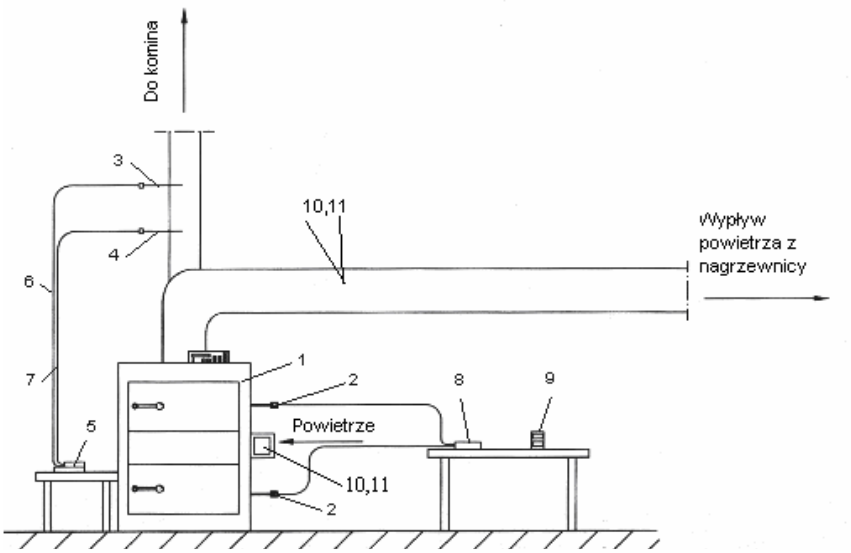
Dla proponowanych proporcji paliwa z biomasy wyznaczono: ciepło spalania, wartość opałową, zawartość popiołu, wilgotność, zawartość części lotnych. Analizę spalin wykonano analizatorem spalin TESTO 350M umieszczając sondy w przewodzie odprowadzającym spaliny.

Jednocześnie mierzono temperaturę w komorze załadowczej jak i dopalania gazu, oraz parametry powietrza na doprowadzeniu do kotła. Dla określenia ilości powietrza na zasilaniu do kotła jak i na wylocie z nagrzewnicy powietrza zainstalowano kanały pomiarowe.

Pomiary strumieni objętości powietrza przepływającego przez przekroje kontrolne kanału wentylacyjnego wykonano zgodnie z obowiązującymi Polskimi Normami. Dokonano pomiary prędkości miejscowych w kanałach przepływowych w określonych punktach, wyznaczano wartość średnią prędkości strumieni. Obliczano strumienie objętości powietrza przepływające przez kanały.

Schemat stanowiska pomiarowego przedstawiono na rys. 1.

Wyniki pomiarów przedstawiono w tabelach 1 do 3 oraz przedstawiono graficznie na wykresie 1 [7,8].



Rys.1. Schemat stanowiska badawczego do zgazowywania biomasy i spalania wytworzonego gazu syntezowego: 1 - kocioł VIGAS V-25, 2 - termopary, 3 - sonda różnicy ciśnień, 4 - sonda spalin, 5 - analizator spalin TESTO 350 M, 6, 7 - przewody połączeniowe sond, 8 - termometr z datalogerem DO 9416, 9 - psychrometr elektroniczny THERM 2286-2, 10 - termoanemometr TESTO 491, 11 - termometr TESTO 720

Fig.1. The scheme of the test bench for biomass gasification and combustion of produced synthesis gas 1-boiler VIGAS V-25, 2-thermocouples, 3-differential pressure probe 4- exhaust gas probe, 5- gas analyzer TESTO 350 M, 6, 7-the connecting cables of probes, 8-thermometer datalogerem DO 9416, 9-electronic psychrometer THERM 2286-2, 10-Thermo-anemometer TESTO 491, 11-thermometer TESTO 720

Tabela 1. Ciepła ze zgazowania słomy rzepakowej, kory i wysuszonego osadu ściekwego o zawartości 90% s.m.

Table 1. Analysis of heat obtained from gasification of rapeseed straw, bark and dried sewer sediment containing 90% of s.m.

Rodzaj biomasy	**Ciepło** kJ	**Strumień ciepła** kJ/h
Słoma rzepakowa 100%	6943	1,51
Kora 100%	6287	1,66
Wysuszony osad ściekowy o zawartości 90% s.m.	5257	0,48
Słoma rzepakowa 80% udziału i wysuszony osad ściekowy 20% udziału	2275	0,26
Słoma rzepakowa 60% udziału i wysuszony osad ściekowy 40% udziału	1910	0,20
Kora 80% udziału i wysuszony osad ściekowy 20% udziału	2520	0,39
Kora 60% udziału i wysuszony osad ściekowy 40% udziału	1819	0,28

Tabela 2. Wyniki analizy spalin podczas spalania biomasy i wysuszonego osadu ściekowego - TESTO 350 M

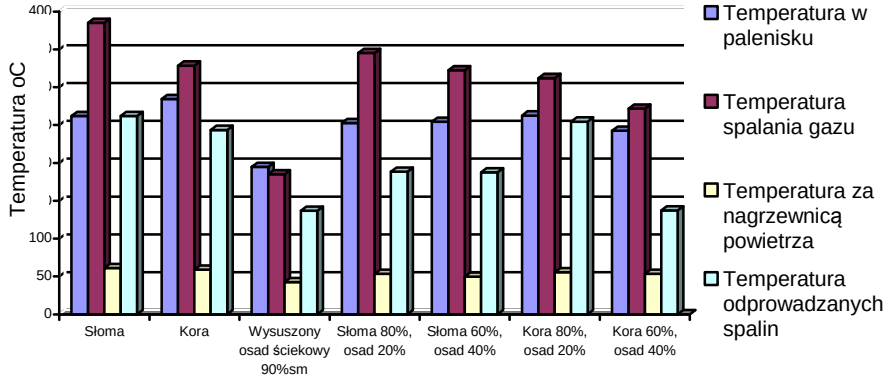
Table 2. Analysis of exhaust fumes obtained from combustion of biomass and dried sewer sediment- TESTO 350M

Parametr	**Jednostka**	**Paliwo**						
		słoma rzepakowa	kora	osad ściekowy	słoma 80% i osad 20%	słoma 60% i osad 40%	kora 80% i osad 20%	kora 60% i osad 40%
O_2	%	10,7	16,8	15,9	16,8	15,1	13,0	17,4
CO	ppm	3654	1560	2776	3725	3509	3198	4037
NO	ppm	30	24	169	115	232	242	100
NO_2	ppm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
NOx	ppm	27	27	169	113	230	241	98
SO_2	ppm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Strata kominowa	%	15,3	14,3	19,1	25,9	25,5	20,1	20,5
λ		6,7	6,32	4,11	4,95	3,55	2,63	5,85
CO_2	%	1,4	3,1	3,3	2,8	3,9	5,2	2,3
H_2S	ppm	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
H_2	ppm	2850	3657	1369	3633	3638	2771	2908
E	%	77,6	80,9	80,9	74,1	74,5	79,9	79,5
Temp. pow. do spalania	^oC	16,9	17,8	19,5	17,9	18,9	23,3	25,7
Temp. spalin	^oC	231,1	243,6	169,6	189,0	241,6	254,60	137,30

Tabela 3. Analiza techniczna paliwa ze słomy rzepakowej, kory i wysuszonego osadu ściekowego o zawartości 90% s.m.

Table 3. Technical analysis of fuel obtained from rapeseed straw, bark and dried sewer sediment containing 90% of s.m.

Rodzaj biomasy	**Wilgotność** %	**Zawartość popiołu** %	**Zawartość części lotnych** %	**Ciepło spalania** kJ/kg	**Wartość opałowa** kJ/kg
Słoma rzepakowa	15,05	1,97	69,71	15880	14495
Kora	7,95	5,40	67,79	19122	17877
Wysuszony osad ściekowy 90%s.m.	10,90	32,80	53,29	13350	12401
Słoma rzepakowa 80% udziału i wysuszony osad ściekowy 20% udziału	7,12	10,64	73,63	14422	13251
Słoma rzepakowa 60% udziału i wysuszony osad ściekowy 40% udziału	6,50	16,54	68,85	13656	12564
Kora 80% udziału i wysuszony osad ściekowy 20% udziału	7,60	8,40	64,85	17756	16552
Kora 60% udziału i wysuszony osad ściekowy 40% udziału	7,20	14,90	61,36	16574	15453



Wykres 1. Zależność temperatury od zawartości procentowej słomy rzepakowej, kory i wysuszonego osadu ściekowego o zawartości 90% s.m.

Fig. 1. Temperature dependency of percentage of rapeseed straw, bark and dried sewer sediment containing 90% of s.m.

6. Podsumowanie

Nadwyżki biomasy i osadu ściekowego będą zmuszały do poszukiwań nowych rozwiązań w celu ich właściwego zagospodarowania i wykorzystania. Przyjęta przez Unie Europejską dyrektywa mówiąca o udziale energii odnawialnej w ogólnej produkcji energii, dla Polski będzie wymuszała działania związane z efektywniejszym wykorzystaniem potencjału energetycznego słomy jak i wysuszonego osadu ściekowego.

Przedstawione badania wykazują możliwość wykorzystania słomy oraz kory i wysuszonego osadu ściekowego do współspalania w proporcji 20% do 40 %. Przy większych proporcjach współspalanie jest nie korzystne z uwagi na niską wartość opałową. Współspalanie takiego rodzaju paliw jest korzystne przy zachowaniu, że wilgotność słomy i kory jest poniżej 15%, a wysuszonego osadu ściekowego wynosi 10%.

Zaproponowany sposób termicznej utylizacji mieszaniny wysuszonego osadu ściekowego o zawartości 90% s.m. z biomasą w postaci słomy lub kory, który został przeprowadzony w kotle niskotemperaturowym wykazuje możliwości wykorzystania jako paliwa odnawialnego.

Należy jednak pamiętać, że proces suszenia osadu do otrzymania takich parametrów jest procesem energochłonnym. Słoma czy kora po aglomeracji ciśnieniowej jest pełnowartościowym i ekologicznym paliwem możliwym do stosowania w ciepłownictwie i ogrzewnictwie z wykorzystaniem wysuszonego osadu ściekowego o zawartości 90% s.m.

Zaproponowane rozwiązanie współspalania i zgazowywania jest bezpieczne dla środowiska ze względu na niski stopień zanieczyszczenia spalin szkodliwymi związkami siarki i azotu. Przetwarzanie biomasy z wysuszonym osadem ściekowym i jej stosowanie jako paliwa odnawialnego w postaci pelletów lub brykietów jest racjonalne gdyż paliwa takie są jednorodne, mają zbliżone wymiary, stabilne własności energetyczne.

Literatura

[1] Chalamoński M., Łukasiewicz J. Szymczak M.: Suszenie osadów ściekowych, Instytut Techniki Budowlanej, Ośrodek Informacji, Miesięcznik INSTAL Nr. 1, s. 48-52, 2008 r.
[2] Hejft R.: Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych, Wydawnictwo Instytutu Technologgii i Eksploatacji, Radom 2003r.
[3] Kukliński M., Łukasiewicz J., Szymczak M.: Optymalizacja bilansu cieplnego suszarni osadów ściekowych. Termodynamika w nauce i gospodarce ton I s. 667 – 672. XX Jubileuszowy Zjazd Termodynamików, Wrocław 02.09.- 06.09.2008r. ISBN 978-83-7493-406-0.
[4] Łukaszewicz J.: Spalanie biopaliw, IV Konferencja Naukowo-Techniczna, Krynica Zdrój 21-23 maj 2003r.
[5] Szymczak M.: Badania wskaźników energetycznych słomy rzepakowej. Dwumiesięcznik Inżynieria i aparatura chemiczna, nr 1, s. 119-121, XII Konferencja Żywienie człowieka - inżynieria maszyn, Bydgoszcz 23 luty 2007 r.
[6] Szymczak M., Chalamoński M.: Spalanie wysuszonego osadu ściekowego wymieszanego z korą sosnową, Miesięcznik Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja nr 2/2011, str. 58-61.Warszawa 2011r.
[7] Szymczak M.: Paliwa odnawialne w energetyce i ciepłownictwie, Międzynarodowa Konferencja Procesów Energii ECO – €URO – ENERGIA, 2 – 3 czerwca 2004 r. Bydgoszcz, s. 237 – 245.
[8] Szymczak M., Łukasiewicz J.: Paliwa odnawialne źródłem energii, Miesięcznik INSTAL nr 7 – 8, s. 60 – 63, 2004 r.
[9] Rocznik statystyczny GUS 2011 r.

DRIED SEWAGE SEDIMENT AND BIOMASS AS A RENEWABLE FUEL

S u m m a r y

This article presented the process and of thermal utilization of dried sewage sediment in the process of gasification it with biomass originated from straw, wood processing wastes and energetic plants in the of loose or pressed from which consists the mixture of renewable fuel with varying mass concentration so as to increase efficiency to use sewage sediment containing 90% of dry mass in thermal and energy management. It is possible to apply gassing and pyrolisis in thermal processes of renewable fuels' chemical energy conversion, including straw and bark. The produced gas will be combusted in the ventricle of the boiler and the obtained heat, resulting from some thermal processes, will be used for heating purposes. The usage of renewable fuels in power and heat engineering may contribute to the application of waste's recycling. The substitution of coal in heating will minimise the emission of dust as well as harmful compounds to the atmosphere, owing to the use of non-waste and low-emissive combustion of biomass with the application of pyrolisis and the combustion of the produced gas. New technologies of conversion and combustion of renewable fuel, especially the technology of gassing, are safe for the environment due to a low degree of fumes' pollution (dangerous compounds of sulphur and nitrogen). A high degree of energy conversion guarantees benefits of the investment being connected with producing fuel out of biomass and gas combustion generated for the purpose of producing either heat or electric energy. During the process of renewable fuel combustion, a minor degree of ash is produced which can be used for manuring purposes later on. The conversion of biomass into pellets or briquettes not only makes the transport and the distribution of such fuels much easier, but also stabilizes their quality. Conversed fuels are homogenous, have similar measurements and stable features as: mass density, combustible value which facilitates the usage of boilers and automatic regulation of thermal processes. Use of such kind of fuel has on aim the enlargements the possibility of obtainment of additional renewable sources of energy. The results of investigations were introduced.

Keywords: biomass, dried sewage sediment, coburning/coincineration, gasifying, thermal process, heat

Przesłano do redakcji: 13.01.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.78

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 495-504

Jarosław TATARCZAK[1]
Karolina SIEDLISKA[2]
Robert KOSACKI[3]
Jan M. OLCHOWIK[4]

ANALIZA WPŁYWU ZACIENIENIA KRYSTALICZNYCH MODUŁÓW PV NA EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNĄ FARM SŁONECZNYCH

Inwestycje związane z energetyką słoneczną posiadają stosunkowo długi czas zwrotu w odniesieniu do innych źródeł energii elektrycznej. Powodem tego są słabe uregulowania prawne wspierające rozwój tego rodzaju energetyki w Polsce. Jednak istnieją efektywniejsze sposoby pozyskiwania energii elektrycznej ze słońca, dzięki którym można znacznie skracać czas zwrotu tego typu inwestycji. Sposoby te można realizować już na etapie projektowania poprzez dobór modułów o wysokiej sprawności, odpowiedniego kąta ich nachylenia, czy też ograniczenie samo zacienienie modułów. W artykule został przeanalizowany wpływ cienia na moduły PV. Efekt cienia jest niekorzystnym zjawiskiem występującym podczas eksploatacji różnych systemów fotowoltaicznych, zarówno układów nadążnych, małych instalacji przydomowych, jak i dużych farm słonecznych. Zjawisko to powoduje zróżnicowanie poziomów napromieniowania słonecznego na powierzchni modułów, którego skutkiem jest obniżenie generacji energii elektrycznej. W najgorszym przypadku efekt cienia może wywołać trwałe uszkodzenie struktury ogniw, np. przez powstanie tzw. „gorących punktów". Stosując odpowiednie algorytmy obliczeniowe, można przewidzieć skutki nieuniknionego zacienienia, a tym samym umożliwić podjęcie pewnych kroków zapobiegających występowaniu tego zjawiska już na etapie projektowania. Do tego celu służy analiza względnego ruchu słońca nad horyzontem przy uwzględnieniu typowych parametrów modułów fotowoltaicznych takich jak moc, długość czy szerokość oraz z ich kombinację ustawień na farmie fotowoltaicznej. Wyniki symulacji przedstawione w artykule pozwalają stwierdzić, w jaki sposób padający cień może wpływać na produkcję energii elektrycznej farmy słonecznej.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, efekt cienia, efektywność energetyczna, promieniowanie słoneczne

[1] Jarosław Tatarczak, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Katedra Maszyn Ogrodniczych i Leśnych, ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin, +48 81 531 96 53, jaroslaw.tatarczak@gmail.com.
[2] Karolina Siedliska, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Katedra Fizyki, ul. Akademicka 13, 20-950 Lublin, +48 81 445 69 37, karolina.siedliska@gmail.com.
[3] Robert Kosacki, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin
[4] Autor do korespondencji/corresponding author: Jan M. Olchowik, Politechnika Lubelska, Instytut Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, +48 81 538 4700, j.olchowik@pollub.pl.

1. Wstęp

Ogniwa słoneczne charakteryzują się stosunkowo niską gęstością generowanej mocy, zależną głównie od warunków nasłonecznienia i temperatury pracy modułów, a także prędkości wiatru i wilgotności powietrza. Promieniowane, które dociera do powierzchni modułów to nie tylko promieniowanie bezpośrednie, ale też i rozproszone, odbite między innymi od powierzchni ziemi i chmur. W szacowaniu energii promieniowania słonecznego docierającej do powierzchni modułów brany jest także pod uwagę kąt padania promieniowania słonecznego bezpośredniego oraz zacienienie ich powierzchni, co bezpośrednio przekłada się na ilość produkowanej przez nie energii elektrycznej.

Zacienienie modułów fotowoltaicznych jest zagadnieniem, które należy dokładnie rozważyć podczas projektowania elektrowni słonecznych. Zacienienie niewielkich powierzchni krystalicznych modułów fotowoltaicznych powoduje wyłączanie części lub całych ogniw, powstawanie tzw. gorących punktów (w miejscu zacienienia występuje gwałtowny wzrost temperatury związany przepływem prądu w przeciwnym kierunku, co może prowadzić nawet do zniszczenia modułów), a co za tym idzie spadek napięcia i znaczne obniżenie ilości produkowanej energii elektrycznej (zależność ta nie jest liniowa). Co więcej, w warunkach nierównomiernego nasłonecznienia krzywe mocy I-V mogą posiadać więcej niż jedno maksimum lokalne, stwarzając tym samym trudności w doborze odpowiedniego osprzętu dla elektrowni słonecznej.

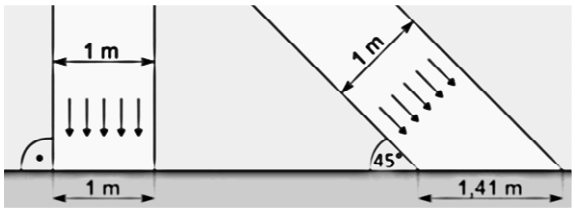
Nie zawsze jednak udaje się całkowicie uniknąć zacienienia. Niemniej jednak istnieją metody, które pomagają zminimalizować starty z tym związane i ograniczyć ich wpływ na efektywność energetyczną farm słonecznych. Problemy te najlepiej rozwiązywać na etapie planowania rozmieszczenia modułów na danej powierzchni, poprzez analizę rocznych zmian kąta padania promieniowania słonecznego oraz konfiguracji cieni rzucanych przez sąsiednie moduły lub otaczające je elementy budynków, anteny, drzewa czy zalegający śnieg. Roczne straty spowodowane zacienieniem określa się nawet na poziomie 20% w przypadku systemów zintegrowanych z budynkami [1] lub w przypadku systemów wolnostojących od 30% w miesiącu styczniu do 5% w miesiącu lipcu [4], a spadek mocy nie jest wprost proporcjonalny do powierzchni zacienionej.

2. Metodyka opracowanej analizy

2.1. Kąt odchylenia padania promieni słonecznych od powierzchni modułu PV

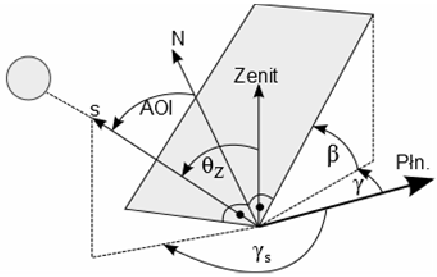
Głównym czynnikiem wpływającym na uzysk energii elektrycznej z modułów fotowoltaicznych jest ilość energii słonecznej docierającej do powierzchni modułu. Ilość ta jest ściśle związana z orientacją modułu względem kierunku padania promieni słonecznych. Wartość tę można bardzo łatwo określić zakła-

dając, że strumień światła o szerokości i długości 1 metra padający prostopadle dostarcza do powierzchni ziemi określoną ilość energii stanowiącą 100% energii strumienia światła. Jeżeli natomiast promienie słoneczne padają na powierzchnię ziemi pod kątem równym 45 stopni, wówczas ten sam strumień światła, wymaga już 1,41 m^2 powierzchni. Oznacza to, że na określony obszar pada strumień światła o mniejszym natężeniu, co skutkuje dostarczeniem mniejszej ilości energii na jednostkę powierzchni absorbującej promieniowanie słoneczne [3], tak jak przedstawia to Rys. 1.



Rys. 1. Zależność szerokości padającego strumienia promieniowania słonecznego na powierzchnię ziemi przy wysokości pozornej słońca 0° i 45°, względem ziemi

Fig. 1. The dependence of light beam radiation width on the ground surface at angles of incidence of 0° and 45°



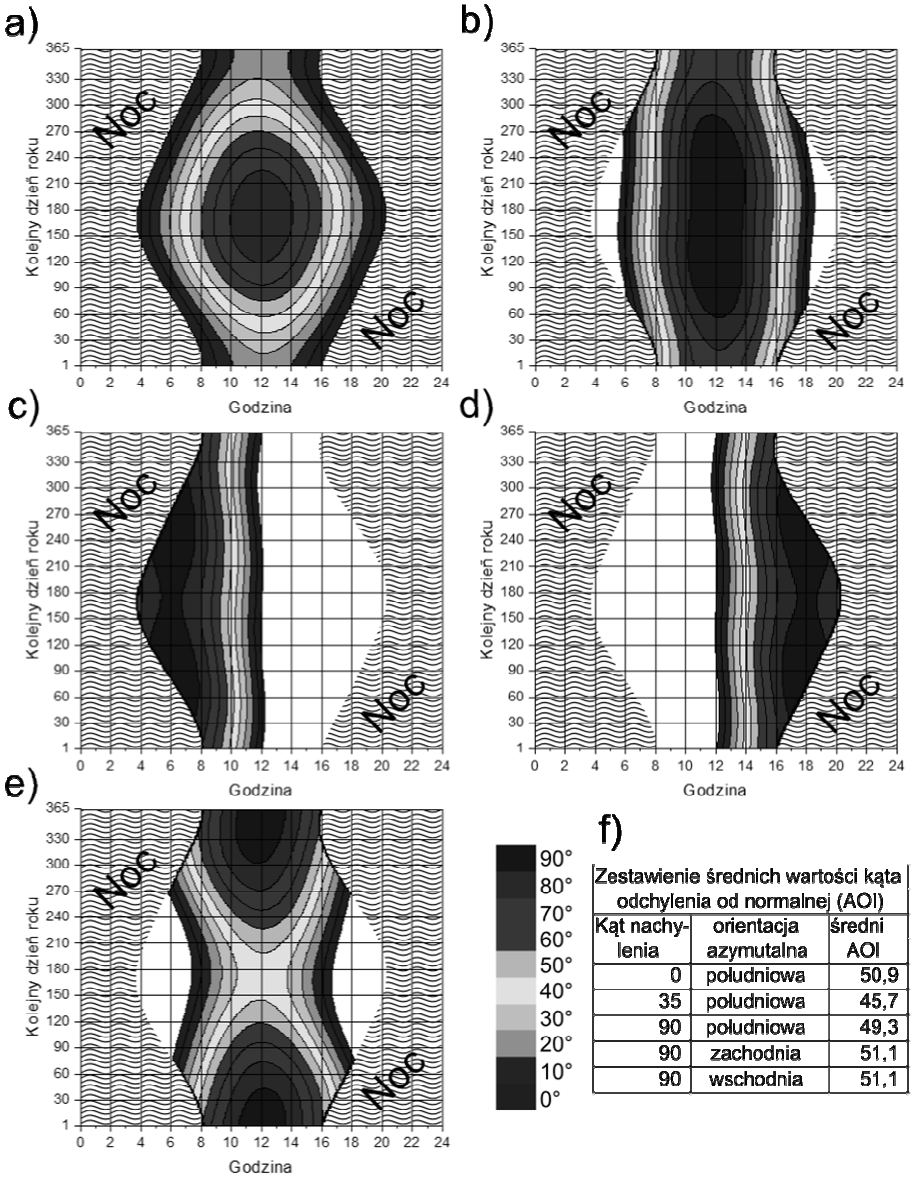
Rys. 2. Graficzna interpretacja wyznaczania kąta padania promieni do normalnej AOI

Fig. 2. A graphical interpretation shows how to determine the coefficient of the angel of incidence of normal AOI

Kąta padania promieni słonecznych na moduły fotowoltaiczne ma znaczny wpływ na generację energii elektrycznej. Wartość tą charakteryzuje kąt odchylenia promieni słonecznych od normalnej AOI (z ang. Angle Of Incidence), którego ilustruje Rys. 2. i można ją obliczyć ze wzoru [2]:

$$\cos(AOI) = \cos(\beta) \cdot \cos(\theta_Z) + \sin(\beta) \cdot \sin(\theta_Z) \cdot \cos(\gamma - \gamma_S) \tag{1}$$

gdzie: β – kąt nachylenia modułu, θ_Z – kąt zenitalny Słońca, γ – kąt azymutalny modułu (założono do obliczeń: 0° = północ, 90° = wschód), γ_s– kąt azymutalny Słońca.



Zestawienie średnich wartości kąta odchylenia od normalnej (AOI)		
Kąt nachylenia	orientacja azymutalna	średni AOI
0	południowa	50,9
35	południowa	45,7
90	południowa	49,3
90	zachodnia	51,1
90	wschodnia	51,1

Rys. 3. Wykresy konturowe przestawiające procentowo wartość kąta odchylenia padającego promienia światła do normalnej powierzchni modułu dla warunków: a) 0° nachylenia modułu, orientacja azymutalna południowa b) 35°, orientacja południowa c) 90°, orientacja wschodnia, d) 90°, orientacja zachodnia, f) 90°, orientacja południowa, f) tabela zestawiająca średnie wartości AOI

Fig. 3. Contour charts present the percentage value of the tilt angle of the incident light beam to the surface normal for the module: a) 0° tilt module, azimuthal southern orientation b) 35°, southern orientation c) 90°, eastern orientation, d) 90°, western orientation, f) 90°, southern orientation, f) table comparing the averages values of AOI

Wartość kąta AOI przekłada się w znacznym stopniu na wartość energii słonecznej padającej bezpośrednio na ogniwo. Należy jednak mieć na uwadze fakt, że nie zawsze do powierzchni modułu dociera promieniowanie słoneczne bezpośrednie. Kąt AOI jest wskazówką pozwalającą w przybliżony sposób określić najkorzystniejszą opcję ustawienia modułów. Na podstawie algorytmu umożliwiającego obliczenie pozycji Słońca oraz wzoru (1) sporządzono wykresy konturowe obrazujące wartości kątów AOI w zależności od godziny i kolejnych dni w ciągu roku dla miasta Lublina. Przedstawione są one na Rys. 3.

Na podstawie otrzymanych wyników stwierdzono, że najkorzystniejszym kątem nachylenia modułu PV względem powierzchni ziemi jest kąt 35°. Dzieje się tak, ponieważ promieniowanie słoneczne w tym przypadku pada przez najdłuższy okres w ciągu roku pod kątem bliskim 0°. , a tym samym dostarczane jest najwięcej energii promieniowania bezpośredniego i największy hipotetyczny uzysk energii. W przypadku kąta AOI o wartościach bliskich kątowi 90° należy się zastanowić, czy wartość ta nie wynika z zacienienia wynikającego z samego ustawienia modułu.

2.2. Udział energii rozproszonej w generacji energii elektrycznej

W celu dokładniejszej analizy uzysku energii z modułów fotowoltaicznych, należy także uwzględnić promieniowanie rozproszone. Absorpcja promieniowania rozproszonego jest zależna od typu modułów PV i dostępnego obszaru nieba, w obrębie którego promienie mogą zostać odbite od chmur i dotrzeć do powierzchni modułu. Przy ustawieniu modułów w pozycji horyzontalnej promieniowanie słoneczne odbite od chmur, padające na ogniwa dociera do nich z całego obszaru nieba. Natomiast przy ustawieniu modułu pod kątem prostym do powierzchni ziemi (np. zamocowany do ściany budynku) obszar nieba, z którego zbierane jest promieniowanie zmniejsza się o około 50%. Oznacza to, że przy prostopadłym ustawieniu na moduł będzie padać mniejsza ilość energii rozproszonej niż na powierzchnię poziomą.

Program PV GIS[5] pozwala przeprowadzić symulację ilości uzyskanej energii elektrycznej z modułów PV, a także ilość energii docierającej do powierzchni modułów (nasłonecznienie). W programie tym zasymulowano ilość energii słonecznej rozproszonej docierającej do modułu ustawionego w pozycji poziomej, jak i pod kątem 90 stopni do powierzchni ziemi. W przypadku ustawienia modułu w pozycji pionowej roczna suma energii rozproszonej padająca na daną powierzchnię wyniosła 358,81 $kWh \cdot m^{-2}$, co stanowiło 62% rocznej sumy energii dla pozycji poziomej, czyli 574,65 $kWh \cdot m^{-2}$ (obliczenia dla lokalizacji Lublin). Wyniki symulacji przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wartości napromieniowania dla miasta Lublina na podstawie danych portalu PVGIS [5]
Table 1. Solar irradiation data for the Lublin city from the PVGIS website are as follows [5]

	Nachylenie modułu względem powierzchni ziemi			
	Pozioma (0°)		Pionowa(90°)	
	Napromieniowanie słoneczne			
Miesiąc	Całkowite	Rozproszone	Całkowite	Rozproszone
	kWh·m^{-2}	kWh·m^{-2}	kWh·m^{-2}	kWh·m^{-2}
styczeń	20,62	14,96	33,62	11,43
luty	34,69	23,86	44,82	17,05
marzec	85,48	48,27	92,33	35,46
kwiecień	130,01	62,21	102,17	40,18
maj	166,47	76,90	96,38	42,63
czerwiec	169,95	83,46	86,83	43,34
lipiec	162,42	87,82	88,30	46,10
sierpień	143,62	67,84	99,52	41,01
wrzesień	94,82	49,45	91,43	34,61
październik	56,08	31,28	75,81	24,95
listopad	24,20	16,54	38,78	12,86
grudzień	15,92	12,08	26,80	9,18
rocznie	1104,27	574,65	876,78	358,81

2.3. Efekt cienia

Wpływ zacienienia ma duże znaczenie na pracę instalacji fotowoltaicznych. Nieprawidłowe dobranie odstępów pomiędzy rzędami, czy ustawienie modułów tuż za przeszkodą może spowodować wyłączenie z pracy pewnej sekcji modułów lub całej instalacji PV. Taka sytuacja może się zdarzyć w sezonie zimowym, kiedy to pozorna wysokość Słońca nad horyzontem jest dużo mniejsza niż latem. Dla porównania dla Lublina długość cienia rzucanego przez słup o wysokości 2 m w porze południa w najkrótszym dniu roku będzie wynosić ok 7 m, natomiast w najdłuższym nieco powyżej jednego metra.

Przy założeniu, że optymalny kąt nachylenia modułu wynosi 35°, a wysokość słońca w porze najkrótszego dnia roku w czasie południa około 15° można określić szacunkowe równanie na wartość odstępu pomiędzy kolejnymi rzędami baterii słonecznych:

$$p = \frac{h}{\tan\beta} = \frac{\sin\alpha \cdot d}{\tan\beta} = \frac{\sin 35 \cdot d}{\tan 15} \approx 2{,}14 \cdot d \tag{2}$$

gdzie: α – kąt nachylenia modułu względem ziemi, d – długość modułu PV, β – kąt określający wysokość słońca nad linią horyzontu.

Najczęstsze ustawienie modułów PV na farmach słonecznych to mocowanie dwupoziomowe pionowe, takie jak pokazano na Rys. 4. Przyjmując, że przeciętna wielkość modułów PV to 1650×990 mm (moc 230 W) oraz podstawiając te dane do wzoru (2) można obliczyć, że optymalna odległość, gwarantująca zimą brak zacienienia modułów w południe i jednocześnie minimalizująca rozmiary farmy słonecznej, wynosi około 7 m.



Rys. 4.Ustawienie modułów na farmie fotowoltaicznej w Wierzchosławicach

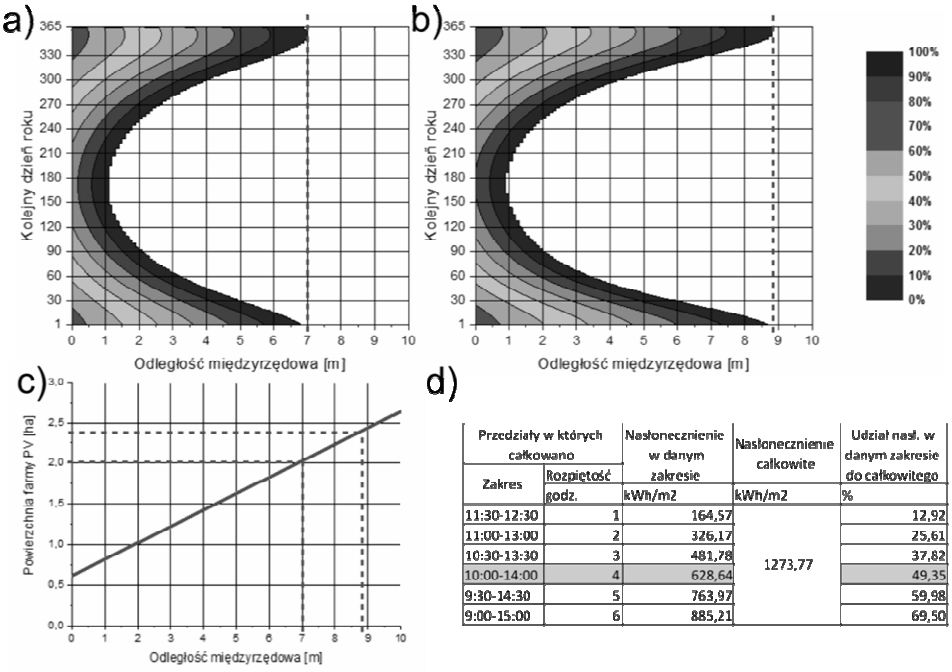
Fig. 4. An arrangement of modules at the photovoltaic farm in Wierzchoslawice

W przypadku tradycyjnych modułów krystalicznych częściowe zacienienie modułów nie przekłada się w sposób liniowy na spadek uzysku energii elektrycznej, czego powodem jest sposób łączenia ogniw wewnątrz modułu. Prawie wszystkie moduły fotowoltaiczne, produkowane w technologii mono- i polikrystalicznej, posiadają diody bocznikujące. W zależności od modelu ilość diod może być różna. Najczęściej występuje kombinacja 1 lub 3 diodowa. Przy jednodiodowym modelu wystarczy, ze kilka ogniw zostanie zacienionych, a cały moduł zostanie „wyłączony". W przypadku, gdy moduł posiada np. 3 diody bocznikujące to przysłonięcie kilku ogniw spowoduje „wyłączenie" tylko jednej bądź dwóch sekcji. Istotne jest to zwłaszcza w przypadku farm fotowoltaicznych, gdzie moduły są montowane w wielu rzędach. Prawidłowe ustawienie modułów pozwoli ograniczyć niekorzystny wpływ zacienienia na moduły. Sugerowanym rozwiązaniem jest ustawianie modułów w pozycji horyzontalnej, ponieważ takie rozwiązanie pozwala na pracę nawet przy częściowym zacienieniu.

3. Symulacja zacienienia

Symulacja ma na celu przeanalizowanie, w jaki sposób ustawienie modułów oraz odstępów miedzy rzędami wpływa na procentowe zacienienie farmy fotowoltaicznej. Do symulacji przyjęto następujące założenia: podstawowa

jednostka robocza to moduł fotowoltaiczny o mocy 230 Wp i wymiarach 165×99 cm w ilości 4360 sztuk (1,0 MWp), 10 rzędów, dwa stopnie pionowego ułożenia modułów oraz kąt nachylenia względem ziemi 35°.Wyniki symulacji przedstawiono na Rys. 5.



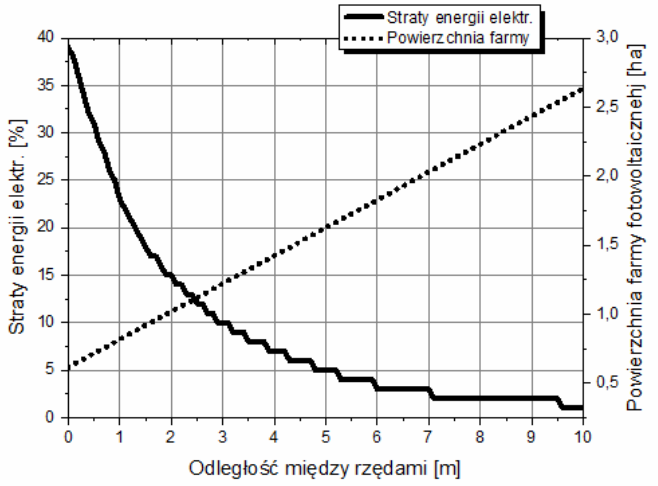
Przedziały w których całkowano		Nasłonecznienie w danym zakresie	Nasłonecznienie całkowite	Udział nasł. w danym zakresie do całkowitego
Zakres	Rozpiętość godz.	kWh/m2	kWh/m2	%
11:30-12:30	1	164,57	1273,77	12,92
11:00-13:00	2	326,17		25,61
10:30-13:30	3	481,78		37,82
10:00-14:00	4	628,64		49,35
9:30-14:30	5	763,97		59,98
9:00-15:00	6	885,21		69,50

Rys. 5. Wyniki symulacji procentowego zacienienia farmy PV zlokalizowanej w pobliżu Lublina: a) wykres konturowy przedstawiający procentowe zacienienie w godzinach południowych w zależności od wartości odstępów międzyrzędowych, b) zacienienie dla godzin 10:00 i 14:00 c) zależność odstępów między rzędami do powierzchni farmy PV, d) nasłonecznienie na powierzchnię w odpowiednich przedziałach czasowych

Fig. 5. Simulation results of percentage shading on PV farm located near Lublin: a) contour plot showing the percentage shading at midday depending on the spacing between the rows, b) shading for hours from 10:00 to 14:00 c) the dependence of the spacing between rows on PV farm to the farm area, d) the surface of the insolation at time intervals

Wyniki symulacji pozwalają w graficzny sposób wyznaczyć optymalną odległość międzyrzędową na famie PV. Dla godziny 12:00, czyli południa minimalna odległość międzyrzędowa, dla której nie występuje efekt zacienienia wynosi 7 metrów. Należy jednak mieć na uwadze szerszy przedział czasowy, gdyż w godzinach od 10:00 do 14:00 na moduł pada prawie 50% całkowitej rocznej sumy energii słonecznej, co jest widoczne na Rys. 5d. Dostosowanie się do powyższych kryteriów wiąże się zazwyczaj z powiększeniem powierzchni działki o 20%.

Straty energii elektrycznej w sposób wykładniczy zależą od odległości miedzy rzędami. Przy odległości 7 metrów straty energii elektrycznej wynoszą ok. 2,5% (Rys. 6.), a powierzchnia działki wynosi nieco ponad 2 ha. Straty przy odstępach powyżej 7 metrów są już mało znaczące. Jedynie w porze zimowej wpłyną negatywnie na uzysk energii elektrycznej.



Rys. 6. Straty energii elektrycznej farmy PV w zależności od odległości międzyrzędowych (symulacja dla Lublina i zadanych parametrów)

Fig. 6. It shows the loss of electric potential energy depending on the distance between the rows (the simulation for Lublin and the specified parameters)

4. Podsumowanie

Krystaliczne moduły fotowoltaiczne są bardzo wrażliwe na zacienienie. Nawet niewielki zacieniony obszar może powodować wyłączenie sekcji ogniw lub całego modułu, a także gwałtowny wzrost temperatury związany z wstecznym przepływem prądu przez ogniwo. Obniżenie sprawności ogniw słonecznych wraz z temperaturą oraz stopniem zacienienia jest czynnikiem bardzo istotnym przy optymalizacji warunków pracy systemów fotowoltaicznych.

W niniejszej pracy przedstawiono, w jaki sposób można określić optymalne położenie modułów słonecznych tak, aby docierała do niech jak największa ilość promieniowania słonecznego, a zacienienie związane z położeniem sąsiednich baterii słonecznych było jak najmniejsze. Wiedza ta może być przydatna przy prognozowaniu uzysku energii elektrycznej, projektowaniu farm fotowoltaicznych, czy sporządzaniu planów biznesowych inwestycji.

Literatura

[1] Jahn U., Tregtmeyer D., Grochowski J., Auswertungenausdem 1000-Dächer PV Programme: Vergleischsmessungen an PVGeneratoren. Proc., 10th Symposium PhotovoltaisheSolarenergie, Staffelstein, Germany 1995, s. 66–77.

[2] King D. L., Kratochvil J. A., Boyson W. E., Measuring Solar Spectral and Angle-of-Incidence Effects on Photovoltaic Modules and Solar Irradiance Sensor, 26th IEEE Photovoltaic Specialists Conference, Wrzesień 1997, Anaheim, California.

[3] Markvart T., Fragaki A., Ross J.N., PV system sizing using observed time series of solar radiation, Solar Energy 80, 2006, s. 46-50.

[4] Picault D., Raison B., Bacha S., Aguilera J., De La Casa J., Reducing mismatch losses in grid-connected PV systems by the means of alternative array topologies, Technical handbook 11a'10, 2010, s. 1-6.

[5] Program stworzony w ramach projektu Komisji Europejskiej, dostępny pod adresem http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/.

THE ANALYSIS OF THE SHADING IMPACT ON PV CRYSTALLINE MODULES FOR THE ENERGY EFFICIENCY OF SOLAR FARMS.

S u m m a r y

Investments related to solar energy have a relatively long payback period in relation to other sources of electricity. The reason for this is problem are poor law regulations to promote the development of this type of energy in Poland. The payback period of solar energy investments is very long. The reason for this is the problem of weak regulation which support the development of this type of energy in Poland. However, there are effective methods to obtain electricity from the sun – the methods by which you can significantly shorten the time of reimbursement of capital expenditures. These methods can be implemented at the design stage by the selections of high-efficiency module and the proper angle of inclination, or by the reduction of the self-shading effect for modules. The article examined the impact of shadow on modules (a shadow effect). The shadow effect is a negative phenomenon for the different photovoltaic systems, starting from tacking systems, passing the large-scale solar farms and ending with the small domestic installations. This phenomenon causes the differentiation levels of the solar irradiation on the surface of modules and results in a decrease in generation of the electric potential energy. In the worst case scenario, the shadow effect can cause permanent damage to the structure of the solar cells – e.g. by creating so-called "hot spots". Using appropriate calculation algorithms, you may predict the effects of unavoidable shading, and thereby it allow you to take certain steps to prevent the occurrence of this phenomenon at the design stage. For this purpose the analysis of the relative movement of the sun above the horizon with taking into account the typical parameters of photovoltaic modules, such as power, length or width, and their combination of settings for a given photovoltaic farm. The simulation results, which are presented in the paper, enable reader to understand how to shadow can affect on the electricity production.

Keywords: photovoltaic, shadow effect, electrical efficiency, solar radiation

Przesłano do redakcji: 11.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.79

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 505-518

Jarosław TATARCZAK[1]
Marta SOKOŁOWSKA[2]
Jan M. OLCHOWIK[3]

ANALIZA NAPROMIENIOWANIA SŁONECZNEGO POLSKI NA PODSTAWIE DANYCH SATELITARNYCH NASA

Napromieniowanie określa sumę energii promieniowania słonecznego jaka pada na określoną powierzchnię w danym przedziale czasu. Dzięki tej wielkości fizycznej człowiek jest w stanie określić zasoby energii słonecznej w danym czasie i miejscu. Jest to istotne zwłaszcza dla takich branż jak rolnictwo, budownictwo czy energetyka, gdzie ma pośrednie lub bezpośrednie przełożenie na finanse. Napromieniowanie jest wartością pozornie łatwą od zmierzenia, wystarczy do tego odpowiednia aparatura pomiarowa. Problem pojawia się jednak gdy pomiary obejmują znaczy obszar a urządzenia mierzące są często nie skalibrowane w odpowiedni sposób. Wydaje się więc, że najlepszym rozwiązaniem było stosowanie jednego typu urządzeń, połączonych ze sobą specjalną siecią informacyjną. Rozwiązaniem może być pomiar dokonywany przez satelity krążące wokół kuli ziemskiej. W niniejszej pracy podjęto próbę określenia warunków nasłonecznienia Polski, sporządzając analizę, wykorzystującą bazę danych, opartą na ponad 20-letniej rejestracji promieniowania słonecznego na świecie przez system satelitarny, w ramach projektu NASA: „Surface Meteorology and Solar Energy (SSE)".Pomiary mają rozdzielczość jednego stopnia szerokości i długości geograficznej. Obliczenia i ich metodologia zawarte w artykule pozwoliły na opracowanie topologii nasłonecznienia dla wybranych szerokości geograficznych naszego kraju. Wyniki analizy przedstawiono w formie graficznej. Wyniki przeprowadzonej analizy mogą służyć pomocą w procesie planowania inwestycji energetyki słonecznej na terenie Polski.

Słowa kluczowe: fotowoltaika, algorytm, promieniowanie dyfuzyjne, energia słoneczna

[1] Jarosław Tatarczak, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Katedra Maszyn Ogrodniczych i Leśnych, ul. Głęboka 28, 20-612 Lublin, +48 81 531 96 53, jaroslaw.tatarczak@gmail.com

[2] Marta Sokołowska, Studenckie Koło Naukowe Energetyki Odnawialnej „GRUPA OGNIWO", Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska

[3] Autor do korespondencji/corresponding author: Jan M. Olchowik, Politechnika Lubelska, Instytut Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, +48 81 538 4700, j.olchowik@pollub.pl

1. Wstęp

Efektywne zagospodarowanie promieniowania słonecznego na Ziemi na cele użyteczne zależy silnie od jego charakterystyki na konkretnej szerokości geograficznej. Chodzi tu głównie o nasłonecznienie i usłonecznienie. Wiarygodność tych danych wynika przede wszystkim ze sposobu i warunków rejestracji tego promieniowania. Stacje pomiarowe wykorzystują różne detektory, w wyniku czego nie posiadają wspólnego punktu odniesienia (wspólnej kalibracji). W niniejszej pracy podjęto próbę określenia warunków nasłonecznienia Polski, wykorzystując bazę danych, opartą na ponad 20 letniej rejestracji promieniowania słonecznego nad Polską przez system satelitarny NASA.

2. Baza danych

W ramach naukowego programu badań Ziemi, NASA od dawna dostarcza istotnych danych klimatycznych pochodzących z satelitów krążących wokół Ziemi. Dane te obejmują długoterminowe szacunkowo-ilościowe dane o przepływie energii słonecznej na powierzchni Ziemi. Dostarczane dane są na tyle dokładne i niezawodne by objąć takie obszary, gdzie pomiary dokonywane są rzadko lub wcale. Baza danych „Surface Meteorology and Solar Energy (SSE)", dotycząca warunków klimatycznych jest dostępna na stronie internetowej należącej do NASA [1].

Obecnie dostępne są dane meteorologiczne w wersji 6.0 (SSE-Release 6.0), opublikowane w 2008 roku. Obejmują one okres od 1 lipca 1983 do 30 czerwca 2005r., co daje 22 lata pomiarów [1]. Baza danych zawiera 200 różnych parametrów meteorologicznych, opracowanych na podstawie pomiarów satelitarnych. Rozdzielczość tych pomiarów to 1 stopień szerokości i długości geograficznej. Daje to 64 800 punktów pomiarowych na całym globie. Wyniki pomiarów przedstawiane są jako średnie dzienne wartości dla poszczególnych miesięcy roku [2].

3. Dokładność pomiarów

Zasadniczo dane dostarczane z naziemnych stacji meteorologicznych są bardziej dokładne. Jednak niepewność pomiarów, spowodowana nieprawidłową kalibracją urządzeń czy brakiem danych (luka w pomiarach) w naziemnych stacjach pomiarowych nie jest zawsze zgłaszana. Według szacunków „World Climate Research Programme" z 1989, niepewność pomiarowa naziemnych stacji wynosiła 6-12% [1]. Szacunkowe dane SSE zostały porównane z danymi naziemnych stacji pomiarowych – Baseline Surface Radiation Network (BSRN), w skali globalnej [1,2] i przedstawione w tabeli poniżej:

Tabela 1. Analiza regresji danych z SSE i BSRN, średnich miesięcznych wartości w okresie od lipca 1983 do czerwca 2006, na podstawie [1,2]

Table 1. Regression analysis of data which is based on the SSE and BSRN for average monthly value in the period from July 1983 to June 2006, based on [1,2]

Parametr	**Strefa**	**Bias (%)**	**RMSE (%)**
Nasłonecznienie na powierzchnię horyzontalną	Globalnie	-0,01	10,25
	Powyżej +/- 60º N/S	-1,18	34,37
	Poniżej +/- 60º N/S	0,29	8,71
Promieniowanie rozproszone na powierzchnię horyzontalną	Globalnie	7,49	29,34
	Powyżej +/- 60º N/S	11,29	54,14
	Poniżej +/- 60º N/S	6,86	22,78
Promieniowanie bezpośrednie na powierzchnię normalną	Globalnie	-4,06	22,73
	Powyżej +/- 60º N/S	-15,66	33,12
	Poniżej +/- 60º N/S	2,4	20,93

4. Metodyka obliczania parametrów ekspozycji promieniowania słonecznego na wybrany obszar Ziemi

4.1. Deklinacja

Deklinacja jest kątowym odchyleniem pozycji Słońca podczas słonecznego południa, w odniesieniu do płaszczyzny równika. Równanie Copper'a, pozwalające obliczyć tą wartość (w stopniach) przedstawiono poniżej [1, 3, 4]:

$$\delta = 23{,}45 \sin(2\pi \frac{284+n}{365}) \quad (1)$$

gdzie: δ – deklinacja pozycji słońca,
n – kolejny dzień roku.

Wartość deklinacji waha się, w ciągu roku, w granicach od +23,45° (21 czerwiec) do -23,45° (21 grudzień). Dla obliczeń wykorzystano średnią miesięczną wartość deklinacji przedstawioną w Tabeli 2 [1].

Tabela 2. Średnia miesięczna wartość deklinacji

Table 2. Average monthly value of declination

Miesiąc	**Dzień miesiąca**	**Dzień roku**	**δ (º)**
Styczeń	17	17	-20.9
Luty	16	47	-13.0
Marzec	16	75	-2.4
Kwiecień	15	105	9.4
Maj	15	135	18.8
Czerwiec	11	162	23.1
Lipiec	17	198	21.2
Sierpień	16	228	13.5
Wrzesień	15	258	2.2
Październik	15	288	-9.6
Listopad	14	318	-18.9
Grudzień	10	344	-23.0

4.2. Godzinowy kąt słoneczny i godzinowy kąt zachodu słońca

Godzinowy kąt słoneczny (ω), jest to kąt odchylenia słońca na wschód lub zachód od lokalnego południka. Kąt ten jest równy zero w czasie południa słonecznego, ujemny przed południem i dodatni po południu. Godzina słoneczna odpowiada kątowi 15º [3]. Godzinowy kąt zachodu słońca (ω_s), odpowiadający wartości godzinowego kąta słonecznego w porze zachodu słońca, wyraża się następująco [3]:

$$\cos(\omega_s) = -\tan(\varphi)\tan(\delta), \tag{2}$$

gdzie: ω_s – godzinowy kąt zachodu słońca,
φ – szerokość geograficzna, δ – deklinacja.

W przypadku dokonywania obliczeń w programach kalkulacyjnych (np. Microsoft Excel) należy zamienić wartość kątową na radiany.

4.3. Promieniowanie słoneczne powyżej granicy atmosfery

Promieniowanie poza atmosferą ziemską (H_0), na jednostkę powierzchni (horyzontalną) określa, ile energii słonecznej dociera na zewnątrz atmosfery Ziemi. Tę wartość można obliczyć korzystając ze wzoru [5]:

$$H_0 = \int_{\omega_{wsch}}^{\omega_{zach}} G_{SC}\left(1 + 0{,}033\cos\left(360\frac{n}{365}\right)\right) \cdot [\cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(\varphi)\sin(\delta)]\, d\omega\,, \quad (3)$$

gdzie: H_0 - promieniowanie słoneczne poza atmosferą ziemską, G_{sc} – stała słoneczne - wynosząca 1 367 W/m^2, n – kolejny dzień roku, φ – szerokość geograficzna, δ – deklinacja, ω - godzinowy kąt słoneczny.

Założono, że: $\omega_{wsch} = \omega_{zach} = \omega_s$. Zatem, nasłonecznienie dzienne dla powierzchni horyzontalnej znajdującej się na zewnątrz atmosfery, wynosi [4,5]:

$$H_0 = \frac{86\,400}{\pi} G_{SC}\left(1 + 0{,}033\cos\left(360\frac{n}{365}\right)\right) \cdot [\cos(\varphi)\cos(\delta)\sin(|\omega_s|) + |\omega_s|\sin(\varphi)\sin(\delta)]. \quad (4)$$

Po scałkowaniu promieniowania H_0, uzyskuje się wynik wyrażony w J/m^2. Aby przeliczyć tę wartość na kWh/m^2, wynik należy przemnoży przez $3{,}6\cdot 10^{-6}$. Podobnie można określić średnie miesięczne nasłonecznienie poza granicą atmosfery $\overline{H}_0$.

4.4. Wskaźnik przejrzystości atmosfery

Wskaźnik przejrzystości atmosfery (K) określa, jaka część promieniowania dociera do powierzchni Ziemi. Dla obliczeń i prezentacji danych, wskaźnik $\overline{K}$, odnosi się do średnich miesięcznych wartości i przedstawiony jest wyrażeniem [1,3,4,5]:

$$\overline{K} = \frac{\overline{H}}{\overline{H}_0}\,, \quad (5)$$

gdzie: $\overline{K}$ – średni miesięczny wskaźnik przejrzystości atmosfery, $\overline{H}$ – średnie miesięczne promieniowanie na powierzchnię horyzontalną przy gruncie [kWh/m^2], $\overline{H}_0$ – średnie miesięczne promieniowanie na powierzchnię horyzontalną poza granicą atmosfery [kWh/m^2].

Średnie miesięczne wartości przedstawionego wskaźnika, są zależne od lokalizacji i pory roku. Wahają się one od 0,3 (duże miesięczne zachmurzenie), do 0,8 (duża miesięczna przejrzystość powietrza) [3,4].

4.5. Współczynnik składowej rozproszonej do całkowitego nasłonecznienia

Średnia miesięczna wartość współczynnika składowej rozproszonej do całkowitej nasłonecznienia $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ może zostać wyznaczona za pomocą następujących równań [1]:

Dla szerokości geograficznych w granicach od 45º S do 45º N:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0{,}96268 - (1{,}45200 \cdot K) + (0{,}27365 \cdot K^2) + (0{,}04279 \cdot K^3) + (0{,}000246 \cdot \omega_s) + (0{,}001189 \cdot \alpha_n); \quad (6)$$

Dla szerokości geograficznych w granicach poniżej 45º S i powyżej 45º N:

- przy $0° \leq \omega_s \leq 81{,}4°$:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1{,}441 - (3{,}6839 \cdot K) + (6{,}4927 \cdot K^2) - (4{,}147 \cdot K^3) + (0{,}0008 \cdot \omega_s) - (0{,}008175 \cdot \alpha_n) \; ; \quad (7)$$

- przy $81{,}4° < \omega_s \leq 100°$:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1{,}6821 - (2{,}5866 \cdot K) + (2{,}373 \cdot K^2) - (0{,}5294 \cdot K^3) - (0{,}00277 \cdot \omega_s) - (0{,}004233 \cdot \alpha_n); \quad (8)$$

- przy $100° < \omega_s \leq 125°$:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0{,}3498 + (3{,}8035 \cdot K) - (11{,}765 \cdot K^2) + (9{,}1748 \cdot K^3) + (0{,}001575 \cdot \omega_s) - (0{,}002837 \cdot \alpha_n); \quad (9)$$

- przy $125° < \omega_s \leq 150°$:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 1{,}6586 - (4{,}412 \cdot K) + (5{,}8 \cdot K^2) - (3{,}1223 \cdot K^3) + (0{,}000144 \cdot \omega_s) - (0{,}000829 \cdot \alpha_n); \quad (10)$$

- przy $150° < \omega_s \leq 180°$:

$$\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}} = 0{,}6563 - (2{,}893 \cdot K) + (4{,}594 \cdot K^2) - (3{,}23 \cdot K^3) + (0{,}004 \cdot \omega_s) - (0{,}0023 \cdot \alpha_n), \quad (11)$$

gdzie: $\frac{\bar{H}_d}{\bar{H}}$ – współczynnik składowej rozproszonej do całkowitego promieniowanie, ω_s – godzinowy kąt zachodu słońca, α_n – kąt wysokości słońca w południe (w radianach).

Kąt wysokości słońca w porze południowej, dla średniej miesięcznej wartości deklinacji (Tabela 2.) można obliczyć z następującej zależności:

$$\alpha_n = (90 - (\varphi - \delta)), \tag{12}$$

gdzie: α_n – kąt wysokości słońca,
φ – szerokość geograficzna, δ – deklinacja.

4.6. Składowa rozproszona i bezpośrednia promieniowania słonecznego na powierzchnię horyzontalną

Całkowite średnie nasłonecznie $\overline{H}$ jest wartością, pozyskaną z baz danych SSE. Średnią miesięczną składową rozproszoną $\overline{H}_d$ można wyznaczyć ze wzoru:

$$\overline{H}_d = \overline{H} \cdot \frac{\overline{H}_d}{\overline{H}}. \tag{13}$$

Średnią miesięczną składową bezpośrednią promieniowania słonecznego $\overline{H}_b$ padającą na powierzchnię horyzontalną można określić, jako:

$$\overline{H}_b = \overline{H} - \overline{H}_d. \tag{14}$$

4.7. Średnie dzienne promieniowanie słoneczne na powierzchnię pochyłą

Poniżej została przedstawiona metoda obliczania nasłonecznienia na powierzchnię nachyloną pod kątem z zakresu od 0º do 90º, skierowaną w kierunku południowym. Na początku należy określić promieniowanie całkowite H_h, rozproszone H_{hd} i bezpośrednie H_{hb} w poszczególnych godzinach dnia [1,3,4,5]:

$$H_h = r_t \cdot \overline{H}, \tag{15}$$

$$H_{hd} = r_d \cdot \overline{H}_d, \tag{16}$$

$$H_{hb} = H_h - H_{hd}, \tag{17}$$

gdzie: r_d - współczynnik korekcyjny Collares-Pereira i Rabl'a, dla poszczególnej godziny dnia , r_d - współczynnik korekcyjny Liu i Jordan'a, dla poszczególnej godziny dnia.

Współczynnik korekcyjny r_t jest wymagany do obliczenia napromieniowanie całkowanego godzinowego (15). Można go wyznaczyć z zależności przedstawionych poniżej:

$$r_t = \frac{\pi}{24}[a + b \cdot \cos(\omega)] \frac{\cos(\omega) - \cos(\omega_s)}{\sin(\omega) - \omega_s \cdot \cos(\omega_s)}, \tag{18}$$

$$a = 0{,}409 + 0{,}5016 \cdot \sin\left(\omega_s - \frac{\pi}{3}\right), \tag{19}$$

$$b = 0{,}6609 - 0{,}4767 \cdot \sin\left(\omega_s - \frac{\pi}{3}\right), \tag{20}$$

gdzie: ω - godzina kątowa (w radianach), ω_s - godzinowy kąt zachodu słońca (w radianach).

Współczynnik korekcyjny r_d jest wymagany do obliczenia napromieniowanie rozproszonego godzinowego (wyrażenie 16). Współczynnik ten można wyznaczyć z zależności przedstawionych poniżej [1,3,4,5]:

$$r_d = \frac{\pi}{24}\frac{\cos(\omega)-\cos(\omega_s)}{\sin(\omega)-\omega_s \cdot \cos(\omega_s)}, \tag{21}$$

gdzie: ω - godzina kątowa (w radianach), ω_s - godzinowy kąt zachodu słońca (w radianach).

Współczynnik korekcyjny R_b jest wymagany, by skorygować bezpośrednie napromieniowanie nachylonej powierzchni. Współczynnik ten można wyznaczyć następująco [4,5]:

$$R_b = \frac{\cos(\theta)}{\cos(\theta_z)}, \tag{22}$$

$$\cos(\theta_z) = \cos(\varphi)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(\varphi)\sin(\delta), \tag{23}$$

$$\cos(\theta) = \cos(\varphi - \beta)\cos(\delta)\cos(\omega) + \sin(\varphi - \beta)\sin(\delta), \tag{24}$$

gdzie: φ – szerokość geograficzna, δ – deklinacja, ω - godzina kątowa (w radianach), β – kąt nachylenia powierzchni względem Ziemi.

Godzinowa wartość całkowitego H_{ht} napromieniowanie, na nachyloną powierzchnię może być wyznaczona w następujący sposób:

$$H_{ht} = H_b R_b + H_d\left(\frac{1+\cos(\beta)}{2}\right) + H\rho\left(\frac{1-\cos(\beta)}{2}\right), \tag{25}$$

gdzie: β – kąt nachylenia powierzchni względem Ziemi, ρ – współczynnik albedo, parametr ten określa zdolność odbijania promieni od danej powierzchni.

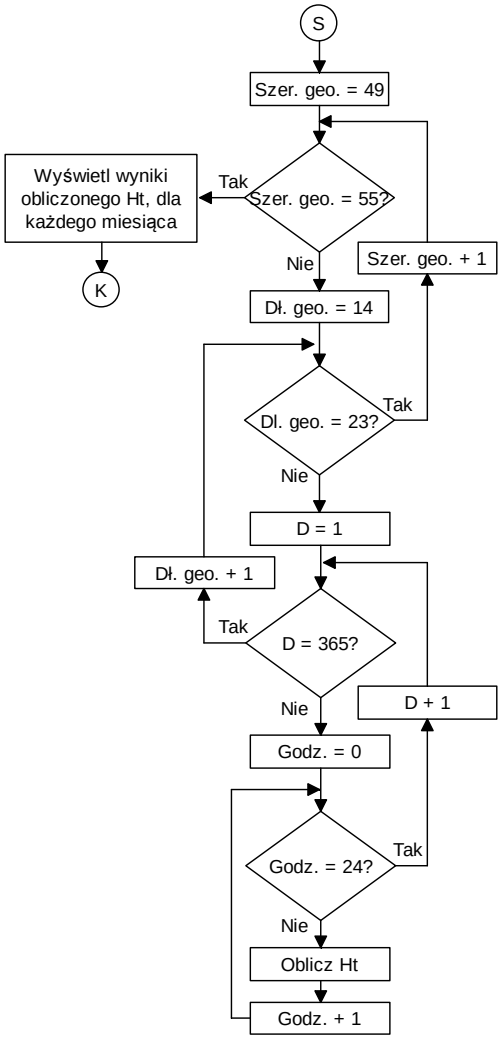
Współczynnik albedo (ρ) można wyliczyć także na podstawie średniej temperatury w ciągu miesiąca. Jeżeli temperatura otoczenia jest powyżej 0°C, to wartość ρ = 0.2, a jeżeli temperatura jest poniżej -5°C, to ρ = 0,7. Dla temperatur pomiędzy -5°C i 0°C wartość albedo (ρ) zmienia się w sposób liniowy [1,3].

Tabela 3. Średnie wartości współczynnika albedo (ρ) dla charakterystycznych powierzchni, na podstawie [6]

Table 3. Average values of albedo(ρ) for a given characteristic kind of surface, based on [6]

Lp.	Rodzaj powierzchni	Wartość albedo
1.	Śnieg (świeży)	0,75
2.	Lustro wody (duży kąt padania)	0,07
3.	Ziemia (gliniasta)	0,14
4.	Las iglasty (zimą)	0,07
5.	Las jesienią, dojrzałe pola zbóż, plantacje	0,26
6.	Płaszczyzna asfaltowa	0,10
7.	Płaszczyzna betonowa	0,22
8.	Opadłe liście	0,30
9.	Wyschnięta trawa	0,20
10.	Zielona trawa	0,26

Średnia miesięczna wartość napromieniowania ($\overline{H}_t$) jest szacowana na podstawie sumowaniu wartości godzinowych napromieniowania na nachyloną powierzchnię (H_{ht}). Algorytm wyznaczania średnio - miesięcznej wartości napromieniowania na pochyłą powierzchnię przedstawiony jest na Rys. 1.

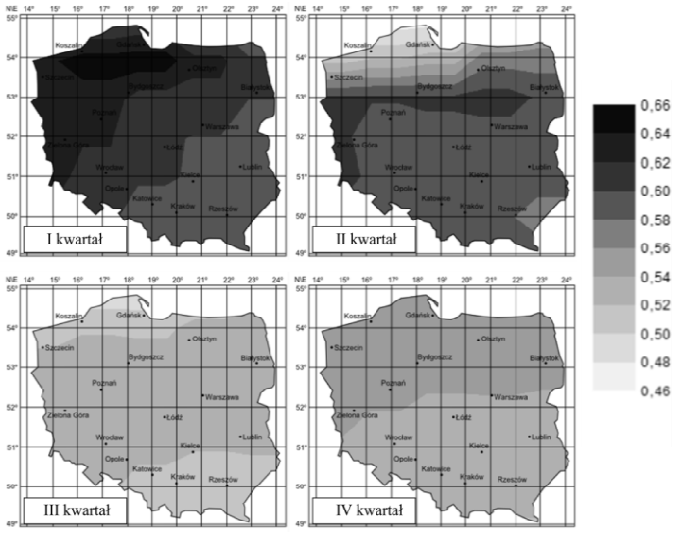


Rys. 1. Algorytm wyznaczania średniej miesięcznej wartości napromieniowania na pochyłą powierzchnię, dla obszaru Polski (od 14°E do 23°E oraz od 49°N do 55°N). S – początek algorytmu, K – koniec algorytmu

Fig. 1. The algorithm for calculating the average monthly irradiation on an inclined surface in Poland (from 14 ° E to 23 ° E and from 49 ° N to 55 ° N). S - the beginning of the algorithm, K - the end of the algorithm

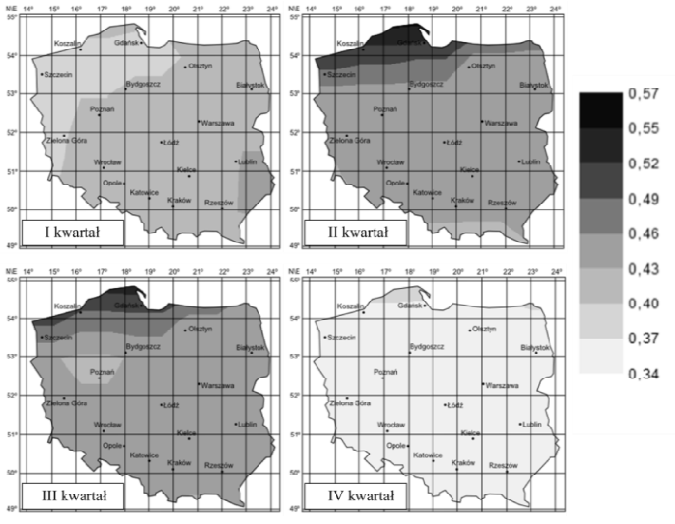
5. Wyniki

Wyniki obliczeń przedstawione zostały na rysunkach Rys. 2-9.



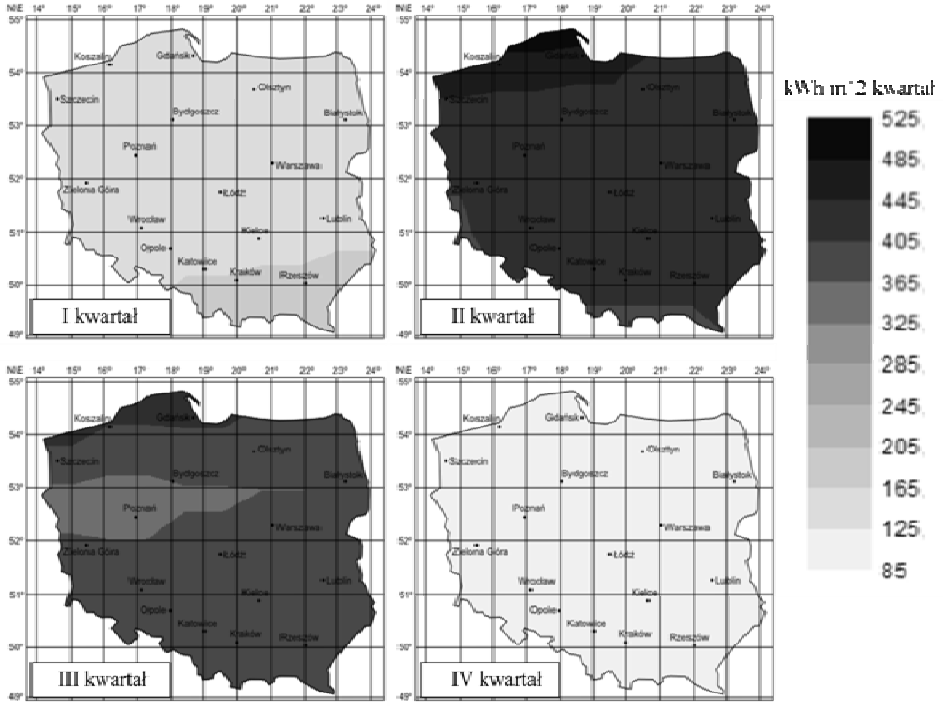
Rys. 2. Średnia kwartalna wartość składowej dyfuzyjnej do całkowitej energii promieniowania słonecznego dla terenu Polski (1.0 = 100%)

Fig. 2: Average quarterly value of the diffusion in relation to the total solar energy radiation in Poland (1.0 = 100%)



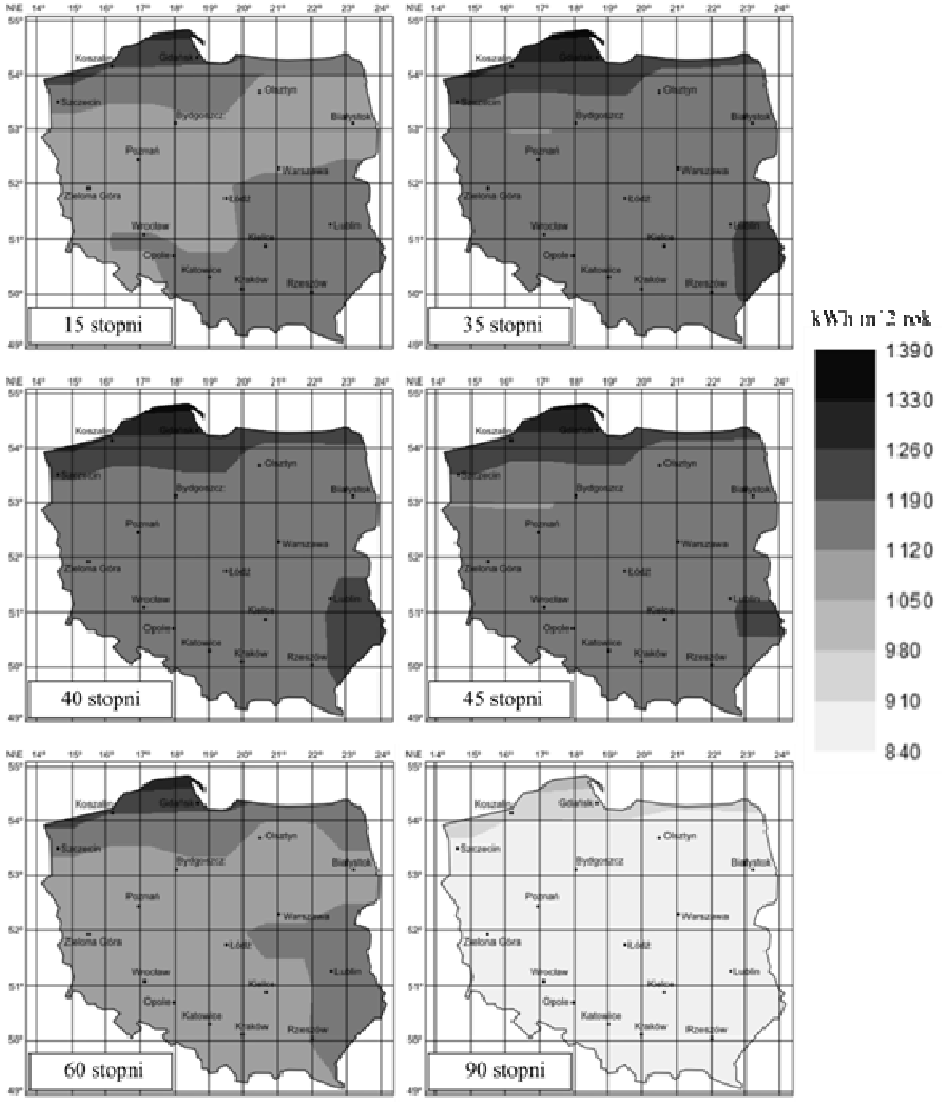
Rys. 3. Średni kwartalny wskaźnik przejrzystości powietrza dla terenu Polski (1.0 = 100% przejrzystości powietrza)

Fig. 3. Average quarterly clearness index of air mass in Poland (1.0 = 100% transparency of air)



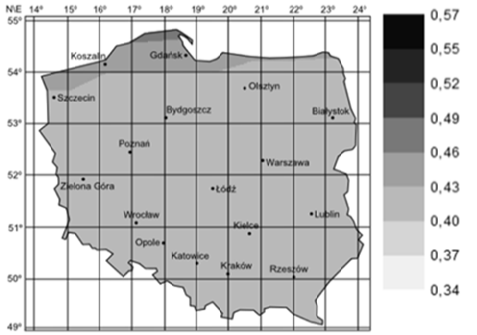
Rys. 4. Kwartalne napromieiowanie dla terenu Polski na powierzchnię horyzontalną

Fig. 4. Quarterly irradiation on a horizontal surface in Poland



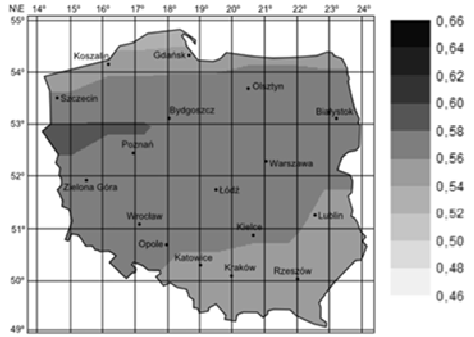
Rys. 5. Roczne napromieniowanie dla terenu Polski na płaszczyznę nachyloną o wybrany kąt względem ziemi

Fig. 5. Annual irradiation for Poland on the inclined plane for selected angles of inclination in relation to the ground



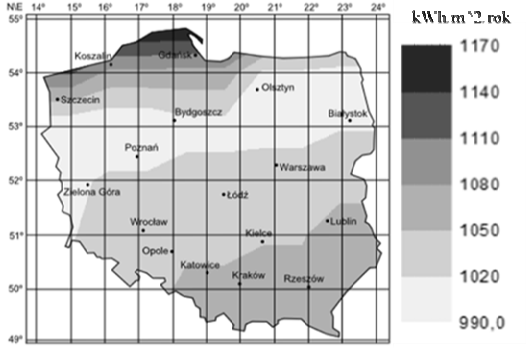
Rys. 6. Średni roczny wskaźnik przejrzystości powietrza dla terenu Polski (1.0 = 100% przejrzystości powietrza)

Fig. 6 Average annual clearness index of air mass in Poland (1.0 = 100% transparency of air)



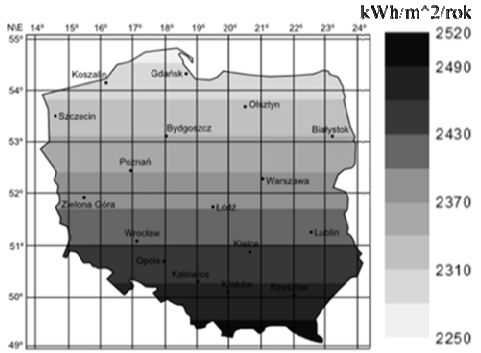
Rys. 7. Średnia roczna wartość składowej dyfuzyjnej promieniowania słonecznego do składowej całkowitej dla Polski (1.0 = 100%)

Fig. 7. Average annual value of the diffusion part of the total solar energy radiation in Poland (1.0 = 100%)



Rys. 8. Roczne napromieniowanie dla terenu Polski na powierzchnię horyzontalną

Fig. 8. Annual irradiation on a horizontal surface in Poland



Rys. 9. Roczne napromieniowanie dla terenu Polski dla wskaźnika przejrzystości = 1.0 (nasłonecznienie na zewnętrzną warstwę atmosfery)

Fig. 9. Annual irradiation in Poland for clearness index of air mass = 1.0 (insolation on the outer board of the atmosphere)

6. Podsumowanie

Wykorzystanie bazy danych „Surface Meteorology and Solar Energy (SSE)" NASA, może być pomocne przy projektowaniu i ocenie efektywności konwerterów energii słonecznej w energię użyteczną. Długookresowe dane, uzyskane z jednego źródła przy zastosowaniu tej samej metodologii rejestracji stanowią wiarygodne źródło do stworzenie topologii nasłonecznienia na wybranej szerokości geograficznej. Uwidocznienie tych danych w różnych sekwencjach czasowych pozwala optymalizować projekt inwestycji energetyki słonecznej.

Literatura:

[1] Surface meteorology and Solar Energy (SSE) Release 6.0 Methodology Version 3.1.1, January 2013.
[2] Strona internetowa bazy danych SSE Realsed 6.0: http://eosweb.larc.nasa.gov/sse/.
[3] Clean Energy Project Analysis, RETScreen® Engineering & Cases Textbook - Third Edition, Kanada, September 2005.
[4] Duffi'e, J.A. and Beckman, W.A., Solar Engineering of Thermal Processes, 3nd Edition, John Wiley& Sons, 1991.
[5] Jastrzębska G., Odnawialne Źródła Energii I Pojazdy Ekologiczne, WNT, Warszawa 2009.
[6] Wacławek M., Rodziewicz T., Ogniwa Słoneczne - Wpływ Środowiska Naturalnego na ich Pracę, WNT, Warszawa 2011.

INSOLATION OF POLAND BASED ON NASA SATELLITE DATA

S u m m a r y

Solar irradiation defines the amount of solar radiation which falls on specific surface in a given period of time. Due to this physical value one can estimate solar energy resources in a given time and place. This is especially important in the following sectors as agriculture, construction and energetics, wherever there is direct or indirect impact on finances. The value is a seemingly easy to measure, you only need an appropriate measuring equipment. The problem arises, however, when measurements cover a large area and the measuring devices are often not calibrated properly. Therefore it seems that the best solution would be using one type of devices, interconnected via special information network. The solution may be the measurement performed by satellites which are orbiting the earth. The content included herein is a trial to determine the conditions of insolation in Poland, by preparing analysis uses a database based on over 20 years of registration of solar radiation in the world by the satellite system, as part of NASA "Surface Meteorology and Solar Energy (SSE)." The measurements have a resolution of one degree of latitude and longitude.Calculations and their methodology contained in the article provided an opportunity to draw up a topology insolation for selected latitudes taking into account the relevant factors. The analysis results are shown in the drawings. Content of the drawings is dependent on the type of factor analyzed. The results of the analysis can serves in the planning of investments and modernization in Poland and affecting the effective management of solar energy for useful purposes.

Keywords: photovoltaics, algorithm, diffuse radiation, solar energy

Przesłano do redakcji: 11.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.80

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 519-532

Wojciech TERLIKOWSKI[1]

ROLA REHABILITACJI, MODERNIZACJI I ADAPTACJI BUDYNKÓW ZABYTKOWYCH W PROCESIE REWITALIZACJI

Celem artykułu jest ukazanie roli rehabilitacji, modernizacji i adaptacji - głównych działań inżynierskich, w procesie rewitalizacji budynków zabytkowych. W oparciu o własne doświadczenia, w działalności inżynierskiej i naukowej, autor dokonuje analizy tego procesu, ukazuje problemy i zagrożenia oraz definiuje poszczególne działania. Są to działania różniące się od siebie, uzupełniające się jednak i wynikające z siebie nawzajem. Mają one bardzo złożony charakter i powinny być odpowiednio zaplanowane i koordynowane w czasie realizacji. Powinny być realizowane zgodnie z programem konserwatorskim, uzgodnionym i zatwierdzonym przez konserwatora zabytków. Rehabilitacja budynku zabytkowego odnosi się do konstrukcji, formy, w tym wszystkich detali i elementów architektonicznych, nadających wartość estetyczną zabytku, instalacji i wyposażenia. Modernizacja budynku zabytkowego zwiększa jego wartość użytkową - walory funkcjonalne, estetyczne oraz komfort użytkowania. Wszystkie działania rehabilitacyjne, modernizacyjne, adaptacyjne, w powiązaniu z badaniami i działaniami diagnostycznymi powinny być wykonywane w sposób prawidłowo zaplanowany i skoordynowany (uwzględniający istotna rolę konserwatora zabytków). Każdy budynek zabytkowy powinien być zaadoptowany do współczesnych wymagań użytkowych. Zdolność adaptacyjna budynku, układu architektoniczno-konstrukcyjnego, ustroju nośnego, elementu konstrukcyjnego jest zespołem cech i właściwości, określających łatwość adaptacji do nowych warunków konstrukcyjnych (pracy w nowych układach konstrukcyjnych, implikujących nowe schematy statyczne, możliwości ich zmian, napraw, wymian, możliwości zmian obciążeń itp.) lub użytkowych. Wartość zdolności adaptacyjnej może być określona po przeanalizowaniu wielu cech i właściwości. W artykule przedstawiony jest schemat powiązań działań rewitalizacyjnych.

Słowa kluczowe: konserwacja zabytków, zdolność adaptacyjna, zasady zrównoważonego rozwoju

[1] Wojciech Terlikowski, Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej, Aleja Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, tel.+48 602 630 513, email: w.terlikowski@il.pw.edu.pl

1. Pojęcie zrównoważonej rewitalizacji

Zasady zrównoważonego rozwoju nakazują szerokie i interdyscyplinarne podejście do wszelkich procesów gospodarczych i społecznych. Szczególne miejsce wśród wszystkich obszarów gospodarki ma budownictwo i procesy związane z projektowaniem i realizacją inwestycji budowlanych, odnoszącymi się zarówno do nowych obiektów budowlanych, jak też do obiektów już istniejących. Zrównoważony rozwój w budownictwie ma kluczowe zadanie w procesie równoważenia gospodarki kraju, ze względu na duży potencjał tego sektora, wynikający z liczby zatrudnionych w nim pracowników, społeczną rolę związaną z ciągłym brakiem zaspokojenia potrzeb mieszkaniowych w kraju, wrażliwość na nowe innowacyjne rozwiązania technologiczne, możliwość wdrażania nowych rozwiązań technicznych, materiałowych oraz obniżenia stopnia emisji i zużycia energii. Istotnym elementem procesu równoważenia gospodarki jest rewitalizacja. Pojęcie „rewitalizacja" oznacza dosłownie „ożywienie, przywrócenie życia". Odnosi się je obecnie do bardzo istotnych, z punktu widzenia gospodarki i zagadnień społecznych, procesów inwestycyjnych, które zmieniają całe obszary, znajdujące się w stanie kryzysowym. Są to obszary w różny sposób zdegradowane, zarówno w wiejskie jak i miejskie. Rewitalizacja dotyczy procesów interdyscyplinarnych, obejmujących złożone zmiany przestrzenne, urbanistyczne, budowlano-architektoniczne, które powinny być przeprowadzone w taki sposób, by obszar został wyprowadzony ze stanu kryzysowego. Najbardziej skutecznie będzie to zrealizowane wówczas, gdy w ramach rewitalizacji usunięte zostaną przyczyny powodujące kryzys, a także rozwiązane zostaną problemy wynikające z tego stanu i zniwelowane skutki. Obok zmian związanych z gospodarka przestrzenną i budownictwem, rewitalizacja powinna obejmować zmiany społeczne i gospodarcze, będące następstwem działań przestrzenno-budowlanych lub wynikające z działań równoległych. W rewitalizowanym obszarze istotne znaczenie mają rewitalizowane budynki. W obszarze kryzysowym oraz w budynkach, które na nim się znajdują, powinna być przywrócona funkcja pierwotna lub wykreowana nowa, uwzgledniająca współczesne potrzeby mieszkańców, użytkowników, w tym inwestora, mającego w procesie rewitalizacji znaczenie kluczowe. Wykreowana nowa funkcja obszaru lub poszczególnych obiektów budowlanych, powinna uwzględniać rozwiązanie problemów stanu kryzysowego, usunięcie przyczyn ich powstania, a także stworzenie warunków do dalszego rozwoju. Ponieważ często jest to wartość dodana do efektu ekonomicznego inwestycji budowlanej, inwestorzy często nie dostrzegają w tych działaniach swojego interesu. Działania rewitalizacyjne powinny dotyczyć interesu publicznego, oprócz bezpośrednich zysków wymiernych z ich przeprowadzenia - dodatniego wyniku ekonomicznego inwestycji, ważne są zyski pośrednie - społeczne. Rewitalizacja obszaru kryzysowego powinna powodować pobudzenie aktywności gospodarczej (szczególnie lokalnej, w obszarze małych i średnich przedsiębiorstw, w tym tworzeniem nowych

miejsc pracy i rynków zbytu), społecznej, inicjować rozwój kultury, edukacji, rozwiązywać problemy socjalne i bytowe ludności. Tylko przyjmując tak szeroki zakres działań mieszczących się w procesie rewitalizacji, można mówić o prawidłowym jej przeprowadzeniu.

Do niedawna pojęcie rewitalizacji odnosiło się przede wszystkim do całych obszarów znajdujących się w stanie kryzysowym i znajdujących się na ich terenie obiektów budowlanych lub ich zespołów. Uwzględniając powyższe założenia pojęcie rewitalizacji można jednak odnieść do pojedynczego obiektu budowlanego – np. budynku lub budowli, które przestały spełniać swoje zadania społeczne i utraciły funkcje użytkowe, zostały zdegradowane lub zniszczone, stając się nierzadko przyczyną sytuacji kryzysowej w otaczającym je obszarze. Wśród takich budynków szczególną rolę odgrywają budynki zabytkowe. Patrząc na proces rewitalizacji przez środowiskowy pryzmat zasad zrównoważonego rozwoju, widać wagę i znaczenie ochrony zabytków. Są one częścią dziedzictwa kulturowego, o znaczeniu lokalnym, krajowym, regionalnym lub nawet globalnym. Najlepszą formą ich ochrony jest właśnie rewitalizacja. Rynek budowlany w Polsce pokazuje, że coraz częściej adaptuje się budynki istniejące, w tym zabytkowe, do współczesnych wymagań użytkowych. Towarzyszy temu często przywrócenie funkcji pierwotnej lub jej zamiana na nowo wykreowaną, uwzględniającą potrzeby zarówno inwestora (związane z planem inwestycyjnym i zagadnieniami komercyjnymi), jak i społeczności lokalnej (wynikające z potrzeby przeprowadzenia przemian rewitalizacyjnych). Dobrym tego przykładem jest rewitalizacja południowej strony Placu Bankowego w Warszawie, ze znajdującym się tu Hotelem Saskim (Rys.1).



Rys.1. Budynek Hotelu Saskiego po rewitalizacji

Fig. 1. The Saski Hotel after revitalization

Należy zaznaczyć, że rewitalizowane zabytkowe budynki mieszkalne i użyteczności publicznej, a także budynki poprzemysłowe, nadające się do adaptacji na lofty, są bardzo poszukiwanym towarem rynkowym. Te ostatnie dają możliwość utworzenia w starych magazynach, fabrykach, spichlerzach, hutach, browarach kompleksów pomieszczeń mieszkalnych, charakteryzujących się dużymi, otwartymi przestrzeniami, surowymi wnętrzami z przewagą szkła, stali i kamienia, wysokimi sufitami, wielkimi oknami czy przemysłowym oświetleniem. Oczywiście w wypadku rewitalizacji poprzemysłowych obiektów zabytkowych konieczna jest akceptacja całego procesu ożywienia przez konserwatora zabytków. Aby właściwie przeprowadzić proces rewitalizacji obszaru kryzysowego, ze względu na jego złożoność i interdyscyplinarność, konieczne są szczegółowe badania, zarówno na etapie planowania i projektowania procesu, jak również w czasie jego realizacji [3]. Współpraca nauki i przemysłu ma tutaj znaczenie kluczowe, ze względu na spektrum zagadnień zawartych w procesie rewitalizacji.

Obecnie w Polsce podstawą wyznaczenie obszaru kryzysowego jest krytyczna analiza wyników badań i analiz przeprowadzonych dla potrzeb dzielnicowych mikroprogramów rewitalizacji, z uwzględnieniem poziomu: bezrobocia, ubóstwa oraz trudnych warunków mieszkaniowych, przestępczości, wykształcenia mieszkańców, przedsiębiorczości mieszkańców, degradacji technicznej infrastruktury i budynków, zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Każdy obszar jest konsultowany ze społecznością lokalną podczas przeprowadzanych przez urzędy dzielnicowe konsultacji społecznych.

2. Rewitalizacja budowlanych obiektów zabytkowych

Zabytki architektury (co wynika z Ustawy o ochronie zabytków [5]) są często wybitnym przykładem dzieła architektury i budownictwa. Dotyczy to zarówno indywidualnych budynków, jak i zespołów budynków. Za zabytki uważa się obiekty budowlane będące wyjątkowym przykładem budownictwa, rzadko spotykanym, charakterystycznym dla danej epoki (w sensie architektonicznym, technologicznym, materiałowym), mogące wpływać bezpośrednio lub pośrednio na rozwój architektury lub technologii budowlanej. Są one często dowodem tradycji kulturowej, świadkiem ważnych zdarzeń historycznych o znaczeniu lokalnym i poza lokalnym. Ta specyfika implikuje specjalne traktowanie tych obiektów, zarówno od strony prawnej (ochrona prawna zabytków) jak i w zakresie diagnostyki, badań, projektowania i realizacji inwestycji rewitalizacyjnej oraz późniejszego użytkowania zabytków zrewitalizowanych (dotyczy to również przestrzeni i obszarów znajdujących się wokół tych zabytków) [1]. Patrząc na ochronę zabytków z perspektywy zasad zrównoważonego rozwoju, można dostrzec jej kluczową rolę. Dziedzictwo kulturowe jest własnością niezbywalną, podstawową, zarówno pokoleń współczesnych jak i przyszłych, ukazującą ciągłość historyczną narodów, społeczeństw i całych cywilizacji. Jest

w nich zawarta wartość edukacyjna, kształtująca tożsamość społeczną i narodową. Często są one podstawą do określania zasad estetyki kształtowanych w poszczególnych epokach historycznych oraz kanonów ponadczasowych. Ochrona obiektów zabytkowych, zabezpieczenie prawne i techniczne, poprawa trwałości, właściwe ich użytkowanie, a także kompleksowe badania, dokumentowanie i promowanie ich historii oraz wieloaspektowej wartości (historycznej, kulturowej, estetycznej, edukacyjnej) jest podstawowym obowiązkiem, który powinien być realizowany w procesach rewitalizacyjnych. Zapewnia ona dalsze ich istnienie i trwanie dla przyszłych pokoleń. O znaczeniu tych działań świadczą liczne konwencje międzynarodowe, które są prawnymi gwarantami prawidłowego prowadzenia tych procesów, aby nie dopuścić do utraty najważniejszych obiektów dziedzictwa kulturowego na wszystkich szczeblach (światowym, regionalnym, krajowym, lokalnym). Zrewitalizowane obiekty zabytkowe stają się często źródłem rozwoju gospodarczego poprzez rozwój turystyki. Implikują konieczność rozbudowy bazy turystycznej – np. hoteli, restauracji, infrastruktury.

Opuszczone budynki zabytkowe są często przyczyną rozwoju kryzysu w obszarze je otaczającym. Nieużytkowanie starych budynków zabytkowych powoduje w sposób szybki, bezpośredni i pośredni destrukcję tych obiektów. Zwiększa to zagrożenie utraty materialnej substancji zabytkowej, ale również niebezpieczeństwo związane z zagrożeniem życia i zdrowia ludzi, którzy mogą przebywać w obrębie zagrożonego obiektu budowlanego. Użytkowanie takich zabytkowych pustostanów przez osoby nieuprawnione (dzikich lokatorów) może być jednym z najbardziej niebezpiecznych i destrukcyjnych oddziaływań. Można się w tym wypadku spodziewać następujących zagrożeń:

- degradacji, osłabienia i niszczenia ustroju nośnego budynku zabytkowego, poprzez niekontrolowany demontaż materiałów i elementów konstrukcyjnych, nadających się do powtórnego użycia (szczególnie niebezpieczne mogą być wyburzenia ścian konstrukcyjnych lub rozbiórki stropów, wpływające na zmniejszenie sztywności przestrzennej całego ustroju nośnego budynku);
- niszczenia elementów konstrukcyjnych, wykończeniowych, pokryciowych, instalacji i wyposażenia budynku, którego skutkiem może być osłabienie właściwości fizycznych, mechanicznych i wytrzymałościowych elementów konstrukcyjnych budynku (np. wzrost zawilgocenia przegród budowlanych związany z demontażem rynien i rur spustowych);
- kradzieży i niszczenia zabytkowych elementów i detali architektonicznych stanowiących o wartości zabytkowej budynku;
- niekontrolowanej ingerencji w układ architektoniczno-konstrukcyjny poprzez dodatkowe dobudowy, nadbudowy, przebudowy, niszczące oryginalny charakter zabytku i fałszujące prawdę historyczną;
- rozwoju środowiska agresywnego we wnętrzu budynku – rozwój agresji i destrukcji biologicznej, poprzez rozwój pleśni i grzybów spowodowany

brakiem ogrzewania i wentylacji pomieszczeń;
- syndromu „chorego budynku", działający na zdrowie „dzikich lokatorów";
- degradacji środowiska naturalnego, otaczającego budynek;
- niewłaściwego gospodarowania odpadami na terenie obiektu i w obszarze go otaczającym;
- tworzenia schematów negatywnych zachowań na terenie otaczającym nieużytkowany budynek (patologie społeczne);
- zwiększenia niebezpieczeństwa na drogach komunikacyjnych, znajdujących się w obszarze oddziaływania budynku;
- wyludnienia w okolicy budynku;
- zwiększenie zagrożenia pożarowego.

Powyższe zagrożenia świadczą o tym, że rewitalizacja zabytkowych budynków znajdujących się w obszarze kryzysowym ma kluczowe znaczenie dla całego procesu. Wśród działań podejmowanych w ramach rewitalizacji budynków zabytkowych, najważniejsze znaczenie, z punktu widzenia zagadnień inżynierskich, ma ich rehabilitacja, modernizacja i adaptacja.

3. Rehabilitacja, modernizacja i adaptacja budynków zabytkowych

3.1. Proces rehabilitacji

Podstawowym zadaniem inżynierskim w rewitalizacji budynku zabytkowego jest zapewnienie stanu bezpieczeństwa konstrukcji i użytkowania [2]. Oznacza to, że stan techniczny konstrukcji budynku nie będzie powodował zagrożenia bezpieczeństwa ludzi znajdujących się w tym budynku oraz w jego bezpośrednim otoczeniu. W żadnym elemencie konstrukcyjnym oraz w całym ustroju nośnym, zbudowanym z tych elementów, nie mogą być przekroczone stany graniczne nośności. W czasie użytkowania budynku nie może również być zagrożone zniszczeniem jego wyposażenie lub przechowywane w nim mienie. Jednocześnie powinien być zapewniony stan przydatności do właściwego użytkowania, co oznacza, że nie powinny występować lokalne uszkodzenia, nadmierne zarysowania, odkształcenia, przemieszczenia lub drgania. Wymagania, w odniesieniu do budynków zabytkowych, znajdujących się w obszarze kryzysowym, podlegającym rewitalizacji, są często trudne do spełnienia. Przyczyną tego jest duży stopień destrukcji konstrukcji (układów i elementów konstrukcyjnych, materiałów). Ochrona konserwatorska nakazuje jednak podejmowanie działań rehabilitacyjnych konstrukcji budynku, będących podstawą jakichkolwiek dalszych działań rewitalizacyjnych. W przypadku budynków, w których stopień destrukcji konstrukcji jest zaawansowany w takim stopniu, że przekroczony jest stan bezpieczeństwa konstrukcji, wszelkie prace należy rozpocząć od inżynierskich działań ratunkowych – zabezpieczeń, konserwacji, wzmocnień, które są podstawą i początkiem procesu rehabilitacji (Rys.2). Re-

habilitacja konstrukcji budynku zabytkowego oznacza wszystkie działania inżynierskie, mające na celu przywrócenie możliwości pełnienia właściwej funkcji i prawidłowej pracy (np. przywrócenie właściwej nośności, sztywności itp.) całego ustroju nośnego budynku oraz elementów, które go tworzą.



Rys.2. Usztywnienie ściany pozbawionej stropów przyporami (Manuaktura w Łodzi)

Fig.2. Walls devoid of ceiling braced with buttresses (Manufaktura in Łódź)

Szczególnie ważne są tutaj następujące zagadnienia:

- zapewnienie sztywności przestrzennej całego budynku oraz sztywności poszczególnych elementów konstrukcyjnych tworzących ustrój nośny;
- zabezpieczenie stanu istniejącego (jest to działanie szczególnie istotne w przypadku zabytkowych budynków i innych obiektów budowlanych znajdujących się w stanie stałej ruiny - zamków, pałaców, świątyń, fortyfikacji itp.); działania te są często wymuszone przez zagrożenie bezpieczeństwa konstrukcji i użytkowania, są podstawowe i konieczne do podjęcia, aby wykonać działania pozostałe;
- wzmocnienie i naprawa wszystkich elementów konstrukcyjnych, których nośność jest zbyt mała, ze względu na uszkodzenia, zmianę układów statycznych lub obciążeń na nie działających;
- naprawa uszkodzeń, rys, pęknięć, destrukcji;

- reprofilacja murów;
- osuszenie zawilgoconych elementów konstrukcyjnych;
- naprawa izolacji przeciwwilgociowej i przeciwwodnej;
- wymiana uszkodzonych lub zużytych elementów i układów konstrukcyjnych;
- zahamowanie postępującej destrukcji konstrukcji budynku; w tym obszarze mieszczą się również wszystkie działania konserwatorskie mające na celu zabezpieczenie i utrwalenie struktury zabytku, zahamowanie procesów jego destrukcji oraz dokumentowanie tych działań.

Rehabilitacja budynku zabytkowego odnosi się również do rehabilitacji jego formy, w tym wszystkich detali i elementów architektonicznych, nadających często wartość estetyczną zabytku, a także przywrócenie właściwego, oryginalnego układu architektonicznego, cechującego daną epokę, poprzez usunięcie nawarstwień historycznych, powstałych w czasach późniejszych. Istotnym elementem rehabilitacji budynku jest również rehabilitacja instalacji i wyposażenia, która w wypadku budynków zabytkowych najczęściej sprowadza się do ich modernizacji, z zachowaniem elementów oryginalnych, mających wartość historyczną, estetyczna i zabytkową.

Wszystkie działania rehabilitacyjne dotyczące zabytków powinny być poprzedzone interdyscyplinarnymi badaniami (w tym konserwatorskimi, a jeżeli jest taka potrzeba również archeologicznymi). Diagnozowanie budynków zabytkowych, będące podstawą działań rewitalizacyjnych jest działaniem złożonym, trudnym i indywidualnym, odnoszącym się zawsze do konkretnego obiektu, zależnym od wielu czynników oddziaływujących na ten obiekt współcześnie jak również w ciągu jego historii – zarówno w okresie jego projektowania, jak i realizacji i użytkowania. Prace rehabilitacyjne, w tym przede wszystkim wszystkie działania konserwatorskie, powinny być prowadzone zgodnie ze sztuką konserwacji i międzynarodowymi ustaleniami. Te najważniejsze zawarte zostały w tzw. kartach, wśród których do najważniejszych można zaliczyć Kartę Ateńską z 1931 roku oraz Kartę Wenecką z roku 1964. Karty te wprowadzają szereg szczegółowych uregulowań procesu konserwatorskiego, wśród których do najważniejszych należą: unikanie rekonstrukcji, aby zachować autentyczność zabytków; dopuszczenie rekonstrukcji w sytuacjach wyjątkowych, gdzie poprzez szczegółowe i rzetelne badania wyeliminowana jest kreatywność współczesnego projektanta (zachowana jest autentyczna forma, układ architektoniczno-konstrukcyjny, oryginalne technologie wykonania i materiały); metodą takiej rekonstrukcji powinna być anastyloza, czyli ponowne zmontowanie zrujnowanej budowli, jej części lub odbudowa przy użyciu zachowanych oryginalnych fragmentów; zachowanie nawarstwień stylowych budynku, ukazujących rozwój jego formy na przestrzeni historii; stosowanie nowoczesnych materiałów i osiągnięć techniki w taki sposób, by nie były one widoczne i nie naruszały wyglądu oraz oryginalnego charakteru obiektu budowlanego; nowe materiały

powinny być, w miarę możliwości, odróżnione od oryginalnych; dobudowy mogą być dopuszczalne tylko wtedy, gdy swoją formą i rozwiązaniami technologiczno-materiałowymi nie ingerują zbytnio w zabytek dominując go, nie zaburzają równowagi kompozycji i związków ze środowiskiem oraz przestrzenią otaczającą. Wszystkie działania rehabilitacyjne muszą bezwzględnie uwzględniać program konserwatorski, zatwierdzony przez konserwatora zabytków.

3.2. Modernizacja

Modernizacja budynku zabytkowego jest zespołem działań, których celem jest ulepszenie, unowocześnienie, uwspółcześnienie obiektu budowlanego. Przez te działania zwiększa się jego wartość użytkowa - walory funkcjonalne, estetyczne, komfort użytkowania. Również modernizacja budynku zabytkowego, jego części, instalacji lub wyposażenia może być wykonana tylko wówczas, gdy uzyska aprobatę konserwatora zabytków. Typowym przykładem modernizacji jest termomodernizacja, która zakłada poprawienie efektywności energetycznej budynku, która w budynkach zabytkowych często nie może być wykonana w sposób klasyczny (ocieplenie od zewnątrz). Modernizacja instalacji i wyposażenie budynku zabytkowego w nowoczesne, efektywne energetycznie urządzenia skutkuje zazwyczaj dużą ingerencją w istniejącą strukturę budynku. Wykonywanie nowych otworów w przegrodach budowlanych (zarówno stropach jak i ścianach) wymusza konieczność szczegółowej analizy konkretnych przypadków i wykonania wzmocnień lub zastosowania nowych rozwiązań technicznych. Należy przy tym zaznaczyć, że ograniczenie emisji gazów cieplarnianych oraz uwzględnienie w procesie rewitalizacji środowiska naturalnego powinno implikować stosowanie innowacyjnych, energooszczędnych rozwiązań materiałowych i technologicznych

3.3. Adaptacja i zdolność adaptacyjna budynku zabytkowego

Każdy budynek zabytkowy powinien być zaadoptowany do współczesnych wymagań użytkowych. Jak zaznaczone zostało w rozdziale pierwszym, związane jest to często z wprowadzeniem nowej funkcji, która została wykreowana w procesie rewitalizacji obszaru kryzysowego. Z nowej funkcji wynika często nowe założenie funkcjonalno – użytkowe, które również musi uzyskać akceptację konserwatora zabytków. Adaptacja do nowych wymagań użytkowych, zakłada również dostosowanie komfortu użytkowania do współczesnych oczekiwań. Wyjątkowo ważne jest zaadaptowanie budynku do potrzeb osób niepełnosprawnych (Rys.3). Można tutaj zauważyć, że różne budynki, a właściwie różne układy architektoniczno-konstrukcyjne, ustroje nośne, poszczególne elementy konstrukcyjne mają różną wrażliwość na zmiany i adaptację. Możemy ją określić mianem zdolności adaptacyjnej.



Rys.3. Miejsca postojowe dla osób niepełnosprawnych w garażu podziemnym wykonanym przy rewitalizacji Hotelu Saskiego

Fig.3. The disabled parking in the garage made during revitalization of the Saski Hotel

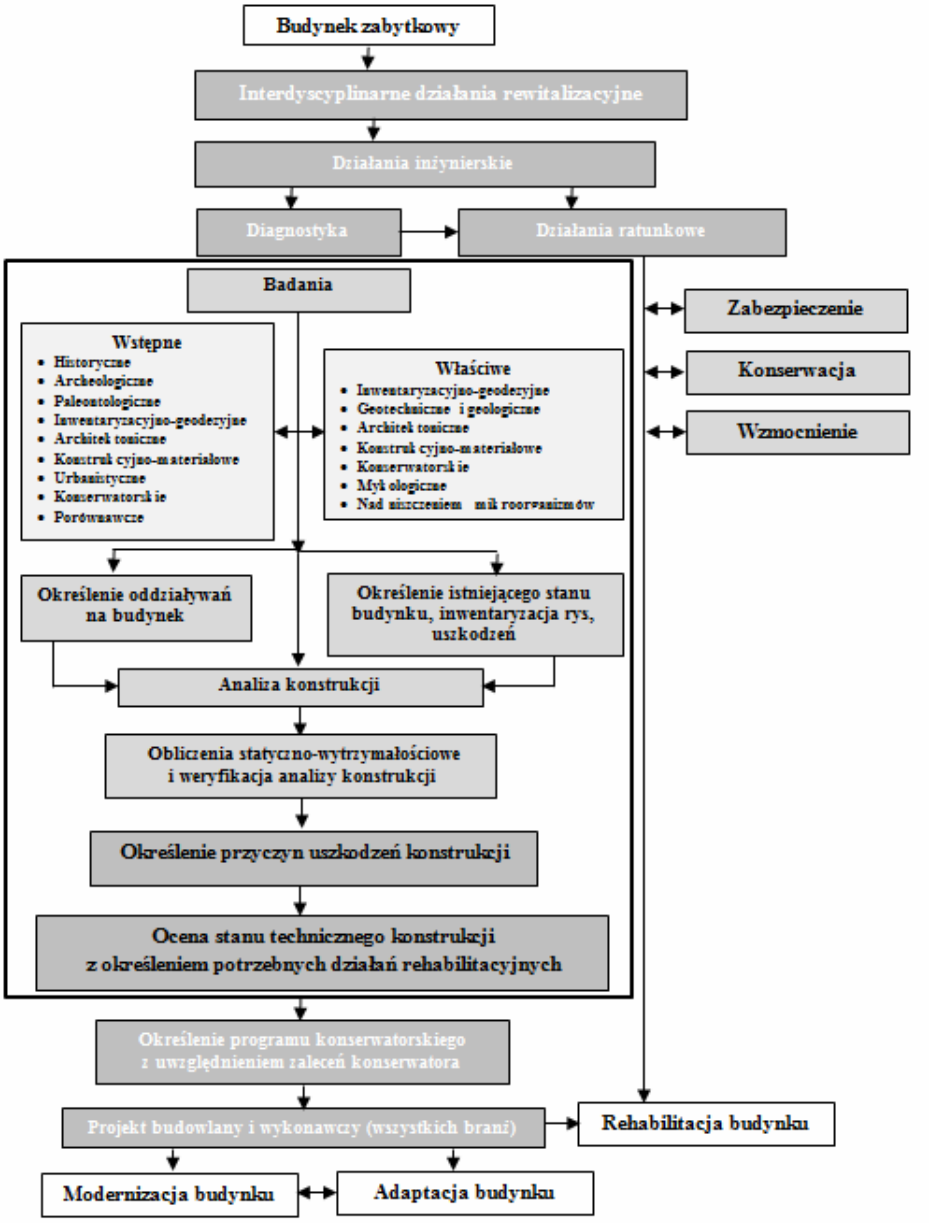
Zdolność adaptacyjna budynku (układu architektoniczno-konstrukcyjnego, ustroju nośnego, elementu konstrukcyjnego) jest to zespół cech i właściwości określających łatwość jego adaptacji do nowych warunków konstrukcyjnych (pracy w nowych układach konstrukcyjnych, implikujących nowe schematy statyczne, możliwości ich zmian, napraw, wymian, możliwości zmian obciążeń itp.) lub użytkowych [4]. Wartość zdolności adaptacyjnej może być określona po przeanalizowaniu wielu cech i właściwości, np.: materiałów – rodzajów, ich właściwości fizycznych, mechanicznych, wytrzymałościowych; technologii wykonania, współczesnej stosowalności, możliwości produkcji, właściwości geometrycznych, jakości, trwałości, łatwości wykonania przeróbek, napraw itp. Analizie zdolności adaptacyjnej powinien być poddany cały budynek, zwłaszcza jego ustrój konstrukcyjny (np. ustroje szkieletowe posiadają dużo większą zdolność adaptacyjną niż ustroje ścianowe) oraz wszystkie istotne elementy i układy konstrukcyjne: fundamenty, stropy, ściany, słupy, belki, konstrukcja dachu lub przekrycia.

Działania modernizacyjne i adaptacyjne zazwyczaj wymuszają ingerencję w układ architektoniczny i konstrukcyjny budynku. Mogą to być nowe otwory w przegrodach budowlanych – ścianach, stropach, bruzdy, wnęki, poszerzenia istniejących otworów, zmiana aranżacji pomieszczeń w postaci nowego układu ścianek działowych, mogącego powodować inne obciążenia na stropy, W skrajnym przypadku może być to nawet całkowita zmiana układu nośnego budynku (Rys.4).



Rys.4. Zamieniony ustrój nośny ścianowy na ustrój szkieletowy (Hotel Saki w Warszawie)
Fig.4. Replacement of load bearing wall with frame structure (Saki Hotel in Warsaw)

Wszystkie działania inżynierskie w procesie rewitalizacji, dotyczące budynku (przede wszystkim jego konstrukcji), powinny być powiązane z właściwą diagnostyką stanu technicznego budynku zabytkowego, opartą na szczegółowych, rzetelnych badaniach. Powinny być one dokładnie zaplanowane i wykonane w sposób skoordynowany (uwzględniający istotną rolę konserwatora zabytków). Koordynacja powinna dotyczyć zarówno powiązań między ważnymi działaniami rehabilitacyjnymi, adaptacyjnymi, modernizacyjnymi, jak i pozostałymi działaniami rewitalizacyjnymi. Szczególne miejsce mają tutaj roboty konserwatorskie, dotyczące zarówno struktury budynku, jak również jego formy. Konserwacja sztuki w wypadku budynków zabytkowych jest konieczna w odniesieniu do zabytkowych detali i elementów architektonicznych, elewacji, ozdobnych wypraw i elementów wykończeniowych. Stwarza to na budowie sytuację, w której wiele ekip wykonawczych, reprezentujących różne branże, znajduje się jednocześnie w budynku i wykonuje swoje roboty. Niewłaściwa koordynacja tych prac może doprowadzić do sytuacji niebezpiecznych, w ostateczności nawet do katastrofy budowlanej. Schemat wzajemnych powiązań działań inżynierskich w procesie rewitalizacji budynku zabytkowego przedstawiony został na Rys. 5.



Rys.5. Schemat działań inżynierskich w procesie rewitalizacji budynku zabytkowego

Fig.5. The scheme of engineering activities in the historic building revitalization process

4. Podsumowanie

W rewitalizacji obszarów kryzysowych szczególne miejsce ma rewitalizacja budynków zabytkowych. Wynika to z roli społecznej, edukacyjnej, historycznej zabytku, będącego częścią dziedzictwa kulturowego, o znaczeniu lokalnym, krajowym, regionalnym lub globalnym. Rewitalizacja zabytku może przyczynić się do rozwoju gospodarczego, zwłaszcza w zakresie turystyki, społecznego, edukacyjnego, pobudzenie przedsiębiorczości. Kluczowymi działaniami inżynierskimi w procesie rewitalizacji budynków zabytkowych jest rehabilitacja, modernizacja i adaptacja całego budynku i elementów go tworzących. Są to działania różniące się od siebie, uzupełniające się jednak i wynikające z siebie nawzajem. Mają one bardzo złożony charakter i powinny być odpowiednio zaplanowane i koordynowane w czasie realizacji. Powinny być realizowane zgodnie z programem konserwatorskim, uzgodnionym i zatwierdzonym przez konserwatora zabytków.

Literatura

[1] Rozporządzenie Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego z dnia 27 lipca 2011 r. w sprawie prowadzenia prac konserwatorskich, prac restauratorskich, robót budowlanych, badań konserwatorskich, badań architektonicznych i innych działań przy zabytku wpisanym do rejestru zabytków oraz badań archeologicznych, Dz. U. 2011, nr 165.

[2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002r w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz. U. 2002r., Nr 75 z późniejszymi zmianami.

[3] Terlikowski W.: Rola badań w procesie rewitalizacji budynków zabytkowych, Miesięcznik „Materiały Budowlane" 8'2013 (nr 493), Warszawa 2013.

[4] Terlikowski W.: Zdolność rewitalizacyjna budynków użyteczności publicznej, Miesięcznik „Materiały Budowlane" 5'2013 (nr 490), Warszawa 2013.

[5] Ustawa z dnia 23 lipca 2003 r. o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami, Dz.U. 2003, Nr 162, poz. 1568 z późniejszymi zmianami.

THE REHABILITATION, MODERNIZATION AND ADAPTATION OF HISTORIC BUILDINGS IMPORTANCE IN THE REVITALIZATION PROCESS

S u m m a r y

The aim of this article is to show the role of the rehabilitation, modernization and adaptation, the main engineering activities, in the historic buildings revitalization process. Basing on author's experience in the field of engineering and science, the analysis of this process is made, including the problems, risks, and defining each activities. These activities are different from each other, but complementary , and the resulting each other. They have very complex nature and should be properly planned and coordinated during realization. They should be imple-

mented in accordance with the conservation program, which ought to be agreed and approved by the conservator. The historic building rehabilitation refers to the design, architectural form, including all details and architectural elements that give the aesthetic value of the monument, plant and equipment. The historic building modernization increases its use value, such as functional, aesthetic and comfort values. All rehabilitation, renovation and adaptive works, preceded by research and diagnostic should be carried out in a properly planned and coordinated manner including the important role of the conservator. Each historic building should be adapted to the modern utility requirements. Adaptive capacity of building, architecture and structural system, load bearing structure or structural element is a set of features and characteristics determining the possibility of adaptation to the new construction conditions (such as work in new structural systems, implying a new static schemes, the possibility of changes, repairs, replacements, the possibility of changes in loads etc.), or utility. The value of adaptive capacity can be determined by examining the many features and properties. The article presents a revitalization activities relation scheme.

Keywords: monuments conservation, adaptability, the sustainable development principles

Przesłano do redakcji: 23.03.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.81

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 533-544

Wojciech TERLIKOWSKI[1]
Kacper WASILEWSKI[2]

EKSPOZYCJA ZABYTKOWYCH OBIEKTÓW ARCHITEKTURY ANTYCZNEJ NA PODSTAWIE WŁASNYCH PRZYKŁADÓW

Celem artykułu jest analiza sposobów ekspozycji antycznych zabytkowych obiektów architektonicznych oraz odpowiadających im zabiegów konserwatorskich i restauratorskich. Na podstawie międzynarodowych traktatów, badań własnych oraz własnego doświadczenia w pracach konserwatorskich na wykopaliskach archeologicznych, autorzy dokonują opisu różnych sposobów prezentowania elementów dziedzictwa kulturowego jakim są antyczne zabytki. Wprowadzony zostaje podział antycznych obiektów ze względu na stan zachowania konstrukcji do czasów dzisiejszych, uwzględniający zarówno obiekty, które przetrwały w bardzo dobrej kondycji technicznej jak i obiekty, które nie przetrwały do dziś w formie innej niż opisy lub wizerunki oraz inne stany pośrednie. Przedstawione sposoby ekspozycji obiektów architektonicznych obejmują parki archeologiczne oraz inne formy prezentacji, między innymi rekonstrukcje rzeczywiste i rekonstrukcje wirtualne. Analiza działań konserwatorskich przedstawia działania charakterystyczne dla różnych stopni zachowania obiektów oraz różnych sposobów ich planowanej prezentacji. Została zobrazowana przykładami z doświadczenia autorów z wykopalisk prowadzonych na terenie Europy i Azji. W artykule zwrócono szczególną uwagę na potrzebę interdyscyplinarnych badań obejmujących nie tylko konserwowany obiekt, ale i jego otoczenie oraz podobne obiekty o zbliżonej technologii i technice wykonania. Takie badania są niezbędne w celu zachowania odpowiedniego poziomu autentyczności i wiarygodności historycznej podczas prac konserwatorskich i restauratorskich. Wskazano także wpływ jaki ma poprawnie przeprowadzona konserwacja i odpowiednio przygotowana ekspozycja zabytkowych obiektów architektonicznych na rozwój gospodarki lokalnej oraz na realizację zasad zrównoważonego rozwoju.

Słowa kluczowe: parki archeologiczne, trwała ruina, międzynarodowe traktaty o zachowaniu dziedzictwa kulturowego, zasady zrównoważonego rozwoju

[1] Autor do korespondencji: dr inż., Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej, w.terlikowski@il.pw.edu.pl
[2] mgr inż., Politechnika Warszawska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Inżynierii Budowlanej, k.wasilewski@il.pw.edu.pl

1. Wstęp

Międzynarodowa Karta Ochrony i Zarządzania Dziedzictwem Archeologicznym (Karta Lozańska) wskazuje na istotne znaczenie prezentacji dziedzictwa archeologicznego, czyli także zabytków architektury antycznej, w zrozumieniu genezy i rozwoju współczesnych społeczeństw oraz podkreśla duży wpływ ekspozycji zabytków na świadomość o potrzebie ochrony tego dziedzictwa [1]. W 1992 r. sporządzona została Europejska konwencja o ochronie dziedzictwa archeologicznego [2]. Przypomina ona, że dziedzictwo archeologiczne ma zasadnicze znaczenie dla wiedzy o historii ludzkości. Ochrona jego, a także rzetelne badania są zadaniem wszystkich, którzy odpowiadają za prawdę naukową. Żyjący współcześnie mają ten obowiązek do spełnienia wobec przyszłych pokoleń. Jest to ściśle związane z szerszym aspektem spraw społecznych, gospodarczych, edukacyjnych, wynikających z powszechnie uznawanych zasad zrównoważonego rozwoju. Ostanie dekady potwierdziły, że europejskie dziedzictwo archeologiczne, stanowiące dowód najstarszej historii, dotyczące często wymarłych cywilizacji, jest poważnie zagrożone zniszczeniem. W myśl konwencji [2] przedmiotem dziedzictwa archeologicznego są wszelkie pozostałości, obiekty i jakiekolwiek inne ślady ludzkości z minionych epok, których zachowanie i analiza pomogą prześledzić historię ludzkości i jej stosunek do środowiska naturalnego. Są to również obiekty, dla których wykopaliska i odkrycia oraz inne metody badań nad dziejami ludzkości i jej środowiskiem są podstawowym źródłem informacji. Wśród najistotniejszych śladów dawnych epok i cywilizacji są zabytki architektury i budownictwa, świadczące o rozwoju technologicznym ich autorów, poziomie życia mieszkańców, kanonach estetycznych, które obowiązywały w minionych epokach. Dziedzictwo archeologiczne obejmuje struktury, konstrukcje, zespoły budowlane, a także ich otoczenie, układy urbanistyczne. Ze względu na ciągłość sztuki budowlanej wiedza o budownictwie, układach architektoniczno-konstrukcyjnych, formach, stosowanych technologiach, rozwiązaniach materiałowych i technicznych może również duże znaczenie dla współczesności. Na mocy konwencji [2] jej sygnatariusze zostali zobowiązani do utworzenia systemu prawnego do ochrony dziedzictwa archeologicznego, a w szczególności do utworzenie archeologicznych rezerwatów – parków, w których należy eksponować uratowane dla przyszłych pokoleń zabytki architektury i budownictwa, nawet jeżeli pozostają po nich tylko niewielkie ślady. Będą one również możliwością pozostawioną przyszłym pokoleniom, jako źródło analiz. Aby zachować dziedzictwo archeologiczne, będące częścią dziedzictwa kulturowego, a także rzetelność badań obiektów i obszarów je tworzących, konwencja [2] nakazuje stosowanie następujących zasad: zapewnienie odpowiedniej kontroli i nadzoru nad wykopaliskami i pracami archeologicznymi oraz konserwatorskimi; stosowanie metod badawczych nieniszczących i nie fałszujących historycznej oryginalność (szczególnie ważne jest to zalecenie do stosowania w pracach konserwatorskich, zabezpieczających, wzmacniających, poprawiających trwałość konstrukcji budowlanych); odpowiednie zabezpieczenie po zbadaniu wszystkich odkrytych artefaktów

(w skrajnym przypadku, gdy jest to nie możliwe z różnych przyczyn, zaleca się ponowne ich zasypanie, aby umożliwić badania w przyszłości); właściwą konserwację wszystkich obiektów archeologicznych, a szczególnie architektury i budownictwa, które najczęściej pozostają w stanie trwałej ruiny i są narażone na różne oddziaływania destrukcyjne. Należy tu zaznaczyć, że najlepszym rozwiązaniem dla wszystkich zabytków archeologicznych, a szczególnie dla obiektów architektoniczno-budowlanych, jest właściwa ich konserwacja i pozostawienie na miejscu. Ekspozycja „in situ", z właściwym kontekstem obszarowym, historycznym, geograficznym ukazuje pełną prawdę o obiekcie zabytkowym i jest o wiele pełniejsza formą edukacji i promocji zabytków. Wszystkie te zalecenia implikują konieczność wielu interdyscyplinarnych działań, w tym inżynierskich, do których można zaliczyć właściwą analizę, a często również konieczne zmiany, planów zagospodarowania przestrzennego obszarów, na których znajdują się lub mogą się znajdować archeologiczne obiekty zabytkowe architektury i budownictwa oraz doskonalenie i realizowanie właściwej metodologii w pracach konserwatorskich, budowlano-inżynierskich i technicznych przy tych zabytkach.

1.1. Stan zachowania zabytków architektury antycznej

Jedną z największych trudności związanych z zabezpieczeniem i konserwacją antycznych obiektów architektonicznych jest zły stan techniczny, w jakim zachowały się do czasów współczesnych. Wynika to bezpośrednio z czasu jaki upłynął od momentu ich powstania i użytkowania do dziś. Przez ok. 20 wieków, jakie dzielą nas od starożytności, konstrukcje te były poddane działaniom zarówno środowiskowym, takim jak deszcze, niskie temperatury czy trzęsienia ziemi i powodzie, jak i działalności człowieka, która mogła mieć zarówno pozytywny wpływ na utrzymanie stanu technicznego – np. remonty, adaptacje, jak i destrukcyjny – np. wyburzenia czy działania wojenne. Istotną cechą, która sprawia, że część obiektów budowlanych przetrwała długi okres czasu w dobrym stanie technicznych jest trwałość materiałów, elementów, układów i ustrojów konstrukcyjnych. Trwałość obiektów budowlanych zależy od wielu czynników – od rodzajów i jakości materiałów, z których zostały one wykonane, przyjętych technologii budowlanych i rozwiązań technicznych, układów konstrukcyjnych, ekspozycji w terenie, kwalifikacji budowniczych i wynikających z tego jakości zrealizowanych robót budowlanych, odporności na zmiany środowiskowe zachodzące na przestrzeni historii (np. podniesienie lub obniżenie poziomu wód gruntowych, zmiany klimatyczne), odporność na zmiany cywilizacyjne (np. powstanie autostrad w bezpośredniej bliskości zabytków, powodujących drgania). Bardzo dobrym przykładem różnej trwałości konstrukcji budowlanych wykonanych w starożytności w rożnych technologiach są bazyliki wczesnochrześcijańskie w Palmyrze (Syria) [3]. Konstrukcja bazylik jest murowana z kamienia wapiennego, lecz wykonana w dwóch technologiach rzymskich – tzw. „opus palmyrenum" – ściana warstwowa i „opus quadratum"- z ciosów kamiennych. „Opus palmyrenum" był murem warstwowym, tworzonym z prostopadłościennych, płaskich płyt kamiennych. Mają one zbliżony ciężar do ciosów kamiennych, jednak ze względu

na mniejszą grubość, mają większą powierzchnię boczną. Powierzchnie boczne nadawały się więc bardzo dobrze na elewacje ścian. Elementy te montowane były w murze równolegle, parami, tworząc wewnętrzną i zewnętrzną powierzchnię ściany. Stanowiły one właściwą konstrukcję nośną ściany, przenoszącą obciążenia pionowe. Kolejną oszczędnością w tej technologii, było wypełnienie przestrzeni między płytami gruzem, wymieszanym z zaprawą wapienną, którą wypełnione były również spoiny między płytami. Elementem usztywniającym mur w płaszczyznach poziomych były oczepy, wykonane z płaskich, prostopadłościennych płyt (sięgaczy), szerokości muru. Mury z klasycznych ciosów kamiennych okazały się trwalsze, jednak w Palmyrze nie zachowały się również w całości. Wynika to z tego, że bloki kamienne, posiadające trwałą strukturę, tworzące mury ciosowe mogły być łatwo rozebrane, a elementy je tworzące powtórnie użyte w innych budynkach lub budowlach. Chociaż mur wykonany w technologii „opus palmyrenum" był bardziej ekonomiczny dla inwestorów i budowniczych, okazał się murem relatywnie nietrwałym [3].

Ze względu na stan techniczny, antyczne zabytki architektury można podzielić na kilka grup. Pierwszą, spotykaną niezwykle rzadko, stanowią zabytki niewymagającej (bądź wymagające w bardzo ograniczonym zakresie) interwencji konserwatorskiej. Tego typu obiekty charakteryzują się brakiem istotnych ubytków w elementach konstrukcyjnych oraz brakiem zniszczeń w strukturze materiału, z którego zostały wykonane. Tak dobry stan zachowania konstrukcji wymagał szczególnych warunków zarówno środowiskowych – łagodny, z punktu widzenia



Rys. 1. Opus palmyrenum

Fig. 1. Opus palmyrenum

konstrukcji klimat, jak i odpowiedniego materiału – w zasadzie jedynymi konstrukcjami, które w odpowiednich warunkach mogły przetrwać do czasów dzisiejszych bez zniszczeń w strukturze materiału, są konstrukcje kamienne. W celu przygotowania tego typu obiektów do ekspozycji wymagane są jedynie prace adaptacyjne, takiej jak przygotowanie tablic informacyjnych czy opracowanie tras zwiedzania. Obiekty takie są zazwyczaj współcześnie użytkowane lub eksponowane, a ich stan techniczny jest stale kontrolowany i w razie konieczności poddawane są bieżącej konserwacji. Przykładem tego typu konstrukcji są piramidy w Gizie.

Drugą grupę stanowią obiekty budowlane o zachowanej strukturze, która jednak nie spełnia wymagań bezpieczeństwa konstrukcji i użytkowania [4]. Obiekty takie nie mogą zostać udostępnione do zwiedzania bez odpowiednich działań konserwatorskich i zabezpieczających konstrukcję. Istotnym zagadnieniem jest tutaj ograniczenie lub zatrzymanie destrukcji strukturalnej obiektu zabytkowego. Tego typu obiekty wymagają zazwyczaj ingerencji w strukturę istniejącą, poprzez działania inżynierskie naprawcze, wzmacniające i poprawiające trwałość obiektu. Oryginalna bryła takiego obiektu jest zachowana, co w znacznym stopniu umożliwia zachowanie autentycznego kształtu i charakteru obiektu (np. świątynia Hatszepsut w Egipcie, Koloseum w Rzymie).

Kolejną grupą są obiekty, które przetrwały do czasów dzisiejszych jedynie w formie ruiny. Na podstawie analizy pozostałości oraz innych źródeł możliwe jest odtworzenie oryginalnej bryły zabytku oraz ustalenie jego charakteru i funkcji. Ustroje konstrukcyjne takich obiektów zabytkowych i elementy je tworzące przetrwały najczęściej jedynie we fragmentarycznej formie albo uległy całkowitemu zniszczeniu. Ich odtworzenie wymaga szczegółowych badań i analiz. Istotnym elementem takich badań powinna być analiza technologii i techniki wznoszenia oryginalnych konstrukcji oraz materiałów z których zostały wykonane. Umożliwi to zachowanie wiarygodności historycznej oraz autentyczności konstrukcji w dalszych pracach konserwatorsko-inżynierskich. Bardzo często struktura materiału, z którego wykonano badane konstrukcje ulega zniszczeniu - dezintegracji granularnej, a jej wzmocnienie stanowi istotny problem konstrukcyjno-konserwatorski.

Ostatnią, czwartą, grupę stanowią obiekty, które nie przetrwały do czasów dzisiejszych. Informacje na ich temat można czerpać z ewentualnych pozostałych fragmentów detali architektonicznych oraz badań porównawczych, ikonograficznych, historycznych (z opisów i wizerunków zawartych w literaturze, na obrazach, rzeźbach czy monetach.[5]). Dzięki analizie materiałów źródłowych, uwzględniając badania dotyczące technologi i techniki wykonywania konkretnych obiektów, możliwe jest wykonanie rekonstrukcji takich zabytków. Istną kwestią, przy tego typu zabiegach, jest zachowanie wiarygodności i autentyczności konstrukcji, w związku z tym badania muszą być szczegółowe i obejmować wszystki możliwe źródła.

1.2. Sposoby prezentacji antycznych obiektów architektury

Podstawowym kryterium podziału sposobów ekspozycji zabytkowych obiektów architektury, jaki można wprowadzić, jest podział z uwagi na lokalizację obiektu względem orignalnego położenia. Obiekty znajdujące się w sowojej autentycznej lokazlizacji najczęściej prezentowane są w formie parków archologicznych, gdzie mogą znajdować się obiekty zarówno w stanie trwałej ruiny, jak i w formie zrekonstruaowanej. W przypadku prowadzania prac restauratorskich istotne jest przeprowadznie ich w sposób zgodny z przepisami przyjętymi w traktatach międzynarodowych (Karta Ateńska, Karta Wenecka) [6], a w szczególności w taki sospób aby wszystkie rekonstruowane fragmenty były możliwe do odróżnienia od fragmentów oryginalnych stanowiących świadectwo archeologiczne. Szczgólnie wartościową formą prezentacji obiektów architektonicznych jest zachowanie ich w stanie trwałej ruiny w miejscu, w którym zachowały się do czasów współczesnych, w całym kontekście otoczenia, ekspozycji, warunków naturalnych i geograficznych. Ekspozycja tych zabytków w połączeniu z wizualizacją, rekonstrukcją wirtualną mogącą odzwierciedlać fazy rozwoju budynku i otoczenia, a także fazy destrukcji jest szczególnie ważna i posiada wielkie walory edukacyjne. Może to być zrealizowane na przykład na tablicach informacyjnych, znajdujących się w pobliżu zabytku. Umożliwa to ukazanie obiektu w pierwotnej formie bez naruszania stanowiska archeologiczengo. Parki archologiczne mogą stanowić zarówno samodziele obiekty, zlokalizowane w miastach lub poza, jak i mogą być wpisane w tkankę miejską. Najcześciej parki pierwszego typu obejmują swoim obszarem konkretny kompleks, w którego skład wchodzą obiekty architektoniczne o różnym charakterze.Przykładem tego typu obiektu jest park archologiczny na terenie Chersonezu Taurydzkiego w Sewastopolu (Rys. 2). Parki wpisane w zabudowę miejską często prezentują jeden lub kilka obiektów pierwotnie zlokalizowanych w obrębach dzisiejszego miasta, które ze względu na duże znaczenie historyczne lub estetyczne zostały zachowane i przygotowane do ekspozycji tej formie. Istotnym zagadnieniem inżynierskim, w przypadku takiej formy prezentacji, jest połączenie substancji zabytkowej z formami współczesnymi, np. bazylikami, kościołami. Przykładem integracji współczesnej zabudowy z obiektem będącym świadectwem archeologicznym jest nowożytna bazylika zbudowana przy Grocie Zwiastowania w Nazarecie (Rys. 3).

Rekonstrukcje zabytków architektury antycznej w lokalizacjach innych niż pierwotne powinny być wykonane w oparciu o odpowiednie badania oraz opatrzone informacją o ich oryginalnej lokalizacji. Często spotykaną praktyką są rekonstrukcje wykonywana na potrzeby muzealne.

Odzielną formą prezentacji, głównie objemującą fragmenty konstrukcji i detali architektonicznych zabytków antycznych są ekspozycje muzealne. W takich przypadkach także istonte jest wskazanie miejsca pochodzenia fragmentu. Dużą wartość edukacyjną mają rekonstrukcje, na przykład w formie rysunkowej, ukazujące orginalne umiejscowienie detali w prawdopodobnej bryle całego budynku. Usytuowanie fragmentu konstrukcji bez kontekstu całego budynku lub budowli, może całkowicie wypaczyć obraz ekspozycji.



Rys. 2. Chersonez Taurydzki - rezerwat archeologiczny

Fig. 2. Chersoneses – archaeological park



Rys. 3. Współczesna bazylika wybudowana w miejscu wykopalisk, przy Grocie Zwiastowania w Nazarecie

Fig. 3. Modern basilica built in the excavation site, the Grotto of the Annunciation in Nazareth

2. Zabezpieczenie obiektów architektonicznych - zagadnienia ogólne

W zależności od planowanego sposobu ekspozycji, konserwacja i zabezpieczenie antycznych obiektów architektonicznych charakteryzują się różnymi trudnościami. Wspólnym problemem, jaki z reguły pojawia się w przypadku pracy z obiektami antycznymi, jest brak dokładnych danych dotyczących obiektów, ich funkcji i kształtu. Dodatkowo, w związku ze znacznym wiekiem konstrukcji, zachowały się one często fragmentarycznie i charakteryzują się znacznym stopniem zniszczenia. Tego typu trudności wymuszają przeprowadzenie odpowiednich badań historycznych, włączając w to badania ikonograficzne i porównawcze, w celu dobrania odpowiednich technik i technologii konserwatorskich. Szczególną trudnością, która wynika z często ograniczonych źródeł informacji o obiekcie, jest zachowanie prawdy historycznej i autentyczności konstrukcji.

Zabezpieczenia konstrukcji architektonicznych można podzielić na zabezpieczenia mające na celu wzmocnienie bądź odbudowę konstrukcji nośnej obiektu oraz na działania związane z poprawą trwałości obiektu – na przykład poprawą odporności na oddziaływania atmosferyczne. Zapewnienie bezpieczeństwa konstrukcji oraz ewentualnie możliwość jej użytkowania związana jest z formą późniejszej ekspozycji i stanowi istotne wyzwanie inżynierskie.

Charakterystycznym dla obiektów architektury antycznej jest zabezpieczanie ich w stanie trwałej ruiny, w którym przetrwały do czasów dzisiejszych. Zagadnienie to jest szczególnie istotne w przypadku konstrukcji odsłoniętych w ramach wykopalisk archeologicznych. Tego typu zabytki bardzo często nie spełniają wymogów bezpieczeństwa konstrukcji i wymagają gruntownego wzmocnienia oraz zabezpieczenia przed destrukcyjnymi czynnikami środowiskowymi, na które nie były narażone wcześniej ponieważ znajdowały się pod ziemią. W przypadku konstrukcji murowych częstym zabiegiem jest konsolidacja i reprofilacja. Jeden ze sposobów jej przeprowadzania polega na wzmocnieniu wewnętrznej struktury muru przez iniekcje zaprawą naprawczą, a następnie przemurowanie górnej warstwy muru. Tego typu zabieg zapewnia wewnętrzną spójność muru oraz zabezpiecza przed penetracją wody w głąb muru, co jest istotnym zagadnieniem w przypadku obiektów docelowo znajdujących się na wolnym powietrzu jako fragment ekspozycji parku archeologicznego. Wszystkie zrekonstruowane elementy muszą w wyraźny sposób odróżniać się od autentycznej konstrukcji. Przykładem starożytnych konstrukcji, znajdujących się w stanie trwałej ruiny, tworzących rezerwat archeologiczny oraz zabiegów konserwatorskich, jakim są one poddawane, jest stanowisko archeologiczne Tyritake w miejscowości Kercz, Ukraina (Rys. 4). Misja konserwatorska Wydziału Inżynierii Lądowej Politechniki Warszawskiej, pracująca w tym miejscu od 2011 roku, uczestniczy w międzynarodowym projekcie badawczym" Zabytki Bosporu Kimmeryjskiego" [7]. Specyfiką badanych i konserwowanych konstrukcji murowych jest tutaj różnorodność form i technik konstrukcyjnych wynikających z dużego rozkładu datowania



Rys. 4 Wykopaliska na terenie antycznego miasta Tyritake w Kerczu, Ukraina
Fig. 4 The archeologically site in ancient city Tyritake, Kerch, Ukraine

ich powstania - od V wieku p.n.e. do V wieku n.e. W pracach konserwatorskich należało również uwzględnić lokalne uwarunkowania (społeczne i ekonomiczne), w tym dostępność materiałów konserwatorskich. Podstawowymi zagadnieniami i problemami rozwiązanymi w czasie badań były: opracowanie kompleksowego programu konserwatorskiego, dostosowanego do lokalnych oczekiwań oraz do wymagań międzynarodowych traktatów dotyczących konserwacji zabytków i obiektów archeologicznych; właściwa diagnostyka stanu technicznego konstrukcji murowych, uwzględniająca określenie parametrów fizycznych i wytrzymałościowych elementów murowych i zaprawy oraz technik i technologii stosowanych w czasie wznoszenia konstrukcji (w oparciu o nie prowadzone były wszystkie prace konserwatorskie); określenie przyczyn destrukcji konstrukcji i materiałów oraz sposobów jej zatrzymania; określenie zasad wzmocnienia muru -zaprawy i elementów murowych oraz konsolidacji muru; określenie materiałów możliwych do użycia w pracach konserwatorskich z uwzględnieniem lokalnych ograniczeń; zabezpieczenie konstrukcji przed destrukcyjnymi oddziaływaniami środowiska naturalnego (opady atmosferyczne oraz zmienne temperatury, destrukcyjna działalność ujemnych temperatur); hydrofobizacja konstrukcji; wybór i zastosowanie odpowiednich, tymczasowych i trwałych, zabezpieczeń terenu wykopalisk przed wpływem warunków atmosferycznych i zagrożeń społecznych (związanych z ingerencją osób postronnych). Prace konserwatorskie i inżynierskie polegały przede wszystkich na wzmocnieniu istniejących fragmentów murów. Ze względu na bardzo zły stan techniczny ruin (mury dzikie na zaprawie glinianej, popękane, rozwarstwione wewnętrznie i zewnętrznie, materiały

zdezintegrowane granularnie) wykonano konsolidacje murów oraz miejscowe reprofilacje i nadbudowy metodą anastylozy. Warstwy nadbudowywane oddzielone zostały od warstw pierwotnych warstwami ceramiki. Reprofilację murów przeprowadzono etapami: przemurowanie, spojenie, konsolidacja zaprawą glinianо-cementową; spoinowanie – nakładanie zaprawy glinianej w spoinach na mokrą zaprawę; uzupełnienie spoin zaprawą glinianą po stwardnieniu zaprawy murarskiej; oczyszczenie mechaniczne muru; naprawa i wzmocnienie spoin oraz scalenie kolorystyczne. Ostatnim etapem prac była hydrofobizacja muru [7].

Wszystkie rodzaje robót konserwatorskich i inżynierskich, wykonywane *in situ* oraz na potrzeby wystaw muzealnych, muszą być poprzedzone odpowiednimi, rzetelnymi, interdyscyplinarnym i wieloaspektowymi badaniami. Przeprowadzenie takich badań oraz stworzenie na ich podstawie odpowiedniej dokumentacji ma na celu zapewnienie autentyczności rekonstruowanego obiektu. Jednym ze sposobów rekonstrukcji obiektów architektonicznych jest anastyloza. Jest to zabieg polegający na ponownym ustawieniu obiektu, który uległ zawaleniu lub rozbiciu. Dużym utrudnieniem jest sytuacja gdy obiekt jest niekompletny i zachodzi potrzeba wykonania uzupełnień. Uzupełnienia te, z punktu widzenia konserwatorskiego, powinny być wyraźnie różne od elementów prawdziwych, jednak z punktu widzenia artystyczno-architektonicznego powinny być jak najmniej zauważalne. Materiał z jakiego wykonywane są brakujące elementy może być taki sam jak wykorzystany w obiekcie lub taki aby w sposób kontrastowy ukazywać uzupełnienia. Przykładem anastylozy jest ponowne ustawienie kolumn w portyku bazyliki wczesnochrześcijańskiej w Palmyrze (Syria) (Rys. 5).



Rys. 5 Przykład anastylozy – wczesnochrześcijańska bazylika w Palmyrze (Syria)

Fig. 5 The anastylosis example – Early Christian basilica in Palmyra (Syria)

Przeprowadzenie szczegółowych badań i odpowiednia ich dokumentacja jest szczególnie istotna przy rekonstrukcjach wirtualnych. Wynika to z potrzeby zapewnienia odpowiedniej wiarygodności historycznej oraz spójności merytorycznej efektów wizualizacji, a co za tym idzie traktowanie ich na równi z tradycyjnymi metodami badań i formami prezentacji. Karta Londyńska wprowadza zasady stosowania metod wizualizacji komputerowych jako badań naukowych i w celu popularyzacji wiedzy o dziedzictwie kulturowym. Istotnym założeniem jest każdorazowa ocena stopnia wiarygodności wizualizacji oraz jednoznaczne określenie czy wizualizacja oddaje stan istniejący, odtwarza fazę historyczną, czy też jest domniemaną rekonstrukcją badanego obiektu [8].

3. Wnioski

Konserwacja zabytków architektury antycznej jest zadaniem wymagającym dużej wiedzy i doświadczenia. W celu przeprowadzenia jej w sposób poprawny, zgodny z wymogami międzynarodowych traktatów, wymagane są dokładne badania o interdyscyplinarnym charakterze, obejmujące zarówno konserwowany obiekt jak i jego otoczenie oraz inne obiekty o zbliżonym charakterze. Dopiero tak szerokie badania pozwalają na uzyskanie zadawalającego poziomu autentyzmu i wiarygodności historycznej, które decydują o walorach edukacyjnych zrewitalizowanego zabytku. Odpowiednio dobrana i przygotowana forma ekspozycji antycznych obiektów zabytkowych, będących elementami dziedzictwa kulturowego, mogą w znaczącym stopniu wpłynąć na turystyczne walory regionu, przyczyniając się do rozwoju gospodarki w obszarze turystyki. Właściwa konserwacja konstrukcji antycznych, w połączeniu z poprawą ich trwałości i wzmocnieniem, w rezerwatach archeologicznych i poza nimi, jest właściwą realizacją zadania ochrony dziedzictwa kulturowego. Właściwe eksponowanie antycznych zabytków architektury i budownictwa ma olbrzymie walory edukacyjne. Powyższe działania zabezpieczające obiekty zabytkowe przed zniszczeniem i zachowujące dla przyszłych pokoleń, są najwłaściwszą realizacją zasad zrównoważonego rozwoju.

Literatura

[1] Międzynarodowa Karta Ochrony i Zarządzania Dziedzictwem Archeologicznym, Lozanna 1990.

[2] Europejska konwencja o ochronie dziedzictwa archeologicznego (poprawiona), sporządzona w La Valetta dnia 16 stycznia 1992 r., Dziennik Ustaw1996 r., Nr 120, poz. 564.

[3] Terlikowski W.: The Specificity of Research, Conservation and Reconstruction of Real and Virtual Early Christian Basilicas in Palmyra, Syria. PROHITECH'14, 7-9 May 2014, Antalya-Turkey, Proceedings of the 2nd International Conference on Protection of Historical Constructions, Editors Federico M. Mazzolani, Gulay Altay, Bogazici University Publishing 34342 Beebek, Istanbul Turkey, ISBN NUMER: 978-975-518-361-9, PUBLISHING NUMBER:1103, p.699-705.

[4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002r w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz. U. 2002 r., Nr 75 z późniejszymi zmianami.

[5] Marecki A., Wasilewski K.: A Virtual Reconstruction of an Unknown Roman Bridge from the 1st Century A.D. PROHITECH'14, 7-9 May 2014, Antalya-Turkey, Proceedings of the 2nd International Conference on Protection of Historical Constructions, Editors Federico M. Mazzolani, Gulay Altay, Bogazici University Publishing 34342 Beebek, Istanbul Turkey, ISBN NUMER: 978-975-518-361-9, PUBLISHING NUMBER:1103, p.707-712.
[6] Międzynarodowa Karta Konserwacji i Restauracji Zabytków i Miejsc Zabytkowych, Wenecja 1964.
[7] Terlikowski W., Wasilewski K.: Technical problems for maintenance and preservation of ancient masonry structures from the point of view of the exposition in archaeological parks for example the excavation in Tyritake in Kerch (Ukraine), PROHITECH'14, 7-9 May 2014, Antalya-Turkey, Proceedings of the 2nd International Conference on Protection of Historical Constructions, Editors Federico M. Mazzolani, Gulay Altay, Bogazici University Publishing 34342 Beebek, Istanbul Turkey, ISBN NUMER: 978-975-518-361-9, PUBLISHING NUMBER:1103, p.759-765.
[8] The London Charter for the Computer-based Visualisation of Cultural Heritage, pod red. Hugh Denard, King's College London, 7 lutego 2009.

THE ANCIENT ARCHITECTURAL MONUMENTS EXPOSITION

S u m m a r y

The aim of this article is analysis of ancient antique architectural objects exposure and the corresponding maintenance and restoration treatments. Based on international treaties, personal research and own experiences in restoration work on the archaeological sites authors describe the different ways of presenting elements of the cultural heritage such as ancient architectural monuments are. The distribution of antique objects due to the present day structure condition is provided including objects that survived in very good technical condition and objects that have not survived to this day in a form other than descriptions or images as well as other intermediate states. The exposure methods of the architectural heritage include archaeological parks and other forms of presentation, such as real and virtual reconstructions. The analysis of restoration work presents the actions specific to different objects preservation stages and different ways their future presentation. It was illustrated by examples from authors experience from archaeological sites located in Europe and Asia. The article draws attention to the need for interdisciplinary research involving not only object, which is under conservation, but also its surroundings, and similar objects with similar technology and technology applied . Such studies are necessary in order to maintain an adequate level of historical authenticity and credibility during maintenance and restoration works. The article shows the effect of the properly conducted maintenance and properly prepared exhibition of historical architectural objects on the development of the local economy and the implementation of the principles of sustainable development.

Keywords: archaeological parks, permanent ruin, international treaties on the conservation of cultural heritage, the principles of sustainable development

Przesłano do redakcji: 16.03.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.82

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 545-552

Adam TROFIMOWICZ[1]

ANALIZA PRACY SYSTEMU PODGRZEWANIA PŁYTY BOISKA SPORTOWEGO Z WYKORZYSTANIEM POMPY CIEPŁA W TRAKCIE JEJ EKSPLOATACJI

W artykule przedstawiono system podgrzewania płyty boiska sportowego znajdującego się w Praszce niedaleko centrum przy jednej ze szkół. Opisano jego główne elementy oraz przedstawiono rodzaje gruntowych wymienników ciepła. System podgrzewania murawy w zimie za pomocą pompy ciepła odbiera pokłady energii cieplnej dolnego źródła i przekazuje ją do górnego źródła, które podgrzewa murawę boiska. Podczas dużych, długotrwałych mrozów system nie działa poprawnie. Sterownik pompy ciepła, ze względu na zbyt niskie temperatury solanki na wypływie z pompy, wyłącza ją co dzieję się przy temperaturze -10 ºC. Dodatkowo zbierający się lód na ściankach rur uniemożliwia regulację zaworów przez co pompa ciepła musi być wyłączona do momentu stopienia się lodu. Podczas tych przestojów zanika możliwość podgrzewania murawy; co za tym idzie w zimie podczas opadów śniegu system nie wypełnia swojej podstawowej roli. Ponadto został również przedstawiony system akumulacji ciepła wraz z opisem jego głównych elementów. Ten system ma za zadanie zmagazynowanie jak największej ilości ciepła w gruncie podczas ciepłych słonecznych dni, aby system podgrzewania murawy mógł działać jak najdłużej. W pracy zostały umieszczone wyniki pomiarów z dwóch kompletów czujników. Jeden komplet był zamontowany w boisku, drugi był zamontowany 1 metr poza jego obrębem. Na ich podstawie zostały odczytane temperatury na poszczególnych głębokościach oraz została przeprowadzona analiza.

Słowa kluczowe: czujniki, pomiary, temperatura, poziomy gruntowy wymiennik ciepła

1. Wstęp

W ciągu ostatnich kilkunastu lat w Polsce można zauważyć wyraźny wzrost zainteresowania pompami ciepła. Pompy te mogą stanowić część systemów grzewczych jednego jak i kilku budynków mieszkalnych, obiektów spor-

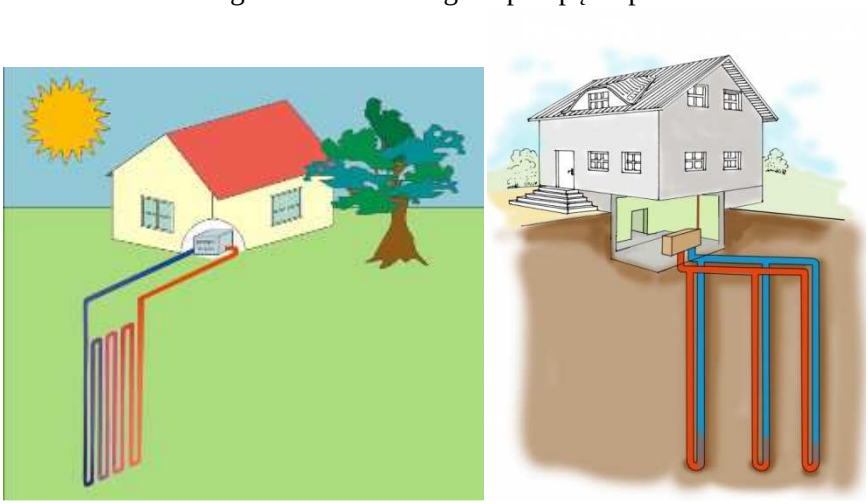
[1] mgr inż. Adam Trofimowicz, Politechnika Opolska, Katedra Inżynierii Środowiska, 45-271 Opole, ul. S. Mikołajczyka 5, e-mail: atrofimowicz@gmail.com

towych a także obiektów użyteczności publicznej [1,2]. Mogą również służyć do ogrzewania płyt boisk sportowych.

Do podgrzewania płyt boisk sportowych stosuje się elektryczne bądź cieczowe systemy. Największą zaletą tych systemów jest wydłużenie czasu wykorzystania boisk w ciągu roku. Elektryczne podgrzewanie murawy boiska realizowane jest za pomocą kabli grzejnych, które są ułożone równolegle do siebie w warstwie gruntu pod powierzchnią murawy. Systemy cieczowe realizowane są za pomocą układu rur ułożonych w ten sam sposób co kable grzejne; w rurach znajduje się ciecz o właściwościach niepodatnych na zamarzanie [13]. Przedmiotem pracy jest zaprezentowanie systemu cieczowego w którym zasilanie instalacji podgrzewania murawy pochodzi z pompy ciepła. Zostaną ponadto przedstawione wybrane wyniki pomiarów dla obiektu sportowego „Orlik" w Praszce, w którym zastosowano pompę ciepła do podgrzewania płyty boiska sportowego.

2. Rodzaje gruntowych wymienników ciepła

Do rodzajów gruntowych wymienników ciepła zwanych także dolnymi źródłami pomp ciepła możemy zaliczyć pionowe (Rys. 1.), poziome (Rys. 2.), oraz koszowe gruntowe wymienniki ciepła (Rys. 3.) [3]. Pierwsze z nich montowane są w odwiertach, których głębokość może wynosić ponad 100 m. Do układów możemy zaliczyć wymienniki gruntowe w formie wydłużonej U-rury zamontowane szeregowo lub równolegle z pompą ciepła.

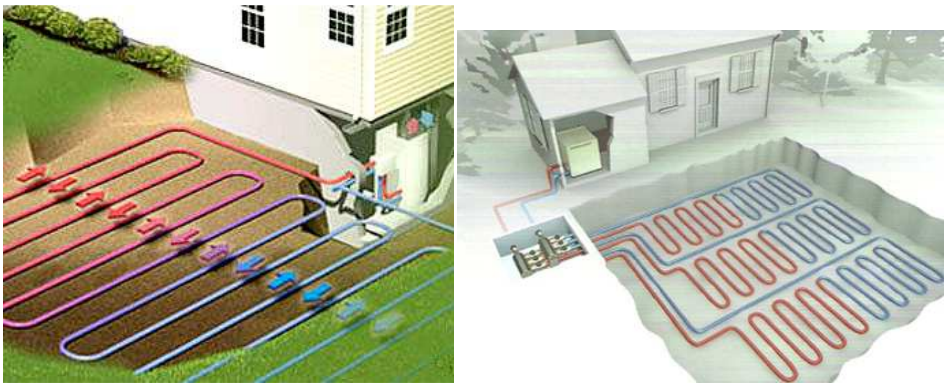


Rys. 1. Pionowy gruntowy wymiennik ciepła. Układ szeregowy (po lewej); układ równoległy (po prawej. www.obud.pl)[4,5]

Fig. 1. Vertical ground heat exchanger. Serial system (on the left); parallel system (on the right. www.obud.pl) [4,5]

Drugim rodzajem gruntowych wymienników ciepła są wymienniki poziome. Montowane są w glebie na głębokości ok. 1-2 m. Tak jak i wymienniki pionowe, mogą być połączone w układ szeregowy lub równoległy [6].

Ostatnim rodzajem gruntowych wymienników ciepła są wymienniki koszowe zwane także klatkami energetycznymi. Ten typ gruntowych wymienników jest rozwiązaniem dla działek, na których warunki nie pozwalają na montaż tradycyjnych wymienników poziomych [9].



Rys. 2. Poziomy gruntowy wymiennik ciepła. Układ szeregowy (po lewej); układ równoległy (po prawej) [7,8]

Fig. 2. Horizontal ground heat exchanger. Serial system (in left); parallel system (in right) [7,8]



Rys. 3. Klatka energetyczna - gruntowy wymiennik ciepła. Zdjęcie oraz rysunek firmy Uponor [9]

Fig. 3. Energy cage - ground heat exchanger. Photo and drawing: Uponor company [9]

3. Kompleks sportowy w Praszce

Kompleks sportowy w Praszce, w województwie opolskim składa się z boiska piłkarskiego o wymiarach 30 m x 62 m z polem do gry 26 m x 56 m; boiska wielofunkcyjnego do koszykówki i piłki siatkowej o wymiarach 19,1 m x 32,1 m z polem do gry o wymiarach 15,1 m x 28,1 m oraz budynku sanitarno – szatniowy o powierzchni użytkowej 63,29 m^2 [10,11]. Kompleks mieści się w Praszce przy Publicznym Gimnazjum. Boisko do gry w piłkę nożną zostało wyposażone w system podgrzewania murawy oraz system akumulacji ciepła.

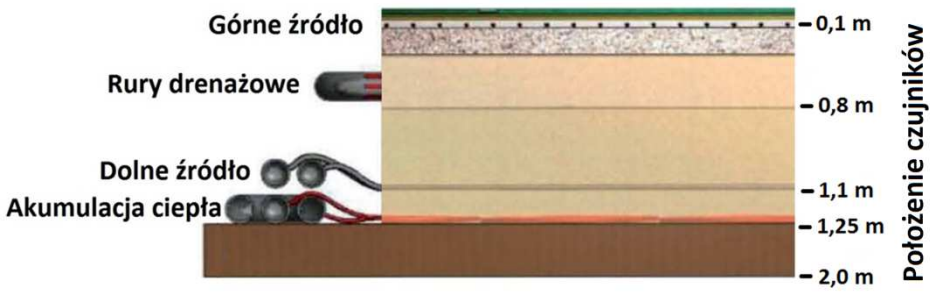
3.1 Elementy systemu

Głównymi elementami systemu podgrzewania murawy są: pompa ciepła, górne oraz dolne źródło, dwie pompy obiegowe, krata montażowa oraz zbiornik zrzutowy.

Pompa ciepła o nazwie MEZO B oraz mocy grzewczej 65 kW została umieszczona w tzw. „kotłowni" znajdującej się w budynku tuż przy boisku. W tym samym pomieszczeniu znalazły się zarówno pompy obiegowe służące do wymuszenia ruchu w górnych oraz dolnych źródłach jak i zbiornik zrzutowy, w którym roztwór wody z glikolem (nazywany solanką) może być zmagazynowany w razie awarii któregokolwiek z elementów systemu. Górne oraz dolne źródła są to układy rur polietylenowych tworzące dwa poziome gruntowe wymienniki ciepła. Jeden znajduje się na głębokości ~ 0,9 m i ma za zadanie odbierać ciepło. Drugi gruntowy wymiennik ciepła znajduje się na głębokości 0,1 m i ma za zadnie oddawać ciepło (podgrzewać murawę w zimie). Rury górnego źródła ułożone są na kracie montażowej o nazwie Technogrid, która ma zadanie utrzymania odstępów 0,15 m między poszczególnymi rurami.

Do głównych elementów systemu akumulacji ciepła należą: kolektory słoneczne, płaszczowo-rurowy wymiennik ciepła, dwie pompy obiegowe, sterownik pomp obiegowych oraz układ rur służący do akumulacji ciepła w gruncie.

Na rysunku 4 pokazano przekrój boiska ze schematem rozmieszczenia rur.



Rys. 4. Schemat rozmieszczenia rur oraz czujników w boisku [10]

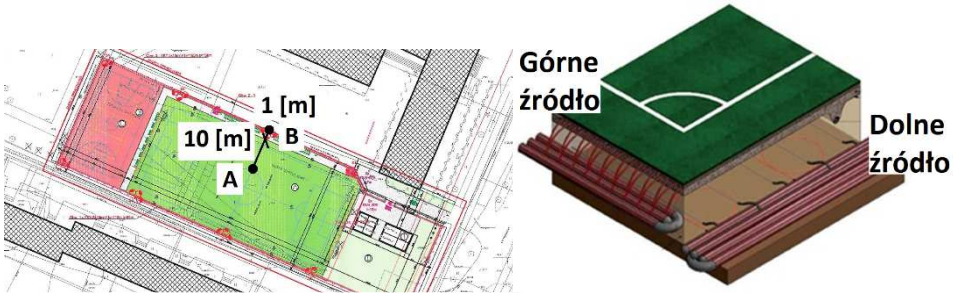
Fig. 4. Scheme of pipes location and sensors in the outdoor sports ground [10]

Dwanaście płaskich kolektorów słonecznych o wymiarach 2,164 x 1,014 x 0,08 m, zostało zamontowanych na budynku sanitarno-szatniowym. Cała instalacja akumulacji ciepła została wypełniona roztworem wody z glikolem. Kolejnym elementem systemu jest płaszczowo-rurowy wymiennik ciepła. Ma on za zadanie przekazanie ciepła z roztworu glikolu płynącego w płaskich kolektorach słonecznych do roztworu glikolu, znajdującego się w rurach akumulacji ciepła znajdujących się pod powierzchnią gruntu na głębokości ~ 1m. Do wymuszenia ruchu roztworu wody z glikolem użyto dwóch pomp. Jedna służyła do wymuszenia ruchu w obiegu instalacji solarnej. Druga do wymuszenia ruchu w instalacji akumulacji ciepła. Sterownik pomp obiegowych służy do włączania oraz wyłączania pomp na podstawie czujników temperatury zainstalowanych na wlocie oraz wylocie z kolektorów słonecznych [10].

Celem systemu akumulacji ciepła jest zmagazynowanie jak największej ilości ciepła w gruncie aby system podgrzewania murawy mógł jak najdłużej działać.

4. Wyniki pomiarów

Celem pomiarów było sprawdzenie poprawności działania systemu podgrzewania murawy. W tym celu na etapie budowy boiska, w gruncie umieszczono czujniki firmy Tewa Electronics Group o oznaczeniu PT1000. Rozmieszczono je między innymi w punktach A oraz B przedstawionych na rysunku poniżej (Rys. 5.). Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem miernika uniwersalnego firmy UNI-T o oznaczeniu UT 71 E. W tabeli 1 przedstawiono wybrane wyniki pomiarów, wykonanych w dniu 21.01.2014 roku. Był to mroźny dzień z opadami deszczu ze śniegiem. Temperatura w trakcie pomiaru o godzinie 17.00 wynosiła -2,5 ºC. Czujniki w boisku zostały zamontowane z chwilą budowy boiska i znajdują się na linii środkowej boiska, w odległości 10 m od jego krawędzi. Rury służące do podgrzewania murawy, pobierania ciepła z gruntu, oraz akumulacji ciepła zostały podłączone w układ Tichelmanna. Jest to układ który zapewnia jednakowe straty ciśnienia, oraz prędkości na wszystkich rurach za pomocą odpowiedniego podłączenia rur. Bez konieczności użycia kryz [12]. Stąd odległość od krawędzi boiska nie miała większego znaczenia. Lecz aby wyeliminować wpływ temperatur z gruntu rodzimego zdecydowano się o umieszczeniu czujników w odległości 10 m gdzie temperatura systemu jest ustabilizowana. Czujniki poza obrębem boiska znajdują się 1 metr od krawędzi boiska i znajdują się w gruncie rodzimym .



Rys. 5. Schemat boiska z lokalizacją czujników (po lewej); Schemat rur, górnego oraz dolnego źródła (po prawej) [10]

Fig. 5. Scheme of the outdoor sports ground with the sensors location (on the left); Scheme of tubes, upper and lower source (on the right) [10]

Tabela 1. Wybrane wyniki pomiarów z dnia 21-01-2014

Table 1. Selected results of measurements on 21-01-2014

Położenie czujników od poziomu gruntu [m]	Temperatura z czujników umieszczonych w boisku [ºC]	Temperatura z czujników umieszczonych poza obrębem boiska [ºC]
0,1	0,5	0,0
0,8	3,5	5,0
1,1	3,0	3,5
1,25	3,0	4,0
2	5,0	5,5

Z tabeli 1. wynika, że podczas podgrzewania murawy czujnik znajdujący się w boisku na głębokości 1,1 m wskazuje temperaturę niższą niż ten, który znajduje się w boisku na głębokości 0,8 m, co świadczy o pobieraniu ciepła z gruntu. Z czujników umieszczonych poza obręb boiska wynika również, że pomimo oddalenia ich o metr poza krawędź boiska, dolne źródło nadal ma wpływ na grunt wokół tych czujników. Wyraźnie widać to po wynikach pomiarów, otrzymanych z czujnika, znajdującego się poza obrębem boiska na głębokości 1,1 m, w którym temperatura w porównaniu do czujników, umieszczonych poza obrębem boiska na głębokości 0,8 m i 1,25 m jest niższa. Porównując wyniki zawarte w tabeli można zauważyć, że temperatury odczytane z czujników umieszczonych poza obrębem boiska są wyższe. Poza jedną, znajdującą się, na głębokości 0,1 m. Może świadczyć to o częściowym wyczerpaniu dolnego źródła ciepła, które znajduje się w boisku; wyższa wartość temperatury w czujniku umieszczonym w boisku na głębokości 0,1 m świadczy o oddawaniu ciepła przez pompę ciepła.

5. Podsumowanie

Omówiony system podgrzewania murawy w zimie za pomocą pompy ciepła odbiera pokłady energii cieplnej dolnego źródła i przekazuje ją do górnego źródła, które podgrzewa murawę boiska. Podczas dużych, długotrwałych mrozów system nie działa poprawnie. Sterownik pompy ciepła, ze względu na zbyt niskie temperatury solanki na wypływie z pompy wyłącza ją, co dzieje się przy temperaturze -10 ºC. Poza tym w „kotłowni", w miejscach łączeń zaworów, gdzie nie ma założonej izolacji, na rurze podłączonej z jednej strony do pompy ciepła a z drugiej do dolnego źródła, powstaje warstwa lodu (z wierzchu wyglądająca jak szron). Wykroplenie się wilgoci z powietrza na ściankach zewnętrznych rury zachodzi ponieważ pomiędzy temperaturą wilgotnego powietrza w pomieszczeniu a temperaturą ścianki rury jest duża różnica temperatur (w pomieszczeniu temperatura około 22 ºC; w rurze temperatura solanki wypływającej z pompy ciepła dochodzi do -10 ºC). Warstwa lodu nie pozwala na regulację zaworów, dlatego osoba obsługująca instalację stwierdzając, że warstwa lodu jest zbyt gruba wyłącza ją do momentu stopienia się lodu. Podczas tych przestojów zanika możliwość podgrzewania murawy, co za tym idzie w zimie podczas opadów śniegu system nie wypełnia swojej podstawowej roli.

Rekomendacją na tym obiekcie mogłoby być zamontowanie większej ilości kolektorów słonecznych co zwiększyłoby uzysk ciepła słonecznego.

Literatura

[1] Zalewski W.: Pompy ciepła sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne. IPPU Masta, Gdańsk 2001.

[2] Zawadzki M.: Kolektory słoneczne, pompy ciepła – na tak. Polska Ekologia 2003.

[3] http://issuu.com/instalreporter.pl/docs/instalreporter_2013_10/40, strona 63 [dostęp: 5 kwiecień 2014 r.].

[4] http://www.biomasa.org/index.php?d=artykul&kat=165&art=166 [dostęp: 5 kwiecień 2014 r.].

[5] http://www.obud.pl/wiadomosci,art,8727,,dolne_rodlo_pompy_ciepla_musi_miec_odpowiednia_wielkosc_cykl_uwaga_na_bledy_czesc_pierwsza [dostęp: 5 kwiecień 2014 r.].

[6] Rubik M.: Pompy ciepła. Poradnik. Ośrodek Informacji: Technika instalacyjna w budownictwie, Warszawa 2006.

[7] http://portalenergia.pl/wiadomosci/technologie/dolne-zrodla-pomp-ciepla,127 [dostęp: 3 maj 2014 r.].

[8] http://www.engeco.pl/zestawy-dolnego-zrodla/ [dostęp: 3 maj 2014 r.].

[9] Serafin P.: Klatki energetyczne – nowy rodzaj kolektorów gruntowych. InstalReporter sierpień 2013 (08) str 50-51, http://instalreporter.pl/wp-content/uploads /2013/08/IR_2013_08_Klatki_energetyczne.pdf [dostęp: 3 maj 2014 r.].

[10] http://www.rudniki.internetdsl.pl/orlikpraszka.zip [dostęp: 5 styczeń 2014 r.].

[11] http://orlik2012.pl/dev.php/dla-inwestorow/zalozenia [dostęp: 3 maj 2014 r.].
[12] http://www.instalator.pl/ABC/2007/zrzut/pdf_09_2007/Page%2026.pdf [dostęp: 3 maj 2014 r.].
[13] http://wis.pol.lublin.pl/kongres3/tom3/19.pdf [dostęp: 3 maj 2014 r.].

HEATING SPORTS GROUND USING HEAT PUMP

S u m m a r y

This article is about the system which heats the outdoor sports ground located in Praszka nearby a centrally located school. It describes main elements of this system and presents types of the ground heat exchangers. Furthermore it includes the results of measurements from two sets of sensors. Both results is measured in one cold day but in two different places. One set was placed within the sports ground, the other one was placed 1 meter far outside. On the basis their temperatures were read at various depths and the analysis was conducted. System of heating the ground in the winter by means of a heat pomp receives the heating energy from the lower source and transfers it to the upper source which warms up the grounds surface. During the long cold periods the system is not working very well. Due to too low temperature of the brine at the exit of the pomp, heat pomp driver switches it off. It happens at the temperature of -10 ºC. Additionally the ice settling at the tubes makes regulation of valves impossible and the pomp needs to be switched off till the ice melts. During those periods the possibility of heating the ground disappears and as a consequence the system doesn't fulfill its crucial role during the snowfalls in the wintertime.

Keywords: sensors, measurement, temperature, horizontal ground heat exchanger

Przesłano do redakcji: 10.01.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.83

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 553-564

Bernard TWARÓG[1]
Zbigniew KĘSEK[2]

FLOODPOLIS - POWODZIOWE MIASTO PRZYSZŁOŚCI

Artykuł akcentuje i zmierza do refleksji nad rolą wody w kształtowaniu przestrzeni publicznej. Podkreśla istnienie rozwiązań gospodarowania wodami w kontekście możliwości zabudowy obszarów wykluczonych poprzez otwarcie przestrzeni dla powodzi i środowiska. Zwraca uwagę na niekorzystne proporcje skutku do efektu w działaniach ochrony przed powodzią, zaburzone poprzez postęp techniczny i technologiczny, rewolucję przemysłową oraz wiarę w nieograniczone możliwości techniki, co z kolei prowadzi do zawłaszczenia obszarów dotąd zarezerwowanych dla wody. Rozwój demograficzny, trendy urbanizacji, rozwój oraz zmiany klimatyczne w ekspansywnym procesie rozwoju nasilają naturalne zagrożenia. Akcentuje konieczność strategicznego podejścia w działaniach ochronnych wymagając analiz wszystkich elementów ryzyka, eliminacji możliwych składników ryzyka oraz minimalizacji pozostałych składników ryzyka. Środki i siły angażowane w taki proces decyzyjny w większości przypadków, jak pokazuje historia ostatnich lat, okazują się niewystarczające, nieskuteczne a w skutkach zawodne. Fakty te skłaniają do zastanowienia się nad racjonalnością stosowania dotychczasowych środków zapobiegawczych. Skłania do stwierdzenia, że ta dysproporcja jest efektem braku równowagi w którym każde działanie ma swój udział w skutku (lub w efekcie), pojawia się ujemna synergia. Podkreśla, że ciągły rozwój infrastruktury przeciwpowodziowej czyni, paradoksalnie, ograniczoność oddziaływania na powódź. Skłania do stosowania takich rozwiązań, które ograniczą obszary zagrożenia powodziowego jednocześnie starając się możliwie skutecznie zatrzymywać wodę w zlewni. Podkreśla, że polaryzacja zjawisk katastrofalnych powoduje, że jedynym poprawnym podejściem jest holistyczne zarządzanie wodą z uwzględnieniem wszystkich potrzeb oraz ryzyk.

Słowa kluczowe: floodpolis, kształtowanie przestrzeni publicznej, holistyczne gospodarowanie wodami, ochrona przed powodzią, ryzyko

[1] Autor do korespondencji: dr inż. Bernard Twaróg, Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii i Gospodarki Wodnej, Wydział Inżynierii Środowiska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: btwarog@iigw.pl
[2] dr inż. arch. Zbigniew Kęsek, Politechnika Krakowska Katedra Kształtowania Środowiska Mieszkaniowego Instytut Projektowania Urbanistycznego Wydział Architektury, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków e-mail: zbigniewkesek@interia.pl

1. Miasto i woda – nierozłączne pierwiastki rozwoju przestrzeni publicznej

Woda pierwotnie kojarzona była z sacrum. Zazwyczaj status świętych zyskiwały rzeki – nośniki pierwiastka kosmogonicznego. W mitach i rytuałach stanowiła początek stworzenia, ponownego narodzenia. „Płynąca woda rzeki symbolizuje przemijanie, upływający czas, a więc drogę, życiową wędrówkę. Ma swój początek (źródło) i koniec, którym jest powrót do stanu chaosu, śmierci, gdy uchodzi do bezmiaru oceanu..."[3]. „W starożytnej Italii, tak jak w Grecji, każde źródło i rzeka były święte. Najstarszy most rzymski na Tybrze zbudowano z drewna bez użycia elementów metalowych by nie zranić rzek. Podobnie źródła Nilu były boskie. Płynął przez pustynię, a jego bieg miał kształt królewskiego emblematu kobry. Rzeka wylewała za sprawą boga Hapi, który dostarczał mu wodę z bezdennego dzbana"[4].

W układach antycznych portów takich jak Milet i Aleksandria oraz średniowiecznych miastach hanzeatyckich Lubeka, Hamburg czy Gdańsk dostrzegamy czytelne związki funkcjonalno – kompozycyjne między miastem a wodą. Szczególnie atrakcyjne formy przybrały renesansowe nadwodne pierzeje Wenecji czy Florencji, XVII-wieczne kanały Amsterdamu oraz monumentalne założenia osiowe Rzymu, Lizbony, Barcelony i Paryża skierowane prostopadle do wybrzeża[5]. Formy zabudowy i zagospodarowania przestrzeni dostosowywano do lokalnych warunków klimatycznych i fizjograficznych. Era Rewolucji Przemysłowej i wiara w nieograniczone możliwości techniki doprowadziły w XX wieku do zawłaszczenia obszarów dotąd zarezerwowanych dla wody przez nowo powstającą zabudowę.[6] Dziś wiemy, że woda jest właśnie tym elementem naturalnym, który od zawsze przyciągał uwagę ludzi, bez którego życie jest niemożliwe.

We współczesnych przestrzeniach publicznych woda pełni wiele funkcji – krajobrazową, rekreacyjną, edukacyjną i dekoracyjną. Ponadto kształtuje odpowiednie warunki klimatyczne przyczyniając się do poprawy warunków zdrowotnych. Jest jednym z elementów współtworzących, charakter, funkcję oraz walory estetyczne przestrzeni publicznej. Problematyka dotycząca oceny jakości przestrzeni miejskich rozpatrywana jest coraz częściej pod kątem obecności wielu czynników składających się na komfort użytkowania tej przestrzeni oraz jej atrakcyjność. Jednym z podstawowych elementów wpływających pozytywnie na wizerunek obszarów miejskich o różnej skali, pełniących też różne funkcje jest obecność założeń wodnych. Ich znaczenie zarówno pozytywne jak i negatywne

[3]Pociask-Karteczka J.: Święta woda, [w:] National Geographic. Polska. Raport specjalny, Woda nasz spragniony świat, kwiecień 2010r. str.69
[4] Pociask-Karteczka J.: op. cit., str.75-79.
[5] Kosiński W.: Water in Townscape and in Cityscape – the great and Plura factor [w] Czasopismo Janucha-Szostak A.: (red.), Water in the Townscape, vol. 2, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009 s. 19-44
[6] Janucha-Szostak A.: Kształtowanie miast wobec zagrożeń powodziowych w XXI wieku. Rotterdam-wodne miasto, Czasopismo techniczne Politechnika Krakowska 1-A/1/2012 zeszyt 1 rok 109 str. 301-308

w życiu współczesnym nabiera coraz to większej rangi. Z jednej strony woda staje się pożądanym elementem środowiska mieszkaniowego, czy też ważnym elementem przestrzeni publicznej – ogólnie dostępnej, z drugiej strony stanowi niejednokrotnie poważne zagrożenie.

2. Atrakcyjność przestrzeni wodnych

Założenia wodne obecne są coraz częściej w historycznych centrach miast towarzyszą: reprezentacyjnym placom i parkom pełniącym funkcję rekreacyjną, a także obszarom zamieszkania. Także tereny nadrzeczne postrzegane są jako atrakcyjne obszary o charakterze usługowym i mieszkaniowym. Przykładem jest Londyn ściśle związany z Tamizą, szerokie bulwary nad Sekwaną w Paryżu, czy też nadbrzeże rzeki Hai He (Chiny). Przestrzenie publiczne wraz z elementami wody tworzą miejsca szczególne ze względu na walory kompozycyjne, a także możliwość różnorodnej aktywności społecznej i jej lokalnej tożsamości. Akweny wodne w znacznej części miast stały się elementem przestrzeni śródmiejskiej a co się z tym wiąże atrakcyjną przestrzenią dla mieszkańców. Atrakcyjność przestrzeni wodnych przyczyniło się do zagospodarowania terenów nadbrzeżnych na cele mieszkalne, przyciągając wielu amatorów obcowania z naturalnym środowiskiem, za które są gotowi zapłacić każdą cenę.

Pierwsze osady ludzkie lokalizowane były nad ciekami i zbiornikami wodnymi, wiązało się to przede wszystkim z dostępem do wody, niezbędnej dla życia. Tak zlokalizowane osady rozrastały się tworząc zalążki wielu obecnych miast i wsi. Nasza cywilizacja wyszła głównie z portów śródziemnomorskich, porty zrodziły jej trzon: metody myślenia racjonalnego, reguły demokracji i rządy prawa[7]. Założenia urbanistyczne i architektoniczne miast stanowią zapis procesu budowania ich tożsamości. Każde miasto ma swoją wielowiekową tradycję, wyrażającą się przede wszystkim poprzez specyficzne ukształtowanie przestrzeni miejskiej. Powyższe czynniki kształtujące przestrzeń – założenia urbanistyczne i architektura, w różny sposób stały się nośnikami tradycji, która obecnie poddana zostaje przyspieszonemu procesowi transformacji[8].

3. Zrównoważone kształtowanie przestrzeni publicznej

Współczesne zespoły mieszkaniowe coraz częściej czerpią z zasad projektowania zrównoważonego, którego głównym postulatem jest oszczędność – oszczędność terenu, materiału i ograniczonych zasobów naturalnych. Poszukiwanie rezerw i racjonalne ich wykorzystanie w celu stworzenia przyjaznego człowiekowi środowiska mieszkaniowego wydaje się więc słuszną inwestycją. Przyjazna człowiekowi przestrzeń do życia pozostaje w symbiozie z bogactwem elementów natury wpływając pozytywnie na klimat środowiska oraz jego walory

[7] Kołakowski L.: Pochwała kosmopolityzmu, Gazeta Wyborcza 23.10.1997, s. 14
[8] Rewers E.: Post-Polis. Wstęp do filozofii ponowoczesnego miasta, Univeritas Kraków 2005,s.308

wizualne. Coraz częściej zespoły zabudowy wielorodzinnej, a także współczesne przykłady przestrzeni publicznych powstają w obszarach nadbrzeżnych. Atrakcyjność tych miejsc często wynika z wielu procesów poprzedzających pożądany stan. Zwykle działania te ograniczają się do czynności rewitalizacyjnych bądź czynności odnowy zaniedbanych terenów. Obszary nad wodą doceniane w Holandii, w Polsce tylko przez krótki czas przeżywały swą świetność. Gdańsk, jest przykładem polskiego miasta, niepowtarzalnym, ukształtowanym przez przebieg zdarzeń historycznych, w konkretnym terenie, przez ludzi, którym nieobce było pojęcie genius loci. Gdy spojrzymy na plan głównego miasta zobaczymy koncepcję przestrzeni miejskiej otwartej na ląd i morze, dającej bezpośredni dostęp statkom do miasta a ludziom do morza. Wytyczenie wygodnych ulic i bram prowadzących do nadbrzeża było równie ważne jak budowa okazałego centrum z ratuszem. Spięcie komunikacyjne portu z centrum miejskim spowodowało powstanie niemal równoległych szlaków komunikacyjnych między, którymi znajdują się domy, sklepy i obiekty publiczne[9].

Odmiennie natomiast ukształtowały się miasta śródlądowe, w których wiązka koncentrycznych ulic prowadzi z reguły do centralnego punktu, którym jest zazwyczaj rynek, ratusz, zamek czy kościół. Tego typu miasta w głównej mierze dominują w krajobrazie Polski. Obraz z przed kilku lat większości nadbrzeży polskich miast często przypominał zdegradowany teren zielony, a nade często wysypiska śmieci. Niezagospodarowane, zniszczone tereny nadbrzeżne były rezerwą budowlaną, które po wielu latach mają szansę stać się atrakcyjną przestrzenią, atrakcyjnym środowiskiem mieszkaniowym. W wieku XXI mamy do czynienia z nasileniem konfliktu pomiędzy środowiskiem naturalnym i zurbanizowanym co skutkuje wzrostem ryzyka powodziowego.

4. Zmniejszanie strat powodziowych poprzez politykę przestrzenną

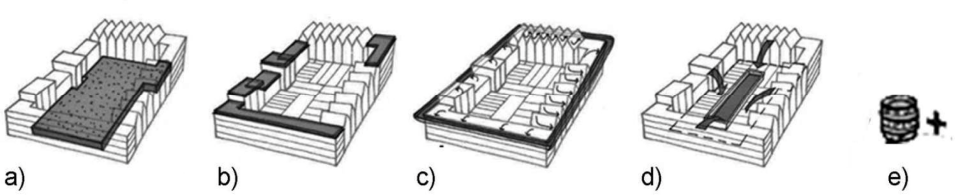
Na problem rozwoju miast w aspekcie zagrożenia powodziowego, zwrócili też uwagę autorzy Nowej Karty Ateńskiej (2003). Przyczyną zagrożeń są globalne zmiany klimatyczne objawiające się wzrostem temperatury i nasileniem ekstremów pogodowych oraz towarzyszące im gwałtowne wezbrania rzek a także sposób kształtowania miast i intensywność procesów urbanizacji, w wyniku których coraz więcej terenów zabudowanych znajduje się na obszarach zalewowych co powoduje wzrost ryzyka powodziowego. Powodem zwiększenia częstotliwości powodzi oraz rozszerzenie obszarów jej występowania są zmiany zagospodarowania zlewni rzek, takie jak wylesianie, osuszanie bagien, melioracje pól uprawnych, uszczelnianie powierzchni. Także zbiegi regulujące koryta rzek powodujące zawężanie ich szerokości na skutek których długość koryta ulega skróceniu, wzrasta prędkość wody oraz czas przepływu fali powodziowej[10].

[9] op. cit., s. 310
[10] Kowalczyk P.: Wodne dylematy urbanizacji, Wyd. Poznańskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk, Poznań 2011.

Wzrost ryzyka powodziowego skłonił państwa UE do wdrożenia programów strategicznych, takich jak Making Space for Water w Wielkiej Brytanii (2005) i Room for the Rivers w Holandii (2006), nastawionych na zwiększenie pojemności retencyjnych dolin rzecznych i zlewni oraz lepszą koordynację ochrony przeciwpowodziowej z planowaniem przestrzennym. Zintegrowane zarządzanie ryzykiem powodzi postulowane w dyrektywie powodziowej (2007) [6], obejmuje m.in. działania nastawione na koegzystencję z wodą. Holandia jest poligonem doświadczalnym urbanistyki XXI w. stojącej w obliczu nowych wyzwań związanych z globalnymi zmianami klimatu. Strategia rozwoju miasta Rotterdam *Rotterdam Waterstad* 2035[7] jest efektem zintegrowanego planowania i ścisłej współpracy władz miasta i zarządów wodnych. Jej głównym celem jest nie tylko ochrona miasta przed wodnymi zagrożeniami, ale także budowanie nowej tożsamości Rotterdamu w oparciu o atrakcyjność żywiołu wody. Strategia ta oprócz zabezpieczenia miasta przed wzrostem poziomu wody zakłada stworzenie specyficznego, rotterdamskiego środowiska mieszkaniowego na rzece poprzez budowę nowych, lecz nawiązujących do tradycyjnych form zabudowy 'wodnych fortec', domów na platformach pontonowych czy domów-łodzi cumujących w dawnych dokach. Tworzenie retencyjnych przestrzeni publicznych: ulic, wodnych placów, skwerów i parków na wodzie a także kształtowanie zróżnicowanych, środowisk wodnych, takich jak enklawy dzikiej przyrody czy zurbanizowane przestrzenie wykorzystywane w celach kulturalnych lub sportowych. Kreacji wizerunku miasta od strony wody poprzez lokalizację na nadbrzeżach atrakcyjnej wizualnie i funkcjonalnie form architektonicznych odpornych na zagrożenia powodziowe.

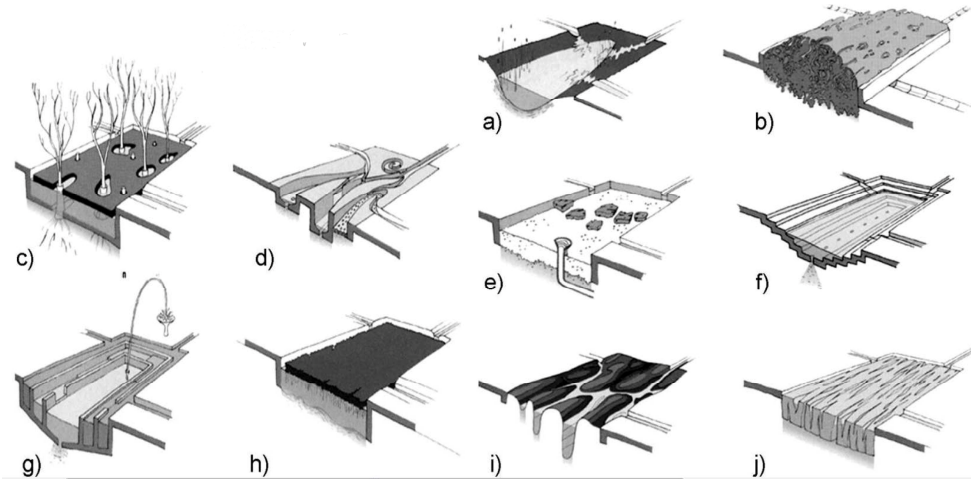
W zapobieganiu powodziom kluczową rolę odgrywa również zmniejszenie odpływu powierzchniowego. Retencja wód opadowych i ich zagospodarowanie w miejscu zaistnienia opadu pozwala uniknąć gwałtownych wezbrań cieków miejskich oraz lokalnych podtopień. Służą temu zrównoważone systemy zagospodarowania wód opadowych (SUDS – Sustainble Urban Drainage Systems), które z powodzeniem zastępują tradycyjną kanalizacje deszczową.

Retencja wody deszczowej należy do priorytetowych założeń strategii rozwoju wielu współczesnych miast europejskich. Wysoki poziom wód gruntowych wymusza konieczność magazynowania wody opadowej na powierzchni począwszy od przydomowych ogródków, poprzez systemy retencyjne w skali kwartału i dzielnicy – obejmujące m.in. oczyszczające wodę biotopy roślinne, niecki infiltracyjne i otwarte zbiorniki wodne, aż po zbilansowaną gospodarkę wodną w całym mieście z systemem spowolnionego odwodnienia ulic, zbiornikami retencyjnymi w formie kanałów, stawów i wodnych parków. Wychodząc z założenia, że deszcz ma być spektaklem, nie problemem, wprowadza się innowacyjny system wodnych placów z bogatym spektrum form architektonicznych, wykorzystujących dynamikę wody; pływających ścieżek, wodnych labiryntów, deszczowych kaskad itp. Wodne place nie tylko umożliwiają zmagazynowanie deszczówki, zmieniają również swój wizerunek i sposób użytkowania w zależności od stopnia wypełnienia wodą, tworząc przestrzenie publiczne atrakcyjne zarówno w okresach suchych, jak i mokrych [7].



Rys. 1. Elementy służące zagospodarowaniu wód opadowych kwartale mieszkalnym, na podstawie [7]:
a) dziedzińce pokryte roślinnością
b) dachy zielone
c) szerokie rynny
d) zbiorniki retencyjne
e) powtórne wykorzystanie wody deszczowej

Fig. 1. Elements used for the rainwater management in a living quarter, based on [7]:
a) backyard covered with plants
b) green roofs
c) wide gutters
d) retention basins
e) rainwater reuse for domestic purposes



Rys.2. Przestrzenie publiczne zwiększające pojemność retencyjną, na podstawie [7]:
a) staw bioretencyjny
b) plac „gąbkowy”
c) plac pływający z uprawa hydroponiczną
d) wodny plac zabaw
e) plac żwirowy podczyszczający wodę
f) zbiornik schodkowy, infiltracyjny
g) labirynt wodny
h) trawnik pływający
i) „kanion”
j) „mata wodochłonna”

Fig. 2. Public spaces with increased retention capacity, based on [7]:
a) bioretention pond
b) “sponge” square
c) floating square with hydroponic crop
d) water playground
e) water purifying gravel square
f) stepped infiltration basin
g) water maze
h) floating lawn
i) “canyon”
j) “water absorptive mat”

Konieczność koegzystencji z wodą może stać się jednym z głównych wyzwań dla urbanistów XXI w. Kształtowanie miast wymaga nowego podejścia do planowania i projektowania urbanistycznego, które w znacznie większym stopniu niż obecne musi uwzględniać lokalne warunki hydro-meteorologiczne i skutki globalnych zmian klimatycznych [8].

5. MZP oraz MRP – ograniczenie dla kształtowania polityki przestrzennej

Aby określić stopień i skalę problemu zaczęto tworzyć mapy zagrożenia powodziowego i mapy ryzyka powodziowego. Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej w grudniu 2011 roku pierwszym dokumentem – wstępna ocena ryzyka powodziowego rozpoczął wdrażanie postanowienia Dyrektywy Powodziowej. W dniu 22 grudnia 2013 roku na Hydroportalu KZGW zostały opublikowane mapy zagrożenia powodziowego oraz mapy ryzyka powodziowego (niestety z błędami). Publikacja ta wypełniła Dyrektywę Powodziową w zakresie udostępniania informacji na temat zagrożenia i ryzyka powodziowego. Mapy zagrożenia powodziowego (MZP) i mapy ryzyka powodziowego (MRP) zostały sporządzone na podstawie ustawy z dnia 18 lipca 2001 r. Prawo wodne (tekst jednolity Dz. U. 2012 r. poz. 145 ze zm.) oraz na podstawie rozporządzenia Ministra Środowiska, Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej, Ministra Administracji i Cyfryzacji oraz Ministra Spraw Wewnętrznych z dnia 21 grudnia 2012 roku w sprawie opracowywania map zagrożenia powodziowego oraz map ryzyka powodziowego (Dz. u. z 2013 r. poz. 104). Przedstawione na mapach zagrożenia powodziowego obszary powinny stanowić podstawę do planowania zagospodarowania przestrzennego na różnych poziomach. Wynikające z powyższych map granice obszarów uwzględnia się w:

1. koncepcji przestrzennego zagospodarowania kraju,
2. planie zagospodarowania województwa,
3. miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego,
4. decyzji o ustaleniu lokalizacji inwestycji celu publicznego lub decyzji o warunkach zabudowy.

Art. 88f ust. 6 w/w ustawy nakazuje, aby od dnia przekazania map zagrożenia powodziowego i ryzyka powodziowego jednostkom samorządu terytorialnego, wszystkie decyzje o ustaleniu lokalizacji inwestycji celu publicznego lub decyzji o warunkach zabudowy na obszarach wykazanych na mapach zagrożenia powodziowego, uwzględniały poziom zagrożenia powodziowego wynikający z wyznaczenia tych obszarów. Mapy zagrożenia powodziowego zostały sporządzone dla obszarów narażonych na niebezpieczeństwo powodzi, wskazanych w wstępnej ocenie ryzyka powodziowego (WORP). Celem WORP była, wstępna analiza ryzyka powodziowego i wskazanie rzek lub odcinków rzek i wybrzeży, dla których opracowano mapy zagrożenia powodziowego. WORP jest dokumentem poglądowym, nie stanowi podstawy dla planowania przestrzennego na danym obszarze lub innych działań mających na celu ograniczenie ryzyka powodziowego. Pod-

stawę taką stanowią dopiero obszary wskazane na mapach zagrożenia powodziowego. Do obszarów narażonych na niebezpieczeństwo powodzi w I cyklu planistycznym zakwalifikowano 253 rzeki o łącznej długości 14481 km. Mapy zostały opracowane dla obszarów, gdzie były dostępne bardzo dokładne dane przestrzenne, tj. numeryczny model terenu i przekroje korytowe rzek oraz dane hydrologiczne, niezbędne do przeprowadzenia modelowania hydraulicznego. Pozostałe obszary zostały wskazane we wstępnej ocenie ryzyka powodziowego do opracowania map w II cyklu planistycznym. Dyrektywa Powodziowa zakłada aktualizację wszystkich dokumentów co 6 lat. Mapy zagrożenia powodziowego i mapy ryzyka powodziowego zostały opracowane w ramach projektu „ Informatyczny System Osłony Kraju przed nadzwyczajnymi zagrożeniami' (ISOK) przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej PIB – Centra Modelowania Powodziowego w Gdyni, Poznaniu, Krakowie i we Wrocławiu. W ramach projektu ISOK zostały opracowane mapy zagrożenia powodziowego przedstawiające obszary zagrożone powodzią o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia:

1. obszar, na którym prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest niskie i wynosi 0,2 %, czyli raz na 500 lat;
2. obszar, na którym prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest niskie i wynosi 1 %, czyli raz na 100 lat;
3. obszar, na którym prawdopodobieństwo wystąpienia powodzi jest niskie i wynosi 10 %, czyli raz na 10 lat.

Obszary zagrożone powodzią o prawdopodobieństwie 1% i 10%, stanowią obszary szczególnego zagrożenia powodzią, w rozumieniu ustawy prawo wodne, dla których obowiązują zakazy zabudowy. Dodatkowo na mapach zagrożenia powodziowego przedstawiono obszary obejmujące tereny narażone na zalanie w przypadku zniszczenia lub uszkodzenia wału przeciwpowodziowego lub budowli ochronnych pasa technicznego. Przy wyznaczaniu tych obszarów uwzględniono w obliczeniach przepływ o prawdopodobieństwie wystąpienia 1%. Mapy zagrożenia powodziowego, oprócz granic obszarów zagrożonych, zawierają również informacje na temat głębokości wody oraz prędkości i kierunków przepływu wody, określających stopień zagrożenia dla ludzi i sposób oddziaływania wody na obiekty budowlane. Uzupełnieniem map zagrożenia powodziowego są mapy ryzyka powodziowego, określające wartości potencjalnych strat powodziowych oraz przedstawiające obiekty narażone na zalanie w przypadku wystąpienia powodzi o określonym prawdopodobieństwie wystąpienia. Są to obiekty, które pozwalają na ocenę ryzyka powodziowego dla zdrowia i życia ludzi, środowiska, dziedzictwa kulturowego i działalności gospodarczej, czyli grupy, dla których zgodnie z celami Dyrektywy Powodziowej należy ograniczać negatywne skutki powodzi. Wyliczając wartość strat na danym obszarze zagrożenia powodziowego, uwzględniono stopień utraty wartości majątku w zależności od głębokości zalania w przypadku trzech klas użytkowania terenu tj. tereny zabudowy mieszkaniowej, tereny przemysłowe i tereny komunikacyjne. Dla pozostałych klas użytkowania terenu przyjęto stałe wartości strat niezależnie od głębokości wody. Mapy zagrożenia powodziowego i mapy ryzyka powodziowego opracowano w szczegółowości map

w skali 1:10 000. Mapy sporządzone są w formie cyfrowej, obejmującej jednolita bazę danych przestrzennych oraz w postaci wizualizacji kartograficznej. Mapy zagrożenia powodziowego i mapy ryzyka powodziowego stanowią podstawę dla racjonalnego planowania przestrzennego na obszarach zagrożonych powodzią, a tym samym dla ograniczenia negatywnych skutków powodzi. Stanowić mogą punkt wyjścia dla prowadzenia dalszych analiz niezbędnych do realizacji działań różnych organów administracji oraz element wspomagający wprowadzenie normatywów określających zasady użytkowania na tych obszarach. Mapy te będą skutecznym narzędziem pozyskiwania danych, podstawą ustanawiania priorytetów i podejmowania dalszych decyzji o charakterze technicznym, finansowym politycznym dotyczących zarządzania ryzykiem powodziowym [9].

6. Błędne koło ochrony przeciwpowodziowej

Rozwój demograficzny, trendy urbanizacji, rozwój gospodarczy oraz zmiany klimatyczne nasilają naturalne zagrożenia. Sytuacja taka stawia przed gospodarzami terenów miejskich konieczność dysponowania wiedzą jak planować i jak zarządzać w tym środowisku, skutecznie minimalizując zagrożenie. Strategiczne podejście wymaga analiz wszystkich elementów ryzyka, eliminacji możliwych składników ryzyka metodami dostępnymi i zastanowieniem się nad sposobami eliminacji lub minimalizacji pozostałych składników ryzyka. Środki i siły angażowane w taki proces decyzyjny w większości przypadków, jak pokazuje historia ostatnich lat, okazują się niewystarczające, nieskuteczne a w skutkach zawodne. Błędne koło ochrony przeciwpowodziowej niweluje „efekty" podjętych działań, przyczyniając się do generowania coraz to większych strat powodziowych. Poprawnie rozumiana powódź jest niepożądanym zjawiskiem społecznym, gospodarczym, ekologicznym i politycznym. Geneza powodzi osadzona jest w hydrologii, istniejącej o ograniczonych możliwościach infrastrukturze przeciwpowodziowej oraz ułomnościach procesów decyzyjnych realizowanych w warunkach normalnej eksploatacji i warunkach nadzwyczajnych. Proces ten generuje skończone możliwości oddziaływania człowieka i techniki, co powoduje niewspółmiernie niskie efekty do poniesionych kosztów. Fakty te skłaniają do zastanowienia się nad racjonalnością stosowania dotychczasowych środków zapobiegawczych. Można postawić pytanie: Czy zabudowa terenów zagrożonych powodzią jest dyletanctwem urbanizacji, a może czy głupotą jest rezygnacja z zabudowy terenów zagrożonych? Kluczem do odpowiedzi jest właściwe pojęcie terenów zagrożonych oraz przypisywanie im wielkości ryzyka (miary zagrożenia). W końcu w kategoriach zagrożeń nie tylko mamy do czynienia z powodziami. Stosujmy takie rozwiązania zapobiegawcze oraz tak zarządzajmy wodą w zlewni żeby ograniczyć obszary zagrożenia powodziowego poprzez między innymi zmianę polityki zagospodarowania przestrzennego i równocześnie starając się możliwie skutecznie zatrzymywać wodę w zlewni. Dziś, w dobie polaryzacji zjawisk katastrofalnych równocześnie występuje zjawisko powodzi oraz suszy. Nawalny opad nie mieści się w korycie „a po sąsiedzku nie ma wody w studni". Jedynym poprawnym podejściem jest holistyczne zarządzanie wodą z uwzględnieniem wszystkich potrzeb oraz ryzyk.

Można się zastanowić czy są możliwości rozwoju w obszarach, wydawałoby się, wyłączonych z tego rozwoju. Projekt „Floodpolis[11]" porusza te problemy podkreślając ich istotność w optymalnej ochronie przed powodzią. W efekcie można uzyskać podejście do bezpiecznego planowania zabudowy w terenach zagrożonych zachowując parytet minimalnego ryzyka oraz zrównoważonego rozwoju. Takie podejście podkreśla równość szans w nowoczesnych, rozwijających się społeczeństwach, daje równe prawo dostępu do rozwoju różnych życiowych możliwości. Nie dyskryminuje właścicieli terenów i nieruchomości znajdujących się w obszarach zagrożonych oraz minimalizuje dysproporcje w szansach rozwoju.

Przy podejściu zachowującym topologię i „logikę" spływu wód, można poprawnie wkomponować powiązania pomiędzy planowaniem przestrzennym oraz ochroną przed powodzią, najistotniejszymi elementami z punktu widzenia praktycznej realizacji celów środowiskowych RDW i dyrektywy powodziowej oraz zaspokojenia potrzeb rozwoju. Przy takim podejściu można wyeksponować istniejącą możliwość zagospodarowania obszarów miast i wsi krajów rozwijających się, na terenach zalewowych i zagrożonych powodzią. Można zaproponować rozwiązania służące realizacji takiego kształtowania przestrzeni zachowując bezpieczeństwo mieszkańców, nie generując kosztów zewnętrznych, przy minimalizacji ryzyka. Można otworzyć przestrzeń dla powodzi oraz dla środowiska. W swych fundamentach niniejsza propozycja jest prekursorska, rzucająca nowe światło na zarządzanie przestrzenią w powiązaniu z ochroną przed powodzią. Podstawowym celem jest wskazanie możliwości rozwoju w obszarach, wydawałoby się, wyłączonych z tego rozwoju. Dodatkowymi efektami takiego podejścia jest podkreślenie równości szans w nowoczesnych, rozwijających się społeczeństwach, równego prawo dostępu do rozwoju, brak dyskryminacji właścicieli terenów i nieruchomości znajdujących się w obszarach problemowych. Spodziewane efekty ekonomiczne i środowiskowe mogą mieć charakter pozytywny, niewymierny i trudny do określenia. Podejście to próbuje minimalizować koszty zewnętrzne poprzez zrównoważony rozwój, wyrównanie szans, likwidację wykluczeń, otwarcie przestrzeni dla powodzi i środowiska.

7. Nieład działań ochronnych czyli dysproporcja

Niwelacja efektu ochrony przed powodzią zwiększoną intensywnością działań przeciwpowodziowych zastanawia nad niekorzystnymi proporcjami skutku do efektu. Skłania do stwierdzenia, że ta dysproporcja jest efektem braku równowagi, skutkiem pominiętej zasady naczyń połączonych. Szybciej odprowadzimy - to zalejemy poniżej. Niezrekompensowanie „zabranej" retencji skutkuje wytworzeniem retencji, tym razem w miejscach lub obszarach niekorzystnych. Każde działanie ma swój udział w skutku (lub w efekcie), nie koniecznie zgodnie z zasadą superpozycji w tym przypadku pojawia się ujemna synergia (m.in. poprzez naruszanie równowagi ekologicznej).

[11] Floodpolis, Twaróg (Wydział Inżynierii Środowiska PK)&Kęsek (Wydział Architektury PK) 2014

Aksjomat ochrony przed powodzią wynika z parytetu bezpieczeństwa i prawa do wolności. Dziś aksjomaty, oraz prawo naturalne[12] traktowane są fakultatywnie. Można je przyjąć lub odrzucić, ale czy bez ponoszenia jakichkolwiek konsekwencji. Skutki odrzucania aksjomatów i prawa naturalnego przekładają się na wymierne skutki materialne, także na nierówności występujące w wielu obszarach życia społeczno-gospodarczego.

8. Podsumowanie

Od zawsze formy zabudowy i zagospodarowania przestrzeni dostosowywano do lokalnych warunków klimatycznych i fizjograficznych. Postęp techniczny i technologiczny, rewolucja przemysłowa oraz wiara w jej nieograniczone możliwości techniki doprowadziły do zawłaszczenia obszarów dotąd zarezerwowanych dla wody, ale nie bez powodu - woda jest właśnie tym elementem naturalnym, który od zawsze przyciągał uwagę ludzi. Rozwój demograficzny, trendy urbanizacji, rozwój oraz zmiany klimatyczne nasilają naturalne zagrożenia. Strategiczne podejście w działaniach ochronnych wymaga analiz wszystkich elementów ryzyka, eliminacji możliwych składników ryzyka oraz minimalizacji pozostałych składników ryzyka. Środki i siły angażowane w taki proces decyzyjny w większości przypadków, jak pokazuje historia ostatnich lat, okazują się niewystarczające, nieskuteczne a w skutkach zawodne. Fakty te skłaniają do zastanowienia się nad racjonalnością stosowania dotychczasowych środków zapobiegawczych. Można postawić pytanie: Czy zabudowa terenów zagrożonych powodzią jest dyletanctwem urbanizacji, a może czy głupotą jest rezygnacja z zabudowy terenów wykluczanych? Kluczem do odpowiedzi jest właściwe pojęcie terenów zagrożonych oraz przypisywanie im wielkości ryzyka. W końcu w kategoriach zagrożeń nie tylko mamy do czynienia z powodziami. Jest to typowy przykład alokacji zasobów, poprawa rozwiązania dla jednego kryterium powoduje pogorszenie innego. W analizie kosztów społecznych można to nazwać pojawieniem się efektów zewnętrznych [9]. Stosujmy takie rozwiązania zapobiegawcze oraz tak zarządzajmy wodą w zlewni żeby ograniczyć obszary zagrożenia powodziowego jednocześnie starając się możliwie skutecznie zatrzymywać wodę w zlewni. Dziś, w dobie polaryzacji zjawisk katastrofalnych równocześnie występuje zjawisko powodzi oraz suszy. Nawalny opad nie mieści się w korycie „a po sąsiedzku nie ma wody w studni". Jedynym poprawnym podejściem jest holistyczne zarządzanie wodą z uwzględnieniem wszystkich potrzeb oraz ryzyk.

Literatura

[1] Pociask-Karteczka J.: Święta woda, [w:] National Geographic. Polska. Raport specjalny, Woda nasz spragniony świat, kwiecień 2010 r.
[2] Kosiński W.: Water in Townscape and in Cityscape – the great and Plura factor [w]

[12] Prawo naturalne (lex naturalis, ius naturale) - zbiór norm, które obowiązują całe społeczeństwo i władzę państwową bez względu na to, czy są one przez tą władzę ustanawiane i uznawane, czy nie. Naczelną ideą prawa naturalnego jest idea dobra i nakaz -Należy czynić dobro.

Czasopismo Janucha-Szostak A.: (red.), Water in the Townscape, vol. 2, Wyd. Politechniki Poznańskiej, Poznań 2009.
[3] Janucha-Szostak A.: Kształtowanie miast wobec zagrożeń powodziowych w XXI wieku. Rotterdam-wodne miasto, Czasopismo techniczne Politechnika Krakowska 1-A/1/2012 zeszyt 1 rok 109.
[4] Kołakowski L.: Pochwała kosmopolityzmu, Gazeta Wyborcza 23.10.1997, s. 14.
[5] Kowalczyk P.: Wodne dylematy urbanizacji, Wyd. Poznańskiego Towarzystwa Przyjaciół Nauk, Poznań 2011.
[6] Dyrektywa 2007/60/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 23 października 2007 r. w sprawie oceny ryzyka powodzi i zarządzania nim (tzw. Dyrektywa Powodziowa), Dziennik urzędowy unii Europejskiej L288/27, 6.11.207.
[7] Rotterdam Waterstad 2035. International Architectuur Biënnale Rotterdam 2005. Episode publishers, Rotterdam 2005.
[8] Twaróg B., Kęsek Z., Floodpolis, Projekt zgłoszony do NCBiR, styczeń 2014.
[9] Twaróg B., Ochrona przeciwpowodziowa versus optymalna ochrona przeciwpowodziowa czyli subiektywizm działań optymalnych, Gospodarka Wodna, Wydawnictwo Sigma, maj 2014.
[10] Twaróg B., Optymalna ochrona przed powodziami z uwzględnieniem ryzyka, Kraków, Politechnika Krakowska , marzec 2002.
[11] http://www.isok.gov.pl/ [dostęp 15.05.2014 r.].
[12] Dobrowolski A, Nowy paradygmat - nauczmy się żyć z powodzią. Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi 30.09.2010 , Warszawa.
[13] Piontek F., Piontek B., Aksjologia, niezrelatywizowane wartości i paradygmaty a kształtowanie nierówności społecznych i ładu strukturalnego, Zeszyt nr 17, Nierówności społeczne a wzrost gospodarczy, UR, 2010.

FLOODPOLIS - FLOOD CITY OF THE FUTURE

S u m m a r y

The article emphasizes and seeks to reflect on the role of water in shaping public space. It highlights the availability of certain water management solutions within the context of the existing potential for land development in the areas presently excluded from construction due to having been either allocated to periodical containment of flood waters, or having openly been dedicated to natural environment. Attention is being drawn to a rather unfavourable ratio of the endeavours specifically undertaken with a view to creating effective flood control/flood defences to their anticipated end results. This in turn gives grounds to the belief that the disparity at issue might well be construed as the actual result of an imbalance in which every specific action has its share in the end result, whereby negative synergy comes into being. It further emphasizes that the on-going development of complex flood defence infrastructure, quite paradoxically, imposes tangible limitations upon the way any potential flooding could effectively be controlled. Consequently, it encourages the use of the solutions specifically aimed at reducing overall size of the areas most at risk of potential flooding, whilst at the same time attempting to have the flood waters retained as efficiently as possible within the original drainage area. It also points out that the polarization of various natural disaster phenomena actually makes the holistic water management the only viable approach, whilst taking into account all apparent requirements and attendant hazards.

Keywords: floodpolis, shaping public space, holistic water management, flood protection, risk

Przesłano do redakcji: 15.11.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.84

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 565-576

Anna WACHOWICZ-PYZIK[1]
Justyna MAZURKIEWICZ[2]
Marcin KRÓLIKOWSKI[3]

GŁÓWNE BARIERY WYKORZYSTANIA ENERGII GEOTERMALNEJ W POLSCE NA PRZYKŁADZIE WYBRANYCH CIEPŁOWNI

Dynamiczny rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE) związany jest zarówno ze wzrastającym zanieczyszczeniem środowiska jak również poszukiwaniem alternatywnych rozwiązań mogących zastąpić częściowo bądź całkowicie konwencjonalne nośniki energii takie jak węgiel, ropa, czy gaz których zasoby mogą zostać wyczerpane w bliższej bądź dalszej przyszłości. Stan wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce związany jest głównie z sektorem biomasy, energii słonecznej i wodnej. Pomimo korzystnych warunków termicznych oraz wzrastającej popularności ciepłowni geotermalnych, a także ośrodków rekreacyjnych, balneologicznych, czy leczniczych wykorzystujących wody termalne, energia geotermalna również zaliczana do OZE, zajmuje marginalną pozycję w porównaniu do innych odnawialnych źródeł energii. Na niski stopień wykorzystania energii geotermalnej wpływ ma wiele czynników tj. warunki termiczne, których słabe parametry mogą w znacznym stopniu utrudnić, a nawet uniemożliwiać wykorzystanie wód podziemnych w ciepłownictwie na dużą skalę. Negatywny wpływ na inwestycje geotermalne mają również kwestie prawne i finansowe związane z budową ciepłowni i pozyskaniem odpowiednich zezwoleń. a także wysokie ceny alternatywnych rozwiązań, nie stanowiące konkurencji dla konwencjonalnych paliw tj. gaz, czy węgiel. Bazując na przykładach ciepłowni geotermalnych, w niniejszej pracy zaprezentowano główne bariery wpływające na obecną sytuację słabego wykorzystania energii geotermalnej w Polsce. Omówiono przy tym aktualne aspekty prawne związane z realizacją projektów geotermalnych, a także główne formy finansowego wsparcia dla tego typu inwestycji.

Słowa kluczowe: energia geotermalna, ciepłownie geotermalne, odnawialne źródła energii

[1] Autor do korespondencji: Anna Wachowicz–Pyzik, AGH Akademia Górniczo–Hutnicza, Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, amwachowicz@poczta.fm

[2] Justyna Mazurkiewicz, AGH Akademia Górniczo–Hutnicza, Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Hydrogeologii i Geologii Inżynierskiej, mazurkiewicz@geol.agh.edu.pl

[3] Marcin Królikowski, AGH Akademia Górniczo–Hutnicza, Wydział Geologii Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, mk@agh.edu.pl

1. Wprowadzenie

1.1. Informacje ogólne

W Polsce największe znaczenie w sektorze odnawialnych źródeł energii od lat odgrywa biomasa aczkolwiek również energia słoneczna, wodna, czy wiatrowa mają coraz większy wkład we wzroście wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE) w skali kraju. Pomimo wzrastającej popularności ciepłowni geotermalnych, a także ośrodków rekreacyjnych, balneologicznych, czy leczniczych wykorzystujących wody termalne, energia geotermalna zajmuje marginalną pozycję w porównaniu do innych odnawialnych źródeł energii. Świadczyć o tym mogą wyniki Głównego Urzędu Statystycznego, które dowodzą iż udział energii geotermalnej nie osiągnął do tej pory nawet 1%, podczas gdy sektor biopaliw stałych wynosi obecnie ok. 82% produkcji energii z OZE [1].

Energia geotermalna w Polsce związana jest głównie z ciepłownictwem, czego dowodem mogą być obecnie funkcjonujące ciepłownie geotermalne zlokalizowane na terenie kraju (rys.1) są to:

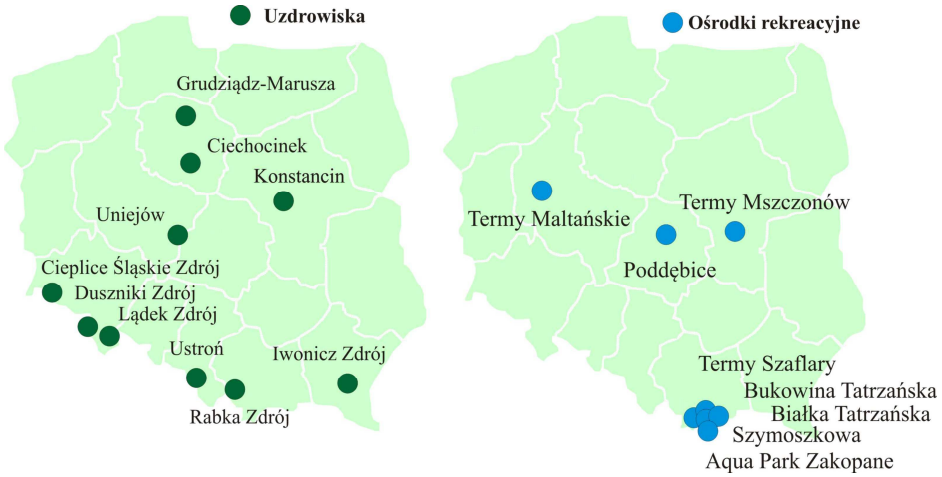
- PEC Geotermia Podhalańska SA (największy Polski zakład ciepłowniczy),
- Geotermia Pyrzyce Sp. z o.o.,
- Geotermia Mazowiecka SA,
- Geotermia Uniejów Sp. z o.o.,
- Geotermia Stargard Szczeciński (obecnie G-Term Energy),
- Geotermia Poddębice Sp. z o.o.



Rys.1 Lokalizacja funkcjonujących ciepłowni geotermalnych na obszarze Polski (na podstawie [3])

Fig.1 Location of geothermal heating plants operating in the Polish territory (based on [3])

Ciepłownie te korzystają głównie z nowych otworów wiertniczych, w mniejszym stopniu z zrekonstruowanych otworów archiwalnych, wykonywanych w Polsce w latach 1958–1995 w celach badawczych. Dziś wykorzystywane są z powodzeniem do eksploatacji bądź zatłaczania eksploatowanych wód podziemnych czego przykładem może być otwór eksploatacyjny w Mszczonowie oraz jeden z otworów chłonnych w Uniejowie [2]. Biorąc pod uwagę wysokie koszty wykonania otworów wiertniczych, rekonstrukcja otworów archiwalnych staję się niekiedy korzystną (pod kątem finansowym) alternatywą dla inwestycji związanych z wydobyciem i eksploatacją wód podziemnych. Nie zawsze jednak rekonstrukcja jest możliwa, a koszty rekonstrukcji starych odwiertów potrafią przewyższyć koszty wykonania nowych obiektów [2].



Rys.2. Lokalizacja funkcjonujących uzdrowisk oraz ośrodków rekreacyjnych na obszarze Polski wykorzystujące wody termalne (na podstawie [3])

Fig.2. Location of operating spas and recreational centers utilizing thermal water in Poland (based on [3])

Obok zakładów ciepłowniczych wykorzystujących wody podziemne duże znaczenie odgrywają również ośrodki rekreacyjne, balneologiczne i lecznicze korzystające z wód termalnych. Obecnie na terenie kraju zlokalizowanych jest 10 uzdrowisk (rys. 2) nowo otwartymi obiektami są uzdrowisko w Maruszy (od 2009 r.), uzdrowisko Rabka Zdrój (od 2011 roku), oraz uzdrowisko Uniejów od 2012 roku [3]. Pięć z ośmiu funkcjonujących obecnie ośrodków rekreacyjnych (rys. 2) zlokalizowanych jest na Podhalu. Pozostałe trzy ośrodki zlokalizowane są na Niżu Polskim są to Termy Mszczonowskie, baseny termalne w Poddębicach oraz Termy Maltańskie [3].

Niewątpliwy wykład we wzroście energii geotermalnej mają również systemy niskotemperaturowe oparte na instalacjach wykorzystujących pompy ciepła, są to instalacje różnych typów tj. woda/woda, woda/solanka, kolektor pionowy, bądź poziomy. Biorąc pod uwagę badania przeprowadzone do tej pory w roku 2012 ilość zainstalowanych pomp ciepła wykorzystujących ciepło geotermalne osiągnęło 30 tys. sztuk co w przeliczeniu na moc dało ok. 330 MWt i 1700 TJ ciepła [3].

2. Bariery wykorzystania energii geotermalnej

2.1. Warunki termiczne i parametry wód podziemnych

W Polsce najbardziej perspektywicznymi pod kątem pozyskiwania energii geotermalnej są utwory mezozoiku, paleozoiku od kambru do kredy [4]. Największy potencjał geotermalny występuje na obszarze Niżu Polskiego, a także w Karatach i Zapadlisku przedkarpackim oraz lokalnie w Sudetach [5]. Do parametrów zbiornikowych, które w największym stopniu decydują o opłacalności inwestycji związanych z energią geotermalną należą przede wszystkim temperatura, wydajność, a także mineralizacja wód podziemnych. Nie mniejsze znaczenie ma głębokość poziomu wodonośnego warunkująca cenę wykonania otworu wiertniczego [5].

Jednym z głównych problemów większości zakładów geotermalnych jest inkrustacja strefy przyodwiertowej związkami chemicznymi wytrącanymi z wysoko zmineralizowanych wód w skutek zmian warunków fizyko–chemicznych spowodowanych eksploatacją wody [6]. Jest to jeden z problemów występujących w Geotermii Pyrzyce. Ciepłownia geotermalna w Pyrzycach bazuje na czterech otworach geotermalnych: dwóch wydobywczych (GT–1 i GT–3) oraz dwóch zatłaczających (GT–2 i GT–4). Instalacja ujmuje wody dolno-jurajskie z drobnoziarnistych, słabo zwięzłych piaskowców warstw miechowskich, zalegających na głębokości 1429–1600 m. Jest to wysoko zmineralizowana solanka, osiągająca temperaturę 64°C w złożu i 61°C na powietrzu [6,7,8]. Na podstawie składu chemicznego i właściwości fizycznych klasyfikuje się ją jako 11,56% hipertermalną wodę chlorkowo–sodową, bromkową, jodkową, żelazistą, manganową, borową (materiały udostępnione przez Geotermię Pyrzyce Sp. z o.o.).

Istotnym problemem pojawiającym się przy eksploatacji wód termalnych jest korozja elementów konstrukcyjnych odwiertów oraz ich wyposażenia spowodowane głównie chemiczną agresywnością wody [9]. Agresywność wody związana jest min. z obecnością CO_2 i H_2S (gazy kwaśne), rozpuszczonych w wodzie, jak również obecność jonów chlorkowych, mających wpływ na pH wody, a niekiedy obecność drobnoustrojów. Takie warunki mogą prowadzić nie tylko do korozji elementów stalowych, ale również do korozji kamienia cementowego poza rurami okładzinowymi oraz korków cementowych [10,9]. Największą agresywność charakteryzują wody posiadające znaczne ilości siarczanów, chlorków, jonów amonowych, agresywnego CO_2, wody o niskim pH oraz różnego rodzaju solanki [11]. Na podstawie wyników analiz fizyko–chemicznych udostępnionych przez Geotermię Pyrzyce Sp. z o.o., scharakteryzowano wody termalne pod względem ich agresywności. W przypadku wysoko zmineralizowanej solanki z ujęć w Pyrzycach mamy do czynienia z silną agresywnością siarczanową (1200 mg SO_4/dm^3), słabą agresywnością amonową (21,7 mg NH_4^+/dm^3) i słabą/średnią agresywnością kwasową (pH=6). Klasyfikacja wód termalnych została przedstawiona w tabeli 1.

Tabela 1. Rodzaje i typy agresywności wody z ujęcia Pyrzyce (na podstawie [11])

Table 1. Kinds and aggressiveness types of water from the borehole in Pyrzyce (based on [11])

	Rodzaj i typ agresywności wody					
	siarczanowa		***amonowa***		***kwasowa***	
	Zawartość					
	Wartości graniczne siarczanów [mg/l SO_4^{2-}]	Stężenia siarczanów z ujęcia w Pyrzycach [mg/l SO_4^{2-}]	Wartości graniczne azotu amonowego [mg/l NH_4^+]	Stężenia azotu amonowego z ujęcia w Pyrzycach [mg/l NH_4^+]	Wartości graniczne pH	Stężenia pH z ujęcia w Pyrzycach
NIE AGRESYWNE	< 250		< 15		> 7	
SŁABO AGRESYWNE	250 – 500		**15 - 30**		**7 - 6**	
ŚREDNIO AGRESYWNE	500 – 800	**1200***	30 – 60	**21,7****	6 – 5	**6,0***
SILNIE AGRESYWNE	**800 - 1200**		60 – 100		5 – 4	
BARDZO SILNIE AGRESYWNE	> 1200		> 100		< 4	

** analiza przeprowadzona przez firmę MARCOR na obiekcie Geotermii*
*** analiza laboratoryjna przeprowadzona w laboratorium WIOŚ w Szczecinie*

Podczas cyklu technologicznego solanka wydobywana z otworów GT–1 i GT–3 wykazuje tendencje do wytrącania osadów. Głównymi składnikami osadu są: tlenki (Fe_2O_3), halogenki (NaCl), siarczki, siarczany i inne. Kolmatacja może powodować trudności związane z zatłaczaniem wody termalnej do warstwy z której została pobrana [8]. Z analiz przeprowadzonych przez Biernata i in. [7,8], wynika, że głównymi przyczynami spadku wydajności zatłaczanych wód są:

- zmiany temperatury podczas eksploatacji wód termalnych (gwałtowne obniżanie temperatury powoduje wytrącanie osadów w postaci siarczanów żelaza i krzemionki),
- zmiany odczynu pH (wzrost odczynu wody podczas eksploatacji powoduje spadek rozpuszczalności soli i tlenków żelaza),
- zmiany ciśnienia podczas eksploatacji (obniżenie ciśnienia powoduje rozprężenie wody termalnej, co w konsekwencji prowadzi do uwolnienia części rozpuszczonego CO_2 i wzrostu pH),
- zmiany stężenia CO_2 (powodujące zmiany pH wody termalnej),
- zmiany potencjału redox (wzrost potencjału redox powoduje strącanie tlenków żelaza).

Kolejną barierą wykorzystania wód termalnych w instalacjach geotermalnych jest agresywny charakter ujmowanych wód oraz skłonność do wytrącania minerałów w postaci osadów [14]. W niniejszej pracy oceny korozyjności wód termalnych oraz oszacowanie stopnia agresywności przeprowadzono dla wód termalnych ujmowanych odwiertami Bańska IG–1 i Bańska PGP–1 na podstawie danych otrzymanych bezpośrednio od PEC Geotermii Podhalańskiej. Charakterystykę uzyskanych wyników przedstawia tabela 2–3.

Do najważniejszych wskaźników jakości wody decydujących o jej korozyjności należą: pH, agresywny dwutlenek węgla, zasadowość ogólna, tlen rozpuszczony, wapń oraz substancje rozpuszczone. Do oceny korozyjności wody wykorzystuje się indeksy stabilności pozwalające na porównanie korozyjności różnych wód i oszacowanie stopnia agresywności. Powszechnie do oceny korozyjnego charakteru wody stosuje się indeksy Langeliera (LSI) oraz Ryznara (RSI) uwzględniające rzeczywistą wartość pH analizowanej wody i pH w stanie równowagi ze stałym węglanem wapnia (pHs) [12,13].

Wody z ujęć IG–1 i PGP–1 cechuje silnie redukcyjny charakter oraz wysoka twardość węglanowa (ponad 200 mg $CaCO_3$/l). Wody z otworu IG–1 cechuje temperatura rzędu 75–80^oC, natomiast PGP–1 rzędu 86^oC (informacje Ciepłownia Geotermalna Bańska Niżna). Wartość wskaźnika LSI=0 (dla tolerancja w zakresie – 0,5<LSI<0,5) oraz RSI=6,2–6,8 oznacza równowagę węglanowo–wapniową (nie powinny zachodzić korozja i skaling). Wody o LSI<0 oraz RSI>6,8 cechuje korozyjność kwasowęglowa, natomiast wartości LSI>0 i RSI<8,8 cechują wodę przesyconą względem węglanu wapnia, która może formować osad [13]. Analiza wyników przedstawionych w tabeli 3 wykazuje, że zarówno w otworze IG–1 jak i PGP–1, wartość współczynnika LSI>0 i RSI<8,8 oznacza wodę przesyconą względem węglanu wapnia ($CaCO_3$), w której może się formować osad.

Tabela 2. Wartości indeksów Langeliera (LSI–*Langelier Saturation Index*) i Ryznara (RSI–*Ryznar Stability Index*) w wodach termalnych z odwiertów Bańska IG–1 i PGP–1 (opracowanie własne na podstawie wyników analiz fizykochemicznych udostępnionych przez PEC Geotermia Podhalańska SA)

Table 2. Langelier index value (LSI–Langelier Saturation Index) and Ryznara index value (RSI–Ryznar Stability Index) in thermal waters from borehole Banska IG–1 and PGP–1 (own work based on the results of physicochemical analyzes provided by PEC Geothermal Podhalanska SA)

ODWIERT	**Data wykonania analizy**	**Ca [mg/l]**	**HCO_3 [mg/l]**	**Substancje rozpuszczone [mg/l]**	**pH**	**Indeks Ryznara (RSI)**	**Indeks Langeliera (LSI)**
Bańska IG–1	26.02.2013	134	289	2141	7,1	5,7	0,72
	5.06.2013	173	295	2228	7,2	5,2	1
	20.11.2013	174	300	2334	7,2	5,3	0,93
Bańska PGP–1	26.02.2013	134	289	2168	7,3	5,1	>1,0
	5.06.2013	172	275	2322	7,5	4,8	>1,0
	20.11.2013	168	286	2346	7,9	4,4	>1,0

Tabela 3. Klasyfikacja wód termalnych z odwiertów Bańska Bańska IG–1 i PGP–1 pod względem wartości indeksów Langeliera (LSI–*Langelier Saturation Index*) i Ryznara (RSI–*Ryznar Stability* Index) (na podstawie [20,21])

Table 3. Classification of thermal water from boreholes Banska Banska IG–1 and PGP–1 for the Langelier index (LSI–*Langelier Saturation Index*) and Ryznara index (RSI–*Ryznar Stability Index*) (based on [20,21])

ODWIERT	**Data wykonania analizy**	**Indeks Ryznara (RSI)**	**Klasyfikacja**	**Charakterystyka**	**Indeks Langeliera (LSI)**	**Klasyfikacja**	**Charakterystyka**
Bańska IG–1	26.02.2013	5,7	5<RSI<6	Słaba tendencja do wytrącana osadu węglanu wapnia $CaCO_3$	0,72	LSI>0	Woda ma skłonności do wytrącania $CaCO_3$ – jest nieagresywna
	5.06.2013	5,2			1		
	20.11.2013	5,3			0,93		
Bańska PGP–1	26.02.2013	5,1	5<RSI<6	Słaba tendencja do wytrącana osadu węglanu wapnia $CaCO_3$	>1,0	LSI>0	Woda ma skłonności do wytrącania $CaCO_3$ – jest nieagresywna
	5.06.2013	4,8	RSI<5	Silna tendencja do wytrącania osadu węglanu wapnia $CaCO_3$	>1,0		
	20.11.2013	4,4			>1,0		

3. Regulacje prawne

3.1. Informacje ogólne

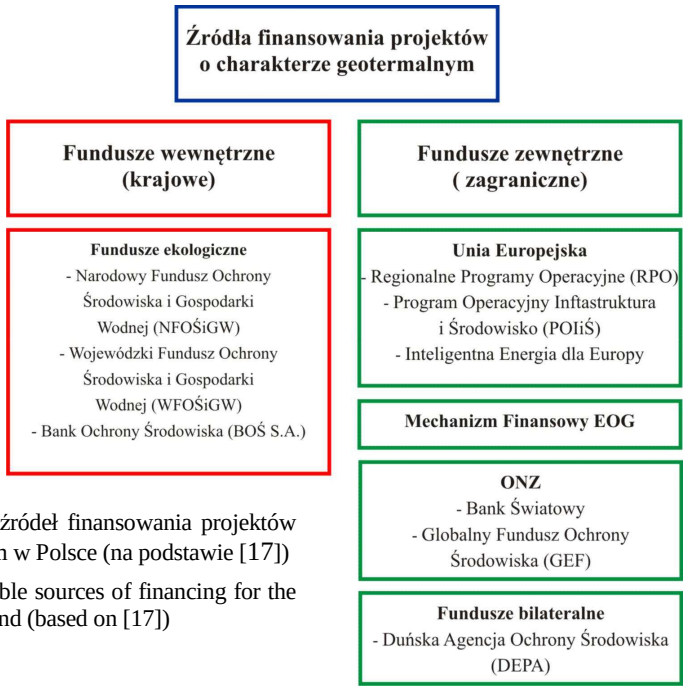
Najważniejszym aktem prawnym, w którym zawarte są wytyczne związane zarówno z procesem rozpoznania jak i pozyskania ciepła z wód podziemnych, jest Prawo Geologiczne i Górnicze (t.j. Dz. U. z 2011 r., nr 163, poz. 981 z późn. zm.)[22]. Prawo to definiuje również pojęcie wody termalnej jako wody podziemnej, która na wypływie z ujęcia posiada temperaturę nie mniejszą niż 20°C. Równie ważnym dokumentem, który określa możliwości wykorzystania wód podziemnych jest Prawo Wodne (t.j. Dz. U. z 2005 r., Nr 239, poz. 2019 z późn.zm.)[23], nie stosuje się go jednak w przypadku poszukiwania i rozpoznawania wód podziemnych w tym również solanek, wód leczniczych i termalnych oraz przy wprowadzaniu do górotworu wód pochodzących z odwodnienia zakładów górniczych. W przypadku systemu dla którego eksploatacja wód podziemnych przekroczy 10 m^3/h należy dodatkowo uzyskać decyzję o uwarunkowaniach środowiskowych bowiem w świetle Prawa Ochrony Środowiska (t.j. Dz. U. z 2008 r., nr 25, poz. 150 z późn. zm.)[24], taka inwestycja może mieć negatywny wpływ na środowisko naturalne. Ponad to wody termalne na mocy ustawy z dnia 2 lipca 2004 *o swobodzie działalności gospodarczej* (tj. Dz. U, z 2010 r., nr 220, poz. 1447 z późn. zm.)[25], a także zgodnie z Prawem Geologicznym-Górniczym zaliczane są do kopalin podstawowych co niesie ze sobą konieczność pozyskania koncesji w celu ich rozpoznania i wydobycia [22].

Biorąc pod uwagę wspomniane aspekty prawne w przypadku inwestycji związanych z pozyskiwaniem energii z wód podziemnych potencjalni inwestorzy muszą zmagać się z wieloma procedurami prawnymi związanymi z uzyskaniem koncesji na poszukiwanie i wydobywanie wód podziemnych w celach ciepłowniczych. Skomplikowane procedury związane są z dodatkowymi opłatami, przekładają się na wzrost kosztów samej inwestycji, a także na czas jej realizacji. Choć obecnie prawna sytuacja związana pozyskiwaniem zezwoleń odpowiednich organów państwowych, w ostatnich latach uległy znacznej poprawie, czego dowodem jest wprowadzenie jednostopniowego procesu koncesjonowania, zwolnienie z opłat za wykorzystane informacji geologicznych w calach projektowych (a w przypadku wydobycia zmniejszenie stawki do 1%), a także utrzymanie zerowej stawki za wydobycie wód termalnych, brak opłaty koncesyjnej oraz umowy za użytkowanie górnicze [15]. W dalszym ciągu brak jest zdecydowanych działań sprzyjających inwestycją o charakterze geotermalnym jak choćby ograniczenie ryzyka geologicznego jakie bierze na siebie potencjalny inwestor, wprowadzenie zielonych certyfikatów dla energii geotermalnej, obniżenie podatku VAT, czy wprowadzenie oddzielnych systemów wsparcia dla projektów geotermalnych [16].

3.2. Wsparcie finansowe

Biorąc pod uwagę wymogi stawiane przez Unię Europejską (UE) związane głównie z rosnącym zanieczyszczeniem środowiska, kraje członkowskie zobligowane są na mocy Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady nr 2009/28/WE z 23 kwietnia 2009 r. (Dz.U. UE. L. 140/16.5.6.2009)[26] stanowiącej część tzw. Pakietu Klimatyczno-Energetycznego 3x20 do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych o co najmniej 20% w porównaniu do roku 1990 r., zmniejszenie zużycia energii o 20%, oraz zwiększania udziału odnawialnych źródeł do 20% całkowitego zużycia energii brutto. W odpowiedzi na wydane przez UE dyrektywy określające jasno cele związane z ochroną środowiska, każdy z krajów członkowskich na przestrzeni ostatnich lat wypracował własne systemy wsparcia inwestycji związanych z alternatywnymi źródłami energii. Źródła finansowania w Polsce generalnie podzielić można na dwie grupy: środki wewnętrzne (krajowe) i zewnętrzne (rys. 3).

Większość obecnie dostępnych form wsparcia obejmuje inwestycje związane z głęboką geotermią należą do nich środki pochodzące z Narodowego Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej w Warszawie (NFOŚiGW). Dotacje bądź pożyczki pochodzące ze środków wewnętrznych oczekiwać można również ze strony Wojewódzkich Funduszy Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (WFOŚiGW), a także Banku Ochrony Środowiska (BOŚ) oferującego preferencyjne kredyty dla inwestycji o charakterze geotermalnym - w tym instalacji pomp ciepła. W przypadku funduszy zagranicznych instytucjami wsparcia jest Unia Europejska, fundusze pochodzące z Mechanizmów Finansowych Europejskiego Obszaru Gospodarczego (EOG), Organizacji Narodów Zjednoczonych (ONZ), szczegółowy podział przedstawiono na rysunku 3 [17].



Rys.3 Podział dostępnych źródeł finansowania projektów o charakterze geotermalnym w Polsce (na podstawie [17])

Fig.3 Distribution of available sources of financing for the geothermal projects in Poland (based on [17])

Ponieważ inwestycje o charakterze geotermalnym związane są przeważnie z dużymi nakładami finansowymi szczególnie w początkowych etapach inwestycji dlatego wiele spółek korzysta z dostępnych form wsparcia czego przykładem może być PEC Geotermia Podhalańska. Budowa ciepłowni geotermalnej na Podhalu sfinansowana została zarówno ze środków polskich jak i zagranicznych w tym 50% środków pochodziło z grantów finansowanych przez takie fundusze jak: PHARE (program wycofany w 2007 roku), NFOŚiGW, Ekofundusz, GEF, USAID, DEPA, 31% z kredytów zaciągniętych w Banku Światowym i Banku PKO BP, natomiast kapitał własny stanowił ok. 19% całej inwestycji [18].

Niewątpliwy wpływ na sytuacje słabego wykorzystania energii geotermalnej w Polsce (po mimo dobrych warunków termicznych), mają wysokie koszty związane z wykonaniem instalacji geotermalnej i towarzyszącej jej infrastruktury. Wysokie ryzyko geologiczne, które bierze na siebie potencjalny inwestor, a także koszty związane z wykonaniem odwiertów - najczęściej zarówno odwiertu produkcyjnego jak i zatłaczającego tzw. dubletu geotermalnego - nie sprzyja rozwojowi inwestycji o charakterze geotermalnym. Wysokie koszty inwestycji przekładają się w dalszym etapie na wysokie koszty energii, która następnie sprzedawana jest odbiorcą, a brak konkurencyjnych cen w porównaniu do konwencjonalnych źródeł nie wiąże się z dużym zainteresowaniem konsumentów. W ostatnich latach nadzieją na szybszy rozwój geotermii okazało się wejście na Polski rynek pomp ciepła, które wykorzystują źródła niskotemperaturowe do produkcji energii cieplnej jednak na mniejszą skalę niż ma to miejsce w przypadku ciepłowni geotermalnych takich jak choćby PEC Geotermia Podhalańska.

4. Podsumowanie

Rozpatrując warunki do dalszego rozwoju OZE na terenie kraju należy zdawać sobie sprawę iż nie na każdym obszarze możliwe jest wykorzystanie dowolnego źródła energii odnawialnej. Równie ważnym aspektem jest optymalny dobór rodzaju instalacji uwzględniający warunki panujące w danym rejonie. W przypadku energii geotermalnej na podstawie przeprowadzonych na przestrzeni ostatnich lat badań wynika iż najlepszymi obszarami dla rozwoju inwestycji geotermalnych jest obszar Niżu Polskiego [4], o czym świadczyć mogą funkcjonujące ciepłownie geotermalne zlokalizowane w miejscowościach: Pyrzyce, Stargard Szczeciński, Uniejów, Mszczonów, Poddębice, a także zlokalizowana na południu Polski wspomniana już PEC Geotermia Podhalańska zlokalizowana w Zakopanem. Na pozostałym obszarze temperatury wód nie gwarantują tak wysokich uzysków mocy jak w przypadku wspomnianych ciepłowni geotermalnych. Inną alternatywą związaną z wykorzystaniem energii geotermalnej jest geotermia niskotemperaturowa związana z instalacjami pomp ciepła wykorzystującymi jako dolne źródło ciepła, grunt, wody powierzchniowe, powietrze [19], w tym również wody pochodzące z wyrobisk górniczych (zarówno czynnych jak i zamkniętych).

Autorzy składają serdeczne podziękowania dla Pana Wojciecha Wartaka z PEC Geotermii Podhalańskiej oraz Pana Romualda Grabca z Geotermii Pyrzyce za informacje oraz cenne uwagi udzielane podczas pisania niniejszego artykułu.

Artykuł sfinansowany został dzięki środkom finansowym pochodzącym z umowy AGH 15.11.140.349.

Literatura

[1] Berent-Kowalska G., Kacprowska J., Gogacz I., Jurgaś A., 2012 – Energia ze źródeł odnawialnych w 2012 r. Wyd. Główny Urząd Statystyczny Departament Produkcji Ministerstwo Gospodarki Departament Energetyki.

[2] Biernat H., Noga B., Kosma Z. 2012 – Przegląd konstrukcji archiwalnych i nowych otworów wiertniczych wykonanych na niżu polskim w celu pozyskiwania energii geotermalnej. Modelowanie inżynierskie 44, s. 21-28, Gliwice.

[3] Kępińska B., 2013 – Wykorzystanie energii geotermalnej w Polsce, 2012-2013. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój Nr 1/2013.

[4] Górecki W. (red. nauk.) i in., 2011 – Atlas geotermalny Karpat Wschodnich, AGH KSE, Kraków.

[5] Kępińska B, 2011 – Energia geotermalna w Polsce - stan wykorzystania perspektywy rozwoju. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój Nr 1-2/2011.

[6] Biernat H., Kulik S., Noga B., Kosma Z., 2010 – Problemy inkrustacji przy zatłaczaniu wykorzystanych wód termalnych, Modelowanie Inżynierskie, Gliwice, nr 39, s. 7 – 12.

[7] Biernat H., Kulik S., Noga B., Kosma Z., 2011a – Problemy korozji przy zatłaczaniu wykorzystanych wód termalnych, Modelowanie Inżynierskie, Gliwice, nr 39, s. 13 – 18.

[8] Biernat H., Kulik S., Noga B., Kosma Z., 2011b – Próba zapobiegania kolmatacji geotermalnych otworów zatłaczających w wyniku zastosowania supermiękkiego kwasowania, Modelowanie Inżynierskie, Gliwice, nr 43, s. 59 – 66.

[9] Dubiel S., Luboń S., Luboń W., Wartak W., 2012 – Problemy rekonstrukcji otworów geotermalnych na przykładzie odwiertu Biały Dunajec PAN – 1, AGH Drilling Oil Gas, Kraków, v. 29, nr 1, p. 115 – 126.

[10] Banaś J., Mazurkiewicz B., Solarski W., 2007 – Korozja metali w wodach geotermalnych, Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój, IGSMiE PAN, Kraków, nr 2, s. 5 – 12.

[11] Macioszczyk A., Dobrzyński D., 2007 – Hydrogeochemia strefy aktywnej wymiany wód podziemnych, Wyd. PWN, Warszawa.

[12] Kotowski A., 2010 – Analiza hydrauliczna zjawisk wywołujących zmniejszenie przepływności rurociągów, Ochrona Środowiska, Environmental Pollution Control Jurnal of Polish Sanitary Engineer's Association, Wyd. Oddziału Dolnośląskiego Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych, Wrocław, nr 1, s. 27 – 32.

[13] Tomaszewska B., 2011 – Utylizacja wód termalnych, korozja i skaling. Wstępne wyniki realizacji projektu badawczo – rozwojowego, Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój, IGSMiE PAN, Kraków, nr 1 – 2, s. 403 – 412.

[14] Kleszcz A., Tomaszewska B., 2013 **–** Prognozowanie scalingu na przykładzie wód ujmowanych otworem Bańska PGP – 1, technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój, IGSMiE PAN, Kraków, nr 1, s. 115 - 122.

[15] Przybycin A., 2011 **–** Działania resortu w celu promowania geotermii. Technika Poszukiwań Geologicznych. Geotermia, Zrównoważony Rozwój nr 1-2.

[16] Kępińska B., Tomaszewska B., 2010 **–** Główne bariery wykorzystania energii geotermalnej w Polsce. Propozycje zmian. Przegląd geologiczny. vol. 58, nr 7.

[17] Górecki W. (red. nauk.) i in., 2013 **–** Atlas geotermalny Karpat Wschodnich, AGH KSE, Kraków.

[18] Długosz P., 2003 **–** Geotermia na Podhalu – 10 lat doświadczeń. Materiały konferencji „Systemy energetyczne wykorzystujące czyste, odnawialne źródła energii", Kraków.

[19] Sanner B., 2001 **–** Shallow geothermal energy w: GHC BULLETIN (http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull22-2/art4.pdf).

[20] Carrier Air Conditioning Company, 1965 – Handbook of Air Conditioning System Design. McGraw-Hill Books. New York.

[21] Rafferty K., 2000 – Scaling in geothermal heat pump systems. GHC BULLETIN, MARCH 2000 p. 11-15.

Ustawy i rozporządzenia

[22] Ustawa z dnia 9.06.2011 r. Prawo geologiczne i górnicze (t.j. Dz. U. z 2011 r. Nr 163, poz. 981 z późn.zm.).

[23] Ustawa z dnia 18.11.2001 r. Prawo wodne (t.j. Dz. U. z 2005 r., Nr 239, poz. 2019 z późn.zm.).

[24] Ustawa z dnia 23.01.2008 r. Prawo ochrony środowiska (t.j. Dz. U. z 2008 r., nr 25, poz. 150 z późn. zm. z późn.zm.).

[25] Ustawa z dnia 14.11.2010 r. o swobodzie działalności gospodarczej (t.j. Dz. U, z 2010 r., nr 220, poz. 1447 z późn. zm.).

[26] Dyrektywa 2009/28/EU w sprawie promowania wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych (Dz. U. UE. L. 140/16.5.6.2009).

MAIN BARRIERS OF THE GEOTHERMAL ENERGY UTILIZATION ON EXAMPLE OF POLAND SELECTED HEATING PLANTS

S u m m a r y

The dynamic development of renewable energy sources (RES) is associated both with increasing environmental pollution as well as the search for alternative solutions which can replace partially or entirely conventional energy sources such as coal, oil, or gas whose resources will be exhausted in the near or distant future. The state of renewable energy sources in Poland is mainly related to the sector of biomass, solar, hydro, and wind power. Despite the favorable thermal conditions geothermal energy (one of the RES sector) and the increasing popularity of geothermal plants, as well as recreation, medicinal , or therapeutic centers use underground water, occupies a marginal position in comparison to other renewable energy sources.

Low utilization of geothermal energy is affected by many factors, such as thermal conditions which low parameters can significantly hinder or even prevent the use of groundwater for heating purposes on a large scale. Negative impact on geothermal investments also have legal and financial issues associated with the construction of power plant and acquisition appropriate permissions, and sometimes the reluctance of potential customers to alternative solutions, which prices are still higher compared to conventional fuels such as gas, or coal.

In this paper, based on selected geothermal plants the main barriers affecting the current situation of weak utilization of geothermal energy in Poland were presented. This includes the current forms of financial support for investments, as well as the main legal aspects related to the implementation of projects of geothermal.

Keywords: geothermal energy, geothermal heating plants, renewable energy

Przesłano do redakcji: 23.02.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.85

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 577-586

Wojciech ZALEWSKI[1]

ZASTOSOWANIE ZAWIESINY LODOWEJ W KLIMATYZACJI

W pracy przedstawiono możliwości zastosowania zawiesiny lodowej w technice klimatyzacyjnej. Zawiesina lodowa jest mieszaniną kryształków lodu i cieczy, którą jest najczęściej woda, lub woda z dodatkiem środka obniżającego jej temperaturę zamarzania. Wytwarzana jest w różnego typu generatorach, z których do najczęściej stosowanych należą mechaniczne generatory skrobakowe. Wykorzystanie zawiesiny lodowej jako nośnika ciepła w systemach klimatyzacyjnych, w stosunku do systemów z wodą lodową wiąże się z wieloma korzyściami, takimi jak: zmniejszenie ilości chłodziwa w układzie, zmniejszenie średnicy rurociągów, zmniejszenie wielkości wymienników ciepła (nawet o 50%), przy zachowaniu takich samych wydajności. Zastosowanie zawiesiny lodowej w klimatyzacji pozwala na obniżenie temperatury powietrza pierwotnego o 5,5 K, co umożliwia redukcję jego strumienia o ponad 40%. Dodatkowym efektem związanym z niższą temperaturą powietrza pierwotnego są lepsze warunki komfortu, dzięki obniżeniu wilgotności względnej powietrza z 60 do 35%. Te efekty mają wpływ na działanie układu regulacji, gdyż przy takim samym obciążeniu cieplnym obiektu możliwe są wyższe nastawy temperatury o około 1,5 K. Podstawową zaletą instalacji z zawiesiną lodową jest możliwość skojarzenia jej z systemem akumulacji ciepła. Pozwala to na ograniczenie szczytowej mocy urządzenia ziębniczego o 50 - 80%, redukcję o 80% napełnienia instalacji czynnikiem ziębniczym oraz wykorzystanie nocnych taryf energii elektrycznej i zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych o 25 - 50%. Stosując zawiesinę lodową można kilkakrotnie zmniejszyć pojemność zbiornika akumulacyjnego.
W pracy omówiono również przykładowe instalacje klimatyzacyjne z zawiesiną lodową kompleksu budynków i kopalni złota.

Słowa kluczowe: nośnik ciepła, generator zawiesiny lodowej, akumulacja ciepła, system klimatyzacyjny

1. Wstęp

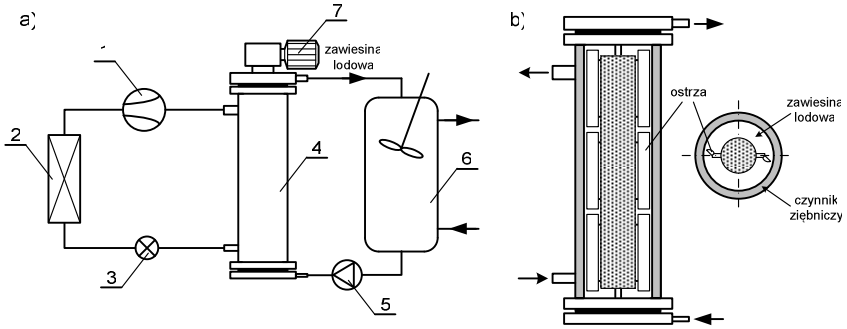
Zawiesina lodowa (ice slurry) zwana także lodem binarnym, lodem zawiesinowym lub ciekłym lodem jest mieszaniną cieczy bazowej i kryształków lodu o wymiarach do 0,5 mm. Cieczą bazową jest najczęściej woda lub woda

[1] Autor do korespondencji/corresponding author: Wojciech Zalewski, Politechnika Krakowska, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków, tel. 126283590, e-mail: wzalewski@pk.edu.pl

z dodatkiem środka obniżającego jej temperaturę zamarzania, najczęściej glikolu, alkoholu, rzadziej soli. Na jakość zawiesiny lodowej mają wpływ: rodzaj cieczy, z której jest tworzona, zawartość lodu w mieszaninie (udział masowy) oraz wielkość i kształt kryształków lodu. Wskazane jest, aby kryształki lodu miały globularny kształt i gładkie powierzchnie. Mniejsze jest wtedy ryzyko powstawania czopów, które mogłyby utrudnić przepływ zawiesiny w rurach. Udział masowy lodu w zawiesinie nie przekracza zwykle 40%.

Systemy wykorzystujące zawiesinę lodową w technice chłodniczej i klimatyzacyjnej zaczęły powstawać od początku lat osiemdziesiątych ubiegłego wieku. Obecnie spotyka się je w wielu krajach, między innymi w Japonii, Korei, RPA, Chinach, w krajach Europy Zachodniej. W klimatyzacji czynnik ten jest stosowany głównie w systemach klimatyzacyjnych dużych obiektów budowlanych (biurowych, handlowych i przemysłowych) oraz kopalń. W Polsce ta technologia chłodzenia nie znalazła jeszcze zastosowania. Spowodowane to jest przede wszystkim wysoką ceną generatorów zawiesiny lodowej i wynikającymi stąd wyższymi, niż w tradycyjnych systemach chłodzenia, kosztami inwestycyjnymi oraz brakiem wiedzy i doświadczenia ze strony inwestorów i projektantów w zakresie projektowania i eksploatacji instalacji z zawiesiną lodową.

Zawiesiny lodowe wytwarzane są za pomocą tzw. generatorów zawiesiny lodowej, różniących się zasadą działania i budową. Najczęściej stosowanymi tego typu urządzeniami są mechaniczne generatory skrobakowe. Wytwarzanie lodu ma miejsce w parowaczu generatora, w którym lód zeskrobywany jest z powierzchni chłodzonej przez obracające się ostrza, noże, pręty lub szczotki. Na rysunku 1 przedstawiono schemat skrobakowego generatora zawiesiny lodowej z parowaczem z ostrzami zeskrobującymi lód, osadzonymi na obracającym się wale.



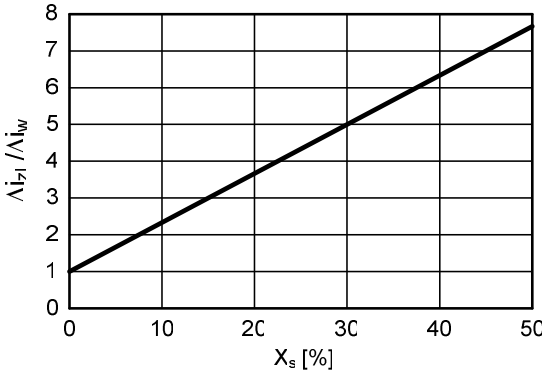
Rys. 1. Generator skrobakowy zawiesiny lodowej ze zbiornikiem akumulacyjnym, na podstawie [8]; a) schemat instalacji: 1 – sprężarka, 2 – skraplacz, 3 – zawór, 4 – parowacz, 5 – pompa, 6 – zbiornik akumulacyjny, 7 – silnik; b) parowacz

Fig. 1. Scraped ice slurry generator with the storage tank, based on [8]; a) schematic diagram of the plant: 1 – compressor, 2 – condenser, 3 – valve, 4 – evaporator, 5 – pump, 6 – storage tank, 7 – motor; b) evaporator

2. Charakterystyka zawiesiny lodowej jako chłodziwa

Przewaga zawiesiny lodowej nad tradycyjnymi chłodziwami wynika z dużej właściwej wydajności cieplnej, dużego współczynnika przewodzenia ciepła, neutralności wobec środowiska oraz możliwości wykorzystania zawiesiny lodowej nie tylko jako nośnika ciepła, ale także jako medium akumulującego ciepło. Wadami zawiesiny lodowej w stosunku do innych chłodziw są: większa lepkość, skłonność do zbrylania się oraz zmienność w czasie właściwości reologicznych, spowodowana efektem „starzenia się" kryształków lodu.

Podstawową zaletą instalacji z zawiesiną lodową jest możliwość skojarzenia jej z systemem akumulacji ciepła. Pozwala to na ograniczenie szczytowej mocy urządzenia ziębniczego o 50 - 80%, redukcję o 80% napełnienia instalacji czynnikiem ziębniczym oraz wykorzystanie taryf nocnych energii elektrycznej i zmniejszenie kosztów eksploatacyjnych o 25 - 50% [1]. Stosując zawiesinę lodową można kilkakrotnie (2 do 10 razy) zmniejszyć pojemność zbiornika akumulacyjnego. Porównanie wartości stosunku zmiany wartości właściwej wydajności cieplnej wodnej zawiesiny lodowej Δi_{zl} o różnym udziale masowym lodu x_s do zmiany entalpii właściwej wody Δi_w przy zmianie temperatury obu chłodziw o 6 K przedstawia wykres na rysunku 2.



Rys. 2. Porównanie właściwej wydajności cieplnej zawiesiny lodowej i wody (ΔT=6 K)

Fig. 2. Cooling capacity comparison between ice slurry and water (ΔT=6 K)

Większa właściwa wydajność cieplna zawiesiny lodowej w stosunku do tradycyjnych czynników pośredniczących umożliwia zmniejszenie strumienia masy zawiesiny i redukcję nawet o 50% średnic rur i prędkości przepływu. Wpływa to na obniżenie kosztów instalacji oraz ograniczenie średnio do 12,5% zużycia energii związanej z transportem chłodziwa [3].

Tabela 1 zawiera porównanie średnic wewnętrznych rur dla przepływu wody (0% zawartości lodu) i wodnej zawiesiny lodowej, zapewniających transport strumienia ciepła 10 lub 250 kW przy stałej temperaturze zawiesiny (ΔT = 0) oraz przy zmianie temperatury chłodziw o 6 i 12 K. Wartości średnic rur odpowiadają prędkości przepływu czynników równej 1 m/s.

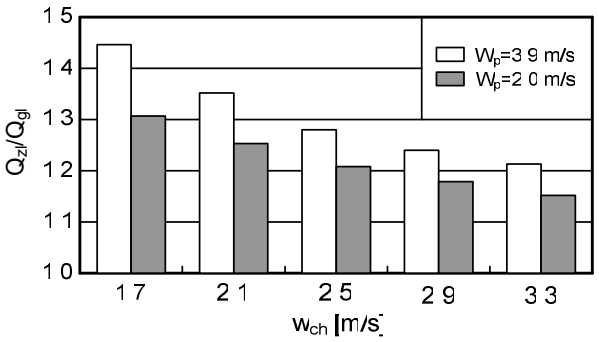
Tabela 1. Porównanie średnicy rur dla wody i wodnej zawiesiny lodowej (dla prędkości przepływu 1 m/s)

Table 1. Pipes diameter comparison for water and water ice slurry (for flow velocity 1 m/s)

Strumień ciepła [kW]	**Zmiana temp. ΔT, [K]**	**Zawartość lodu, [%]**				
		0	**10**	**20**	**30**	**40**
		Średnica rury, [mm]				
10	0	-	20	14	11	10
	6	22	15	12	10	9
	12	16	12	10	9	8
250	0	-	98	69	56	49
	6	112	74	59	50	45
	12	79	62	52	46	42

W odróżnieniu od chłodziw konwencjonalnych, praktycznie stała temperatura zawiesiny lodowej pozwala na uzyskanie większej różnicy temperatur czynników w wymiennikach ciepła, przez co możliwe jest stosowanie wymienników o mniejszych powierzchniach wymiany ciepła. Dzięki prawie stałej temperaturze topnienia lodu osiągane są większe sprawności wymienników ciepła i można uzyskać niższą temperaturę medium chłodzonego. Zastosowanie zawiesiny lodowej w klimatyzacji pozwala na obniżenie temperatury powietrza pierwotnego nawet o 5,5 K, co umożliwia redukcję jego strumienia o ponad 40%. Mniejsze przekroje kanałów wentylacyjnych zmniejszają koszty wykonania instalacji powietrza. Dodatkowym efektem związanym z niższą temperaturą powietrza pierwotnego (np. 7,5°C zamiast 13°C) są lepsze warunki komfortu, dzięki obniżeniu wilgotności względnej powietrza z 60 do 35%. Te efekty mają wpływ na działanie układu regulacji, gdyż przy takim samym obciążeniu cieplnym obiektu możliwe są wyższe nastawy temperatury o około 1,5 K [10].

Wykres na rysunku 3 obrazuje wpływ rodzaju chłodziwa na wydajność cieplną chłodnicy powietrza. Przedstawia on wyniki badań doświadczalnych wydajności cieplnej ożebrowanej chłodnicy powietrza zasilanej wodnym roztworem



Rys. 3. Wartości stosunku wydajności ciepl-nych chłodnicy powietrza (Q_{zl}/Q_{gl}) w funkcji prędkości przepływu chłodziwa, na podstawie [5]

Fig. 3. The values of cooling capacity ratio (Q_{zl}/Q_{gl}) as a function of coolant flow velocity in the air cooler, based on [5]

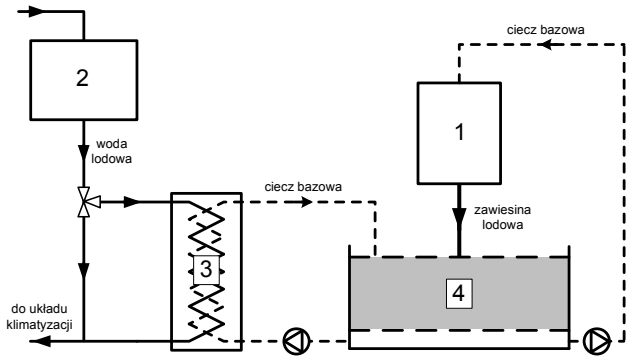
glikolu etylenowego (Q_{gl}) i zawiesiną lodową utworzoną na bazie roztworu alkoholu etylowego (Q_{zl}) w funkcji prędkości przepływu chłodziwa w_{ch}, dla różnych prędkości przepływu powietrza w_p przez wymiennik. Z wykresu wynika, że wydajność wymiennika zasilanego zawiesiną lodową jest większa o 15 do 44%, w zależności od prędkości przepływu chłodziwa i powietrza [5]. Wzrost wydajności cieplnej chodnicy zasilanej zawiesiną w stosunku do chłodnicy zasilanej roztworem wodnym glikolu jest większy dla wyższych prędkości przepływu powietrza (w_p = 3,9 m/s), ponieważ wtedy większy jest wpływ współczynnika przejmowania ciepła po stronie chłodziwa na wartość współczynnika przenikania ciepła chłodnicy.

Cechą eksploatacyjną instalacji z zawiesiną lodową jest prosta regulacja polegająca na włączaniu i wyłączaniu pompy współpracującej z wymiennikiem ciepła. Pewnym niebezpieczeństwem w stosowaniu tego chłodziwa jest możliwość zatykania się instalacji i nierównomiernego rozdziału czynnika (należy unikać trójników i rozdzielaczy). Instalacje z zawiesiną lodową są wyposażane w dodatkowe pompy czynnika pomiędzy generatorem lodu i zbiornikiem akumulacyjnym. Także konieczność eliminacji segregacji lodu w zbiorniku akumulacyjnym za pomocą mieszadeł o mocy 25 - 70 W/m^3 zwiększa zużycie energii elektrycznej. Jednak dzięki obniżeniu szczytowej mocy urządzenia i zmniejszeniu mocy napędowej pomp obiegowych i wentylatorów uzyskuje się istotnie niższe koszty eksploatacyjne instalacji z zawiesiną lodową. Ważnym ograniczeniem w stosowaniu tego chłodziwa jest wysoka cena generatorów zawiesiny. Typowy czas amortyzacji instalacji z zawiesiną lodową wynosi od 2 - 4,5 lat [1]. Dla dużych instalacji o mocy powyżej 1 MW czas amortyzacji jest krótszy i wynosi około jeden rok.

3. Systemy klimatyzacyjne z zawiesiną lodową

Systemy klimatyzacyjne z zawiesiną lodową łączą zazwyczaj ze sobą dwie funkcje: produkcję zawiesiny lodowej i jej wykorzystanie do magazynowania energii (chłodu). System produkcji zawiesiny uruchamiany jest w okresie, gdy tańsza jest energia elektryczna (głównie w nocy), a w ten sposób zmagazynowany chłód wykorzystywany jest w okresie największego na niego zapotrzebowania (w dzień). Przykładowo, w systemie klimatyzacji obiektu o maksymalnym obciążeniu cieplnym wynoszacym 300 kW, dzięki akumulacji zimna możliwe jest zainstalowanie układu o mocy 75 kW, przy pojemności zasobnika zawiesiny lodowej 25 m^3.

Typowy system klimatyzacji składa się z trzech obiegów: obiegu czynnika ziębniczego (w generatorze), zawiesiny lodowej i wody lodowej. Zawiesina lodowa może pełnić funkcję czynnika pośredniczącego, krążącego między wymiennikiem wody lodowej i zbiornikiem akumulacyjnym. Woda lodowa chłodzona jest zawiesiną lodową w wymienniku wody lodowej i dostarczana następnie do układu klimatyzacji. Możliwe jest także bezpośrednie zasilanie ukła-

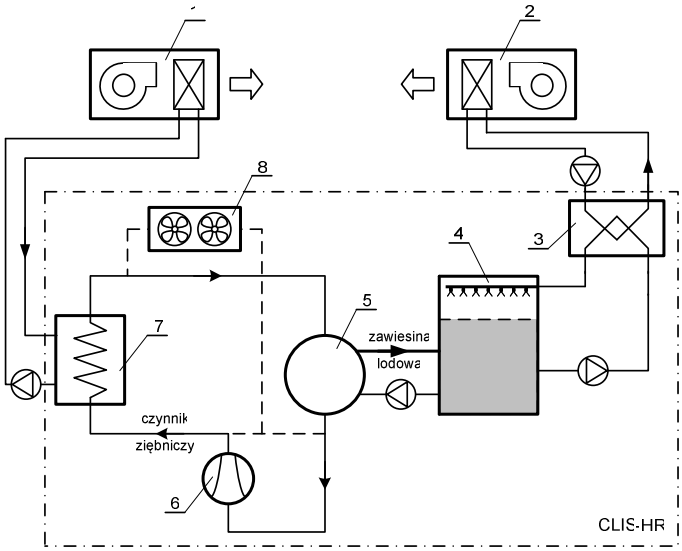


Rys. 4. Skojarzony układ chłodzenia wytwornicy wody lodowej i generatora zawiesiny lodowej, na podstawie [7]: 1 – generator zawiesiny lodowej, 2 – wytwornica wody lodowej, 3 – wymiennik ciepła, 4 – zbiornik zawiesiny lodowej

Fig. 4. A combined cooling system of an ice water generator and an ice slurry generator, based on [7]: 1 – ice slurry generator, 2 – ice-cold water generator, 3 – heat exchanger, 4 – ice slurry tank

du klimatyzacji zawiesiną lodową. Stosuje się również skojarzone układy wytwornicy wody lodowej i generatora zawiesiny lodowej jak na rysunku 4. W okresach mniejszego zapotrzebowania na zimno (np. w nocy) woda lodowa kierowana jest bezpośrednio do systemu klimatyzacji (z pominięciem wymiennika ciepła (3)), a generator (1) wytwarza w tym czasie zawiesinę lodową. W okresie dużego obciążenia cieplnego systemu woda lodowa schładzana jest dodatkowo w płytowym wymienniku ciepła (3), włączonym w obieg generatora zawiesiny lodowej. Układy skojarzone charakteryzują się niższymi kosztami eksploatacyjnymi w stosunku do innych rozwiązań z zawiesiną lodową [7]. W systemach klimatyzacyjnych zaleca się stosowanie zawiesiny lodowej o temperaturze -2°C.

Przykładem systemu klimatyzacji z akumulacją zimna w zawiesinie lodowej, stosowanego w klimatyzacji budynków jest system, którego schemat ideowy przedstawiono na rysunku 5. Nosi on nazwę CLIS-HR (Crystal Liquid Ice System whith Heat Recovery) [9]. Instalacja jest w stanie pokryć zapotrzebowanie na chłód budynku, a dzięki odzyskowi ciepła z generatora zawiesiny lodowej, pokrywa także zapotrzebowanie na ciepło. System CLIS-HR zastosowano w komleksie budynków Ritz Carlton Plaza w Osace (Japonia) o powierzchni użytkowej około 137 tyś m^2 i wysokości 181 m. Instalacja składa się z 31 skrobakowych generatorów zawiesiny lodowej o wydajności chłodniczej 260 kW każdy i z 16 zasobników zawiesiny lodowej mogących zakumulować łącznie około 81 tyś. kWh energii. Zastosowanie zawiesiny lodowej doprowadziło do obniżenia zużycia energii napędowej pomp i urządzeń w stosunku do konwencjonalnego systemu klimatyzacji o ponad 30% (z 12,5 W/m^2 do 8 W/m^2) [9].



Rys. 5. Schemat systemu klimatyzacji CLIS-HR, na podstawie [9]: 1 – klimatyzator (ogrzewa-nie), 2 – klimatyzator (chłodzenie), 3 – wymiennik ciepła, 4 – zasobnik zawiesiny lodowej, 5 – parowacz, 6 – sprężarka, 7 – skraplacz, 8 – powietrzny wymiennik ciepła

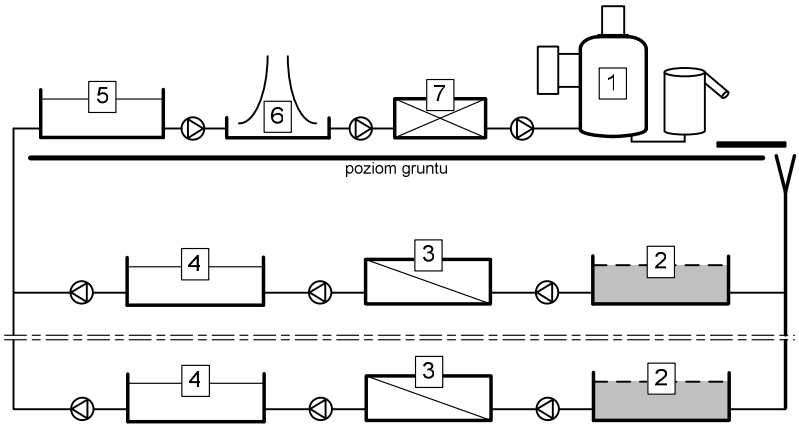
Fig. 5. Schematic diagram of the CLIS-HR air conditioning system, based on [9]: 1 – air conditioner (heating), 2 – air conditioner (cooling), 3 – heat exchanger, 4 – ice slurry storage tank, 5 – evaporator, 6 – compressor, 7 – condenser, 8 – air heat exchanger

Wykorzystanie zawiesiny lodowej w systemach klimatyzacyjnych nie ogranicza się tylko do klimatyzacji obiektów budowlanych. Sektorem wykorzystującym tę technologię jest także górnictwo, gdzie zawiesina lodowa jest stosowana w systemach chłodzenia powietrza w kopalniach. Ze względu na coraz większe głębokości kopalni oraz coraz większe długości rurociągów stosowanie tradycyjnych rozwiazań wykorzystujących wodę lodową stało się nieopłacalne. Dzięki temu, że zawiesina lodowa charakteryzuje się większą właściwą wydajnością cieplną, możliwe jest zmniejszenie strumienia przepływającego chłodziwa, a tym samym obniżenie kosztów jego transportu. Istotnym problemem zwiazanym ze stosowaniem wody lodowej jest wzrost temperatury wody wraz z głebokością, spowodowany przyrostem energii potencjalnej. Na rurociągu o długości 1000 m temperatura wody lodowej może wzrosnąć o ponad 2,3 K [1]. Przyrost temperatury chłodziwa wiąże się z koniecznością stosowanie większych chłodnic powietrza. W przypadku zastosowania zawiesiny lodowej przyrost energii potencjalnej powoduje topnienie kryształków lodu, przy tylko nieznacznie zmieniającej się temperaturze.

Wytwarzana na powierzchni zawiesina jest zazwyczaj dostarczana do wymienników ciepła znajdujących się pod ziemią. Tego typu systemy są z powodzeniem eksploatowane w Republice Południowej Afryki i w Chinach. W RPA zawiesinę lodową wykorzystuje się głównie w kopalniach o dużych

głębokościach (powyżej 3000 m). Takie instalacje znajdują się między innymi w kopalniach złota Mponeng koncernu Anglo Gold Ashanti. Dwanaście wytwornic zawiesiny lodowej zapewnia łącznie 36 MW mocy chłodniczej dla wyrobisk położonych na głębokości około 4000 m. Do produkcji zawiesin lodowych wykorzystuje się próżniowe generatory zawiesin lodowych. Wytwarzają one zawiesinę lodową o 70 - 80% zawartości lodu w ilości 5600 ton lodu na dobę. Zastosowanie zawiesiny lodowej w kopalni złota Mponeng pozwoliło na obniżenie temperatury powietrza w wyrobiskach do poziomu poniżej 27,5°C z pierwotnego poziomu 54,5°C. W Chinach zaczęto stosować zawiesinę lodową w kopalniach o mniejszych głębokościach, poniżej 1000 m.

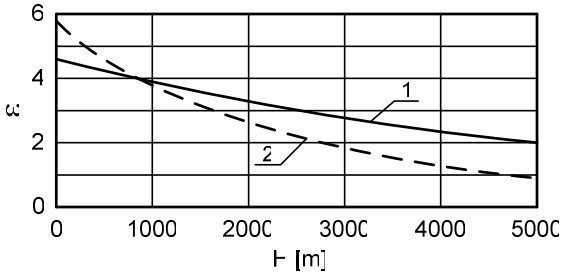
Na rysunku 6 przedstawiono schemat systemu dystrybucji zawiesiny lodowej w kopalni złota [2]. Do schładzania powietrza stosuje się wytworzoną na powierzchni zawiesinę lodową o 75% zawartości lodu, która transportowana jest przenośnikiem taśmowym i pionową rurą o dużej średnicy pod ziemię. Na skutek zysków ciepła zawartość lodu w zawiesinie maleje i w podziemnych zasobnikach lodu (2) wynosi około 67,5%. Po wykorzystaniu jej w odbiornikach zimna (3), powstała z zawiesiny woda magazynowana jest w podziemnych zbiornikach wody powrotnej (4) i kierowana na powierzchnię. Temperatura wody w zbiorniku (5) na powierzchni wynosi około 20°C [6]. Po wstępnym jej schłodzeniu do temperatury 3 – 6°C w chłodni kominowej (6), i w razie potrzeby w dodatkowej chłodnicy (7), powraca ona do próżniowych generatorów zawiesiny lodowej.



Rys. 6. Schemat systemu dystrybucji zawiesiny lodowej w kopalni złota, na podstawie [2]: 1 – próżniowy generator zawiesiny lodowej, 2 – zasobnik zawiesiny lodowej, 3 – odbiornik zimna, 4 – zbiornik wody powrotnej, 5 – zbiornik wody gorącej, 6 – chłodnia kominowa, 7 – chłodnica wody

Fig. 6. Schematic diagram of the ice slurry distribution system in a gold mine, based on [2]: 1 – vacuum ice maker, 2 – ice slurry dam, 3 – load, 4 – return water dam, 5 – hot water tank, 6 – cooling tower, 7 – water chiller

Z analizy przeprowadzonej w pracy [2] wynika, że zastosowanie instalacji z zawiesiną lodową może być zasadne również w kopalniach o mniejszych głębokościach. Porównanie wartości współczynnika wydajności systemu ε z zawiesiną lodową (1) i wodą lodową (2) dla różnych głębokości kopalni H przedstawiono na rysunku 7. Wartości tych współczynników wyrównują się już przy głębokości około H = 900 m. Dla większych głębokości efektywność systemu z zawiesiną lodową jest wyższa od efektywności instalacji z wodą lodową.



Rys. 7. Porównanie wartości współczynnika wydajności ε systemu z zawiesiną lodową (1) i wodą lodową (2), na podstawie [2]

Fig. 7. Coefficient of performance comparison for a system with ice slurry (1) and ice-cold water (2), based on [2]

4. Wnioski

Zawiesina lodowa może być stosowana w systemach klimatyzacyjnych jako zamiennik wody lodowej lub w systemach skojarzonych - razem z wodą lodową. Podstawową zaletą zawiesin lodowych jest duża właściwa wydajność cieplna oraz możliwość wykorzystania ich zarówno do transportu, jak i do akumulacji zimna. Głównym ograniczeniem w stosowaniu zawiesin w układach klimatyzacji jest stosunkowo wysoka cena generatorów. Z drugiej strony, zastosowanie rur o mniejszych średnicach, mniejszych wymienników ciepła i zbiorników akumulacyjnych wpływa na obniżenie kosztów inwestycyjnych instalacji. Możliwe jest także znaczne obniżenie, w stosunku do tradycyjnych systemów klimatyzacyjnych, kosztów eksploatacyjnych, szczególnie w przypadkach, gdy istnieje możliwość okresowego wykorzystywania energii elektrycznej o obniżonej cenie.

Przedstawione w artykule informacje dotyczące techniczno-ekonomicznych aspektów stosowania zawiesin lodowych w klimatyzacji oparte są na doświadczeniach innych, niż Polska, krajów. Jednoznaczna ocena celowości wykorzystania zawiesiny lodowej w polskich warunkach wymaga przeprowadzenia szczegółowej analizy, uwzględniającej nasze krajowe realia.

Literatura

[1] Bellas I., Tassou S.: Present and future applications of ice slurries, International Journal of Refrigeration, no. 28, 2005, pp. 115-121.

[2] Efrat T., Rott S.: 27MW industrial cooling applications based on the ide's energy efficient vacuum icemaker, 9th IIR Conference on Phase-Change Materials and Slurries for Refrigeration and Air Conditioning, Sofia, 2010.

[3] Egolf P.W., Kauffeld M.: From physical properties of ice slurries to industrial ice slurry applications, International Journal of Refrigeration, no. 28, 2005, pp. 4-12.
[4] Kauffeld M., Wang M.J., Goldstein V., Kasza K.E.: Ice slurry applications, International Journal of Refrigeration, no. 33, 2010, pp. 1491-1505.
[5] Mika Ł., Zalewski W.: Ocena możliwości zastosowania lodu zawiesinowego do zasilania oziębiaczy powietrza, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 3, 2004, s. 112-113.
[6] Mika Ł.: Zastosowanie zawiesiny lodowej jako chłodziwa w układach chłodzenia powietrza w kopalni, Szkoła Eksploatacji Podziemnej, Materiały Konferencyjne, Kraków 2014.
[7] Niezgoda-Żelasko B., Zalewski W.: Techniczne i ekonomiczne aspekty stosowania zawiesiny lodowej w systemach chłodniczych i klimatyzacyjnych, Design and Operation of Environmentally Friendly Refrigeration and AC Systems, Mat. Międzynarodowej Konferencji Chłodniczej, Poznań 2008, s. 151-158.
[8] Zalewski W.: Systemy i urządzenia chłodnicze, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2012.
[9] Sunwell. Thermal storage. Installation example, http://www.sunwell.com/thermal-storage.html [dostęp: 31 marca 2014 r.].
[10] Thermal energy storage for space cooling, US Department of Energy. http://www.eren.doe.gov/femp [dostęp: 31 marca 2014 r.].

APPLICATION OF ICE SLURRY FOR AIR CONDITIONING

S u m m a r y

The paper presents the possibility of using ice slurry in air conditioning. Ice slurry is a mixture of ice crystals and liquid, which is mostly water, or water with the addition of a freezing point lowering agent. It is produced in different types of generators, mostly in mechanical scraped generators. The benefits of using ice slurry as a coolant in air conditioning systems, when compared to systems fed witch ice-cold water, include reducing the amount of coolant in the system, reducing the diameter of the piping, reducing the size of the heat exchangers by up to 50%, while maintaining the same cooling capacity. The use of ice slurry in air conditioning makes it possible to lower primary air temperature by 5,5 K, which enables a reduction of its flux by more than 40%. An additional effect connected with the lower temperature of primary air is the improvement of comfort conditions, which results from reducing the relative humidity of air from 60 to 35%. These effects have an influence on the operation of the regulation system, since, with the same thermal load of a building, it is possible to set higher temperature by circa 1,5 K. The main advantage of ice slurry based installations is the ability to combine them with a thermal storage system. This makes it possible to reduce the peak power of the refrigeration appliance by 50 - 80%, as well as to reduce the refrigerant level in the installation by 80%, use night electricity tariffs and reduce operating costs by 25 - 50%. Using ice slurry also makes it possible to reduce storage tank capacity several times.

The paper also looks at air conditioning systems with ice slurry in a building complex and a gold mine.

Keywords: coolant, ice slurry generator, thermal storage, air conditioning system

Przesłano do redakcji: 07.04.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.86

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 587-594

Anna ZASTAWNA-RUMIN[1]
Katarzyna NOWAK[2]

BADANIE PRZEGRODY ZAWIERAJĄCEJ MATERIAŁ FAZOWO ZMIENNY PODDANEJ ZMIENNYM WARUNKOM TERMICZNYM W KOMORZE KLIMATYCZNEJ

W artykule podjęto tematykę możliwości wykorzystania w budownictwie płyt gipsowo kartonowych zawierających materiały fazowo zmienne. Przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych, które zostały przeprowadzone w komorze klimatycznej. Analizie poddana została lekka ściana szkieletowa, wykończona dwoma rodzajami okładziny wewnętrznej: z płyty gipsowo-kartonowej oraz płyty zawierającej materiał fazowo zmienny. Celem pomiarów była ocena przebiegu rozkładu temperatury oraz gęstości strumieni cieplnych na powierzchniach badanych przegród. Analizowano przypadek stałej temperatury w komorze zimnej przy równocześnie dynamicznie zmieniających się warunkach w komorze ciepłej. Przygotowano stanowisko badawcze, w którym nagrzewanie płyt okładzinowych następowało poprzez wzrost temperatury powietrza w pomieszczeniu a nie poprzez ich bezpośrednie nagrzewanie. Prezentowane wyniki pochodzą z jednego z kilku etapów badania płyt modyfikowanych materiałem fazowo zmiennym w komorze klimatycznej. Analizowano wpływ PCM podczas nagrzewania powietrza w szybkim i wolniejszym tempie. Przeprowadzone badania miały na celu również ocenę możliwości akumulacji energii w badanych płytach okładzinowych. W celu wyeliminowania wpływu różnicy parametrów termo - fizycznych pomiędzy badanymi materiałami na wartość akumulowanej energii dokonano pomiarów ich gęstości, grubości oraz współczynnika przewodzenia ciepła.

Słowa kluczowe: pojemność cieplna, materiał fazowo zmienny PCM, akumulacja cieplna

[1] Autor do korespondencji: Anna Zastawna-Rumin, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, zastawna.anna@gmail.com
[2] Katarzyna Nowak, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, kaskanowa@poczta.onet.pl

1. Wprowadzenie

1.1. Opis problemu

Opublikowana w maju 2010 roku Dyrektywa Parlamentu Europejskiego w sprawie charakterystyki energetycznej budynków zobowiązuje państwa członkowskie Unii do wprowadzenia po 2021 roku obowiązku realizacji nowopowstających budynków w standardzie niemal zero energetycznym.
Jednym z aktów prawnych implementujących postanowienia dyrektywy 2010/31/UE są zmiany zaproponowane przez Ministerstwo Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w rozporządzeniu w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Zmiany te dotyczą między innymi zaostrzenia wymagań izolacyjności cieplnej przegród zewnętrznych oraz ograniczenia maksymalnej wartości wskaźnika EP. Zwiększenie tych wymagań zostało zaplanowane stopniowo na lata 2014-2021.
Realizacja nowych budynków będzie musiała sprostać w/w wymaganiom i związanymi z nimi wymaganiami komfortu cieplnego pomieszczeń.

Problematycznym zagadnieniem staje się obecnie odpowiednia ochrona budynków przed przegrzewaniem w okresie letnim. Sytuacja ta coraz częściej ma miejsce w obiektach nowopowstałych, a w szczególny sposób dotyczy to obiektów budowanych z lekkich materiałów w technologii szkieletowej. Technologia ta z daje możliwość realizacji wyszukanej formy architektonicznej obiektu, pozwalając na krótki czas jej realizacji. Obecnie można również zauważyć tendencję do wykorzystywania w architekturze dużych powierzchni przeszkleń. Powyższe zabiegi wpływają pozytywnie na urozmaicenie architektury, lecz wiążą się z dużymi zyskami ciepła (głównie od nasłonecznienia) i jednocześnie znikomymi możliwościami akumulacji tegoż ciepła przez przegrody. Przekłada się to na ryzyko okresowego przegrzewania obiektu oraz duże wahania temperatury powietrza wewnętrznego w czasie zmian temperatury powietrza zewnętrznego. W budynkach o wymienionych rozwiązaniach architektoniczno- konstrukcyjnych coraz większym wyzwaniem staję się ich ochrona przed przegrzewaniem.

Najczęściej realizowanym rozwiązaniem tego problemu jest zastosowanie mechanicznego chłodzenia pomieszczeń. Ze względu na dużą energochłonność oraz wysokie koszty eksploatacyjne takiego rozwiązania poszukuje się innych środków zaradczych wykorzystujących możliwości konstrukcyjno – architektoniczne budynku. W budynkach lekkich można zwiększyć zdolność akumulacji przegród przy zachowaniu zalet konstrukcji szkieletowych poprzez zastosowanie tzw. materiałów fazowo - zmiennych (ang. Phase Change Materials).

Idea wykorzystania materiałów fazowo - zmiennych do akumulacji ciepła oparta jest na magazynowaniu energii w postaci ciepła utajonego. Odbywa się to poprzez przemianę fazową związków organicznych tj. parafiny, kwasów tłuszczowych bądź też nieorganicznych hydratów soli. W trakcie tej przemiany następuje akumulacja bądź oddawanie dużej ilości ciepła, któremu towarzyszy niewielka zmiana temperatury danego materiału fazowo – zmiennego.

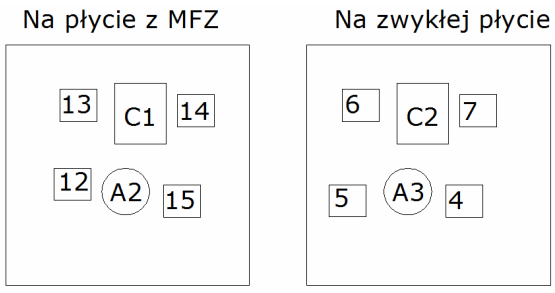
1.2. Opis stanowiska pomiarowego

Stanowisko pomiarowe zostało skonstruowane w zespole komór klimatycznych. Zespół ten składa się z dwóch komór (tzw. „komory ciepłej" i „komory zimnej") połączonych ze sobą badaną przegrodą. Zastosowane w obu komorach systemy instalacji grzewczych, chłodzących, wentylacyjnych oraz zainstalowana automatyka umożliwiają utrzymanie zadanych warunków stacjonarnych zarówno w „komorze ciepłej" jak i „zimnej". Istnieje możliwość również sterowania i regulacji zmian warunków cieplnych i wilgotnościowych według zadanego schematu.

Badana przegroda ma charakter lekkiej konstrukcji składającej się z drewnianego rusztu wypełnionego 15 centymetrową warstwą wełny mineralnej. Warstwę wykończeniową (umieszczoną po stronie komory ciepłej) stanowią płyty gipsowo – kartonowe. Na powierzchni wykończeniowej dodatkowo zamocowane zostały obok siebie dwie płyty o powierzchni 1 m^2 każda: zwykła płyta kartonowo – gipsowa oraz płyta z dodatkiem materiału ulegającego przemianie fazowej o nazwie handlowej SmartBoard 26 firmy BASF. W płycie zastosowano materiał organiczny o nazwie Micronal, który charakteryzuję się temperaturą topnienia 26^oC oraz ciepłem przemiany fazowej wynoszącym 110 kJ/kg (wg danych producenta). PCM stanowi około 30% udziału masowego płyty. Obie płyty mają zbliżoną do siebie zarówno gęstość jak i współczynnik przewodzenia ciepła. Równoległe umieszczenie płyt zapewniało utrzymanie identycznych warunków zewnętrznych podczas pomiarów i umożliwiało bezpośrednie porównywanie mierzonych wielkości.

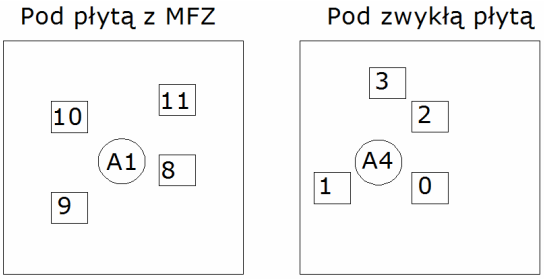
1.3. Aparatura

Wielkościami mierzonymi zarówno na powierzchni jak i między warstwami przegrody była temperatura i gęstość strumieni cieplnych. Na powierzchni każdej z przymocowanych płyt umieszczono po 4 przetworniki temperatury Pt 1000 oraz po dwa ciepłomierze (jeden okrągły o średnicy 33 mm, drugi kwadratowy o wymiarach 120x120 mm) (rys. 1). Pod powierzchnią przymocowanych płyt umieszczono również 4 przetworniki temperatury Pt 1000 oraz jeden okrągły ciepłomierz (rys. 2). Temperatura powietrza wewnątrz komór mierzona była przy użyciu czujników temperatury Pt 100 i Pt 1000. Rejestracja mierzonych wielkości odbywała



Rys. 1. Rozmieszczenie czujników na powierzchni płyt. 4,5,6,7,12,13,14, 15 – Pt 1000 czujniki temperatury, A2, A3 – okrągłe ciepłomierze ϕ=33mm, C1, C2 – kwadratowe ciepłomierze 120x120 mm

Fig. 1. Location of sensors on the plate surface. 4,5,6,7,12,13,14,15 – Pt 1000 temperature sensors, A2, A3 – circular heat meter 33mm dia, C1, C2 – square heat meter 120x120 mm



Rys. 2. Rozmieszczenie czujników pod powierzchnią badanych płyt: 0,1,2,3, 8,9,10,11 – Pt 1000 czujniki temperatury; A1, A4 – okrągłe ciepłomierze ϕ = 33 mm

Fig. 2. Location of sensors below the plates' surface: 0,1,2,3,8,9,10,11 – Pt 1000 temperature sensors; A1, A4 – circular heat meter 33mm dia.

się poprzez system zbierania danych Ahlborn Almemo podłączony do komputera. Dane pomiarowe zapisywane były przy wykorzystaniu systemu zbierania danych Data-Control 4.2. Dalsze przetwarzanie danych odbywało się w programie Excel.

2. Badania w komorze klimatycznej

2.1. Rysunki, wykresy i fotografie

Badania wykonywane były w trzech etapach. Wyniki badań z pierwszych dwóch etapów zostały przedstawione w publikacjach [6,7]. W artykule przeanalizowano przypadek badań przeprowadzonych w warun-kach stałej temperatury w komorze zimnej - 18°C oraz zmieniających się warunków w komorze ciepłej. W komorze tej następowały dynamiczne zmiany temperatury powietrza od 18°C do 30°C. Zmiany te polegały na szybkim wzroście temperatury w ciągu 1 godziny a następnie równie szybkim wychłodzeniu powietrza do temperatury wyjściowej 18°C. Po dwugodzinnej stabilizacji temperatury ponownie temperatura w komorze ciepłej wzrastała do 30°C. Ten dynamiczny cykl zmian powtarzany był przez okres jednej doby.

W czasie pomiarów obydwie płyty gipsowo-kartonowe podlegały oddziaływaniom tych samych warunków.

Ten etap badań miał na celu zaobserwowanie zmian temperatury na powierzchniach czołowych i tylnych płyt w sytuacji dynamicznie zmieniających się warunków wewnątrz pomieszczenia, kiedy po drugiej stronie przegrody panują stabilne warunki temperaturowe.

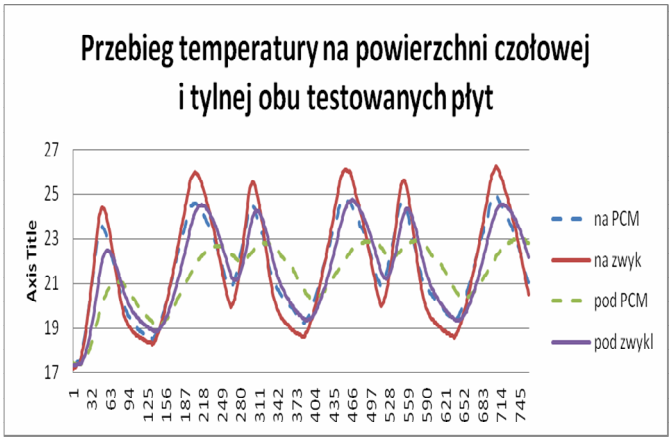
Istotną z punku widzenia komfortu cieplnego pomieszczeń jest informacja o różnicy pomiędzy wartością temperatury powietrza w pomieszczeniu i temperatury powierzchni wykończeniowych. Przedstawiony na rys. 3 wykres pozwala zaobserwować przebieg różnicy temperatury jaka występowała na powierzchniach czołowych zwykłej płyty gipsowo-kartonowej i płyty zawierającej PCM.

W procesie przyrostu temperatury powietrza temperatura na powierzchni płyty zawierającej PCM była maksymalnie o 1,42°C niższa niż na powierzchni płyty zwykłej. Ten korzystny dla płyty z PCM przebieg temperatury związany jest z większą możliwością akumulacji nadmiaru ciepła w tym materiale.

Podczas przeprowadzonych badań wyniki rejestrowane były co 2 minuty, co odzwierciedlają zaprezentowane w artykule wykresy (Rys. 3,4).

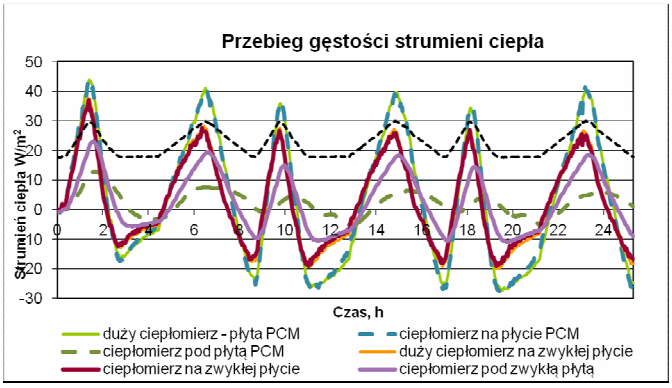
Istotnym aspektem związanym z możliwością magazynowania energii w materiale PCM był pomiar różnicy temperatury jaka występowała w danej chwili czasowej pomiędzy powierzchniami czołową i tylną w obydwu rodzajach płyt. Rysunek nr 3 przedstawia rozkłady temperatury dla omawianego przypadku.

Na rysunku nr 4, przedstawiono wyniki pomiarów gęstości strumieni cieplnych z ciepłomierzy umieszczonych zarówno na jak i pod powierzchniami badanych płyt. W przypadku płyty z dodatkiem materiału fazowo zmiennego maksymalne wskazania ciepłomierzy umieszczonych na powierzchni czołowej są znacznie wyższe niż w przypadku zwykłej płyty kartonowo gipsowej. Natomiast przebieg gęstości strumieni cieplnych pod powierzchniami badanych płyt wskazuje na mniejsze wartości szczytowe w przypadku płyty z PCM.



Rys. 3. Przebieg temperatury na powierzchni czołowej i tylnej obu testowanych płyt

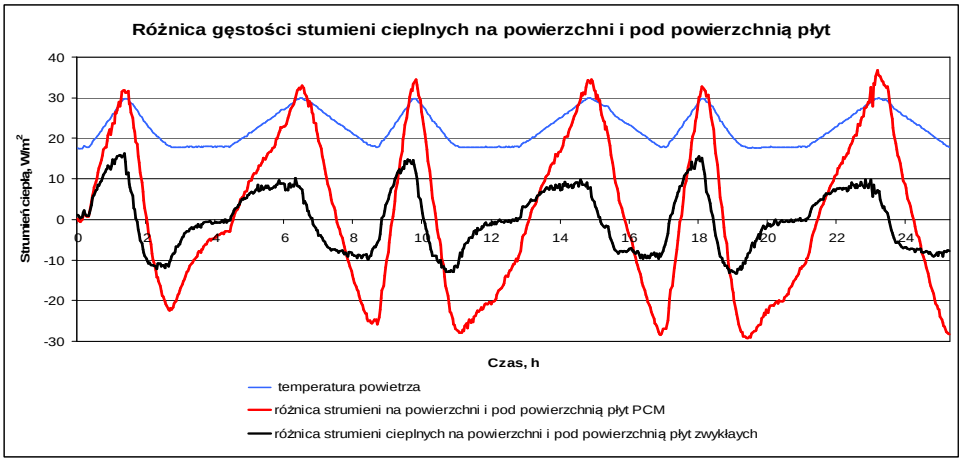
Fig. 3. Temperature measurement on the front and back surface of tested boards



Rys. 4. Przebieg gęstości strumieni cieplnych na powierzchni czołowej i tylnej obu testowanych płyt

Fig. 4. Thermal flux density measurement of on the front and back surface of tested boards

Świadczy to o większych możliwościach akumulowania energii w warstwie modyfikowanej materiałem fazowo zmiennym. Potwierdzeniem tego jest wykres nr 5 obrazujący różnice w każdym kroku czasowym wskazań ciepłomierzy zlokalizowanych na i pod powierzchnią płyty zwykłej i z dodatkiem PCM. Wynik całkowania tych wykresów wskazuje na zakumulowanie ponad 114% i 236% więcej energii w płycie z dodatkiem PCM odpowiednio podczas cykli w szybszym i wolniejszym tempie.



Rys. 5. Przebieg różnicy gęstości strumieni cieplnych na powierzchni czołowej i tylnej obu testowanych płyt

Fig. 5. Thermal flux density measurement of on the front and back surface of tested boards

Aby wykluczyć wpływ zróżnicowania innych właściwości badanych materiałów na prezentowane wyniki dokonano pomiarów następujących parametrów: gęstość płyt, grubość, współczynnik przewodzenia ciepła (w aparacie płytowym FOX) [6] oraz ciepło właściwe (przy użyciu aparatu ISOMET 2114 - Tabela 1). Wartości zawarte w tabeli 1 są wartościami średnimi z pomiarów przeprowadzonych przy temperaturze otoczenia 20,8^{o}C (poniżej temperatury przemiany fazowej). Pomierzone parametry nie wykazują znaczących różnic pomiędzy materiałami. Otrzymane wartości pozwalają na potwierdzenie, że różny przebieg zmian temperatury i gęstości strumienia ciepła w analizowanych płytach wynika z ich właściwości akumulacyjnych.

Tabela 1. Wyniki pomiarów ciepła właściwego badanych materiałów przy użyciu aparatu ISOMET 2114

Table 1. The results of measurements of the specific heat of the materials tested using ISOMET 2114

Parametry	**Płyta gipsowo – kartonowa z dodatkiem PCM**	**Tradycyjna płyta gipsowo - kartonowa**
Ciepło właściwe, J/m^{3}K	801325	862800

3. Wnioski

Otrzymane podczas pomiarów niższe wartości temperatury za płytą z PCM, przedstawione na rys. 3 są efektem absorbowania strumienia ciepła wnikającego w ten materiał i znacznie wolniejszego docierania do powierzchni tylnej płyty. W przypadku tak szybko następującym cyklom grzania i chłodzenia powietrza w komorze zarówno rozkład temperatury jak i gęstości strumieni cieplnych na powierzchniach płyt przebiegają odmiennie niż w przypadku stabilnego, dłużej trwającego etapu grzania i chłodzenia. Istotnym jest przebieg temperatury na powierzchni tylnej płyty zawierającej materiał fazowo zmienny – PCM. Przedstawiony na rys. 3 przebieg temperatury wyraźnie wskazuje na brak możliwości wychłodzenia.

W przeprowadzonym eksperymencie maksymalne wartości osiągane na powierzchni płyty zwykłej i powierzchni płyty z PCM są wyższe. Jest to związane z wyraźnie większą absorpcją ciepła dla materiałów fazowo zmiennych ale również faktem, iż maksymalna temperatura powietrza do której ogrzewana była komora wynosiła 30°C. Przy temperaturze przemiany wynoszącej 26°C jest to istotne.

Przebieg gęstości strumieni cieplnych oraz wynik ich całkowania potwierdzają dużo większe możliwości absorbowania nadmiaru ciepła płyty z materiałem fazowo zmiennym (płyta z PCM zakumulowała średnio ponad 181% więcej ciepła w porównaniu z płytą tradycyjną podczas wszystkich cykli). Wyniki wskazują na duży wpływ czasu w jakim następuje nagrzewanie oraz chłodzenie płyt na efektywność ich pracy.

Małe zróżnicowanie parametrów termo-fizycznych pomiędzy badanymi materiałami daje pewność, że różnice w przebiegu temperatury i gęstości strumieni cieplnych wynikają jedynie z możliwości akumulowania energii w postaci ciepła utajonego przemiany fazowej w płycie z dodatkiem PCM.

Przeprowadzone badania są badaniami wstępnymi, które są obecnie kontynuowane. Będą stanowić bazę porównawczą dla planowanych eksperymentów z zastosowaniem innych rodzajów materiałów PCM oraz różnych sposobów ich wkomponowania w struktury budynku.

Literatura

[1] Berrouga F., Lakhala E.K., Omaria M. El, Faraji M., Qarniac H. El.: Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall, Energy and Buildings 43 (2011) 3027–3035.

[2] Chi-ming Lai, R.H. Chen, Ching-Yao Lin, Heat transfer and thermal storage behaviour of gypsum boards incorporating micro-encapsulated PCM, Energy and Buildings 42 (2010) 1259–1266.

[3] Chwieduk D., Wybrane aspekty stosowania materiałów zmiennofazowych w przegrodach zewnętrznych w polskich warunkach klimatycznych, Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska z. 59 (2/2012/II).

[4] Heim D., Clarke JA., Numerical modelling and thermal simulation of PCM–gypsum composites with ESP-r. Energy Build, UK 2004;36(8):795–805.

[5] Nowak K., Zastawna-Rumin Anna.: Badanie i analiza przegrody z dodatkiem materiałów fazowo – zmiennych w warunkach niestacjonarnych, Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce 2013, 291-296.
[6] Oliver A., Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat, Energy and Buildings 48 (2012) 1–7.
[7] http://meteo.kdwd.webd.pl [dostęp: 31 maja 2014 r.].
[8] Rodriguez-Ubinas E., Arranz Arranz B., Vega Sánchez S., Neila González F.J, Influence of the use of PCM drywall and the fenestration in building retrofitting, Energy and Buildings 65 (2013) 464–476.
[9] Soares N., Costab J.J., Gasparb A.R., Santosc P.: Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, Energy and Buildings 59 (2013) 82–103.
[10] Wnuk R.: Magazynowanie ciepła, pozyskanego z energii promieniowania słonecznego, z wykorzystaniem materiałów fazowo-zmiennych, w budownictwie, II Konferencja SOLINA 2008, Innowacyjne Rozwiązania Materiały i Technologie dla Budownictwa.
[11] Wnuk R.: Bilans energetyczny pomieszczenia ze strukturalnym, funkcjonującym w cyklu dobowym, magazynem ciepła z materiałem fazowo-zmiennym, Czasopismo Techniczne 2009 Z. 5. Budownictwo Z. 1-B 269-277.
[12] Wnuk R., Jaworski M.: Badania charakterystyk cieplnych elementów budowlanych akumulujących ciepło zawierających materiały PCM (Phase Change Materials), Polska Energetyka Słoneczna 2 4/2010 1/2011 5-11.

EXAMINATION OF A WALL BARRIER CONTAINING PHASE CHANGE MATERIAL DURING VARIOUS THERMAL CONDITIONS INSIDE CLIMATE CHAMBER

S u m m a r y

This paper presents posibilities of using drywall containing alternating phase materials. The results of the experimental tests of component containing alternating phase material. The measurements of light frame wall, in two options: plate with internal drywall filling and plate containing phase variable material, were conducted in a climatic chamber. The temperature on the surface of plates for non-stationary temperature conditions in a climatic chamber were analyzed. The research stand simulated the conditions where the cladding plates were heated with the increase of internal air temperature rather than through the direct heating. The presented results are derived from one of several phases of the study panels alternating phase-modified material in a climate chamber. The influence of PCM on the surface temperature during fast and slower heating air was analysed.

The aim of the study was to assess both the possibility of accumulation of energy in the test panels and compare the temperature distribution on the surface of both drywall and drywall containing PCM. In order to eliminate the influence of different thermal parameters, between test materials, on energy storage densities there were measured material density, thickness and thermal conductivity.

Keywords: heat capacity, phase change material-PCM, thermal energy storage

Przesłano do redakcji: 12.12.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.87

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 595-602

Anna ZASTAWNA-RUMIN[1]
Katarzyna NOWAK[2]

BADANIE PRZEGRODY ZAWIERAJĄCEJ MATERIAŁ FAZOWO ZMIENNY W WARUNKACH IN SITU

W artykule przedstawiono wyniki badań eksperymentalnych lekkiej przegrody zawierającej warstwę z dodatkiem materiału fazowo zmiennego. Dla tradycyjnych materiałów budowlanych wartość ciepła właściwego nie przekracza 2 kJ/kgK. Materiały zmienno fazowe charakteryzują się znacznie większą efektywną pojemnością cieplną, która w danym zakresie temperatury (odpowiadającej przemianie fazowej) może być nawet kilkadziesiąt razy większa. Przekłada to się na możliwość akumulowania większej ilości energii cieplnej przez taką samą ilość zastosowanego materiału. Celem stosowania materiałów ulegających przemianie fazowej w elementach budowlanych jest znaczne zwiększenie pojemności cieplnej obiektu przy jednoczesnym zachowaniu niskiego ciężaru konstrukcji.
Pomimo dużego teoretycznego potencjału aplikacji PCM w elementy obiektów budowlanych problematyczne jest określenie ich rzeczywistej skuteczności. Charakteryzują się bowiem bardzo dużą wrażliwością na wiele czynników między innymi na warunki klimatyczne, w których zlokalizowany jest dany obiekt.
Badania wykonano dla lekkiej przegrody umieszczonej wewnątrz istniejącego pomieszczenia. Głównym celem pomiarów była weryfikacja korzystnego wpływu materiałów fazowo zmiennych na warunki termiczne w obiektach zlokalizowanych w polskich warunkach pogodowych. Przeprowadzone badania są kontynuacją analiz prowadzonych w komorze klimatycznej. Pomiar poszczególnych parametrów jest podstawą oceny wpływu materiałów fazowo zmiennych na możliwości akumulacyjne przegród w warunkach rzeczywistych.
Do tej pory wykonano liczne symulacje oraz badania w warunkach laboratoryjnych w komorze klimatycznej. Niezbędnym etapem jest weryfikacja tych rozwiązań w warunkach rzeczywistych (uwzględniająca również wpływ nasłonecznienia).

Słowa kluczowe: pojemność cieplna, PCM, akumulacja cieplna

[1] Anna Zastawna-Rumin, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: zastawna.anna@gmail.com
[2] Autor do korespondencji: Katarzyna Nowak, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: kaskanowa@poczta.onet.pl

1. Wprowadzenie

1.1. Opis zagadnienia

Dla tradycyjnych materiałów budowlanych wartość ciepła właściwego nie przekracza 2,4 kJ/kgK. Materiały zmienno fazowe charakteryzują się znacznie większą efektywną pojemnością cieplną, która w danym zakresie temperatury (odpowiadającej przemianie fazowej) może być nawet kilkadziesiąt razy większa. Przekłada to się na możliwość akumulowania większej ilości energii cieplnej przez taką samą ilość zastosowanego materiału. Celem stosowania materiałów ulegających przemianie fazowej w elementach budowlanych jest znaczne zwiększenie pojemności cieplnej obiektu przy jednoczesnym zachowaniu niskiego ciężaru konstrukcji.

Pomimo dużego teoretycznego potencjału aplikacji PCM w elementy obiektów budowlanych problematyczne jest określenie ich rzeczywistej skuteczności. Charakteryzują się bowiem bardzo dużą wrażliwością na wiele czynników - między innymi na warunki klimatyczne, w których zlokalizowany jest dany obiekt. Oznacza to, że rozwiązanie bardzo efektywne w jednym przypadku może być zupełnie nieprzydatne w innym obiekcie.

Do tej pory wykonano liczne symulacje oraz badania w warunkach laboratoryjnych w komorze klimatycznej. Analiza otrzymanych wyników jest zadowalająca i sugeruje możliwość efektywnego wykorzystania tego typu materiałów w budownictwie. Niezbędnym etapem jest weryfikacja tych rozwiązań w warunkach rzeczywistych (uwzględniająca również wpływ nasłonecznienia).

1.2. Cel podjętych badań

Przedmiot podjętych badań stanowi przegroda zawierająca warstwę z dodatkiem materiału fazowo - zmiennego. Głównym celem pomiarów była weryfikacja korzystnego wpływu materiałów fazowo zmiennych na warunki termiczne w obiektach zlokalizowanych w polskich warunkach pogodowych. Przeprowadzone badania są kontynuacją analiz przeprowadzonych w komorze klimatycznej. Pomiar poszczególnych parametrów jest podstawą do oceny wpływu materiałów fazowo zmiennych na możliwości akumulacyjne przegród w warunkach rzeczywistych.

1.3. Opis stanowiska pomiarowego

Eksperyment przeprowadzono w sali dydaktycznej Politechniki Krakowskiej w okresie przerwy wakacyjnej. Stanowisko badawcze składało się z lekkiej przegrody umieszczonej w nasłonecznionym miejscu. (Rys.1) Wielkościami mierzonymi były: natężenie promieniowania padające na powierzchnię przegród (mierzone solarymetrem przymocowanym do przegrody), gęstość strumienia ciepła na powierzchni i pod powierzchnią warstwy okładzinowej

(mierzone przy użyciu ciepłomierzy) oraz temperatura powierzchni poszczególnych warstw przegrody i powietrza wewnątrz pomieszczenia. Pomiar był przeprowadzany równocześnie dla przegrody z przymocowaną warstwą modyfikowaną materiałami fazowo zmiennymi oraz dla przegrody referencyjnej.

Aby wykluczyć wpływ zróżnicowania innych właściwości badanych materiałów na prezentowane wyniki dokonano pomiarów parametrów tj.: gęstości płyt, ich grubości, współczynnika przewodzenia ciepła (w aparacie płytowym FOX). [5]. Pomierzone parametry nie wskazują na znaczące różnice pomiędzy materiałami.

Badana przegroda ma charakter lekkiej konstrukcji składającej się z drewnianego rusztu wypełnionego 15 centymetrową warstwą wełny mineralnej. Warstwę wykończeniową stanowią płyty gipsowo – kartonowe. Na powierzchni wykończeniowej (z tradycyjnych płyt gipsowo kartonowych) dodatkowo zamocowane zostały obok siebie płyty: zwykła płyta kartonowo – gipsowa oraz płyty z dodatkiem materiału ulegającego przemianie fazowej w temperaturze 26 i 23°C. W płycie zastosowano materiał organiczny o nazwie Micronal, który charakteryzuje się ciepłem przemiany fazowej wynoszącym 110 kJ/kg (wg danych producenta) i stanowi około 30% udziału masowego płyty. Równoległe umieszczenie płyt zapewniało utrzymanie identycznych warunków zewnętrznych podczas pomiarów i umożliwiało bezpośrednie porównywanie mierzonych wielkości.

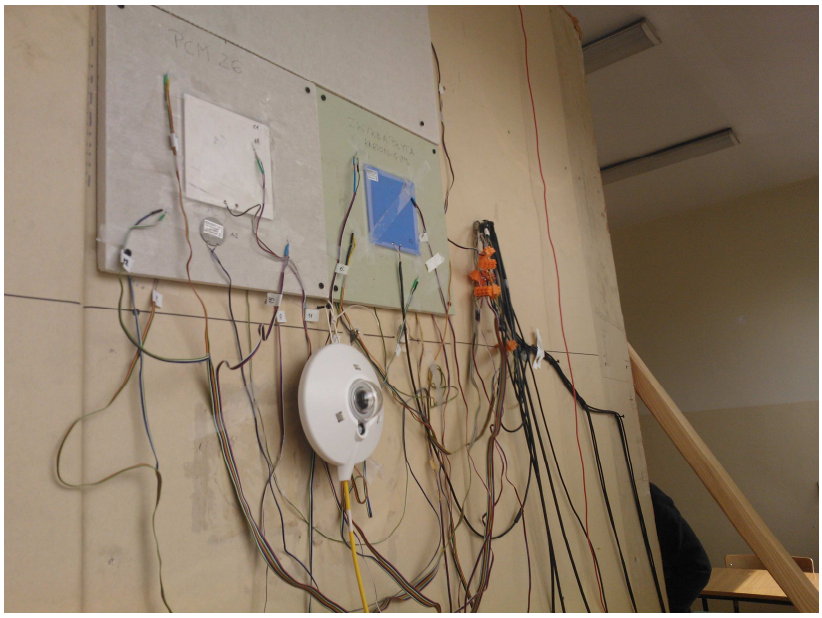


Rys. 1. Lokalizacja stanowiska badawczego wewnątrz pomieszczenia

Fig. 1. Location of a measuring position inside the premises

1.4. Aparatura

Na powierzchni każdej z przymocowanych płyt umieszczono przetworniki temperatury Pt 1000 oraz ciepłomierze (rys. 2). Temperatura powietrza wewnątrz pomieszczenia (w nie nasłonecznionym miejscu w pobliżu przegrody) mierzona była przy użyciu czujnika temperatury Pt 100. Dodatkowo mierzono solarymetrem natężenie promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni przegrody. Rejestracja mierzonych wielkości odbywała się poprzez system zbierania danych Ahlborn Almemo podłączony do komputera. Dane pomiarowe zapisywane były przy wykorzystaniu systemu zbierania danych Data-Control 4.2. Dalsze przetwarzanie danych odbywało się w programie Excel.



Rys. 2 Stanowisko pomiarowe z użytą aparaturą pomiarową (badana przegroda z płytami referencyjną i z dodatkiem PCM, na których umieszczono ciepłomierze oraz czujniki temperatury Pt 1000, poniżej widoczny solarymetr)

Fig. 2 Measuring position with the measuring apparatus (examined wall barrier with the reference board and the board containing PCM on which the heat meters and the temperature sensors Pt 1000 were placed, below - the solarymetr)

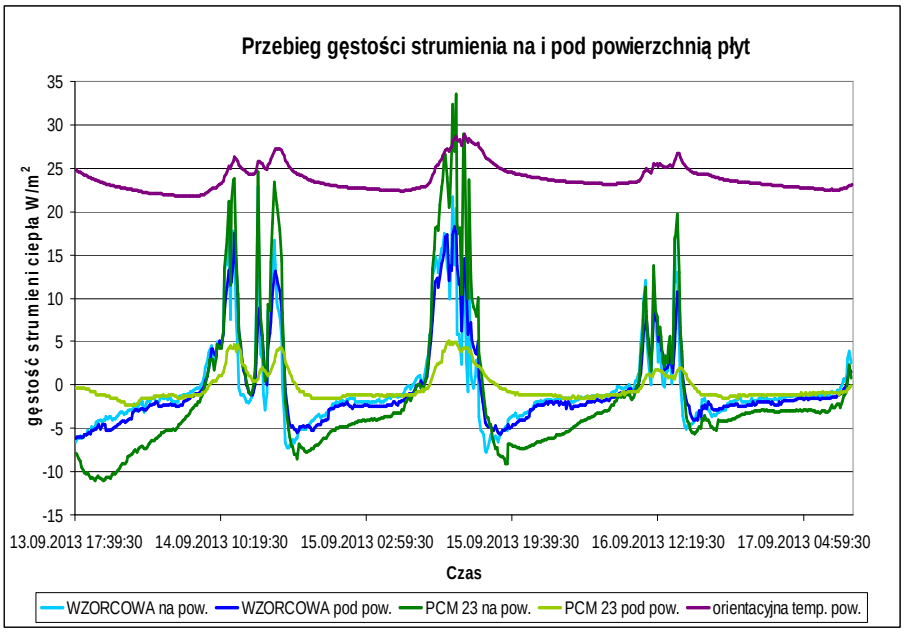
2. Wyniki pomiarów

2.1. Analiza otrzymanych wyników

W artykule przedstawiono wyniki z pomiarów przeprowadzonych w dniach 13-17.09.2013. W czasie pomiarów płyty gipsowo-kartonowe podlegały oddziaływaniom tych samych warunków temperaturowych, co umożliwia analizę porównawczą zastosowania materiałów tradycyjnych oraz modyfikowanych poprzez dodanie PCM.

Rysunek 3 przedstawia wyniki pomiarów gęstości strumieni cieplnych z ciepłomierzy umieszczonych zarówno na jak i pod powierzchniami badanych płyt.

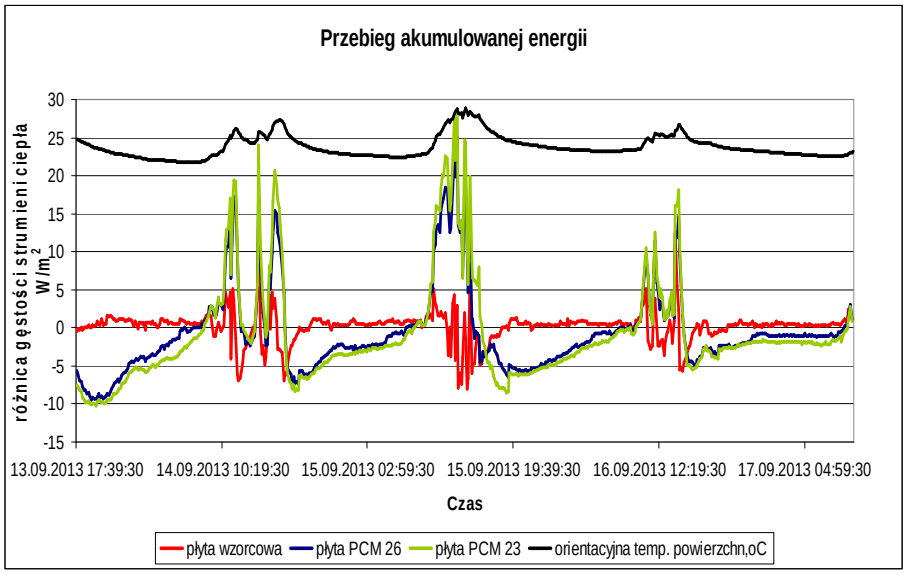
W przypadku płyty z dodatkiem materiału fazowo zmiennego maksymalne wskazania ciepłomierzy umieszczonych na powierzchni czołowej są znacznie wyższe niż w przypadku zwykłej płyty kartonowo gipsowej. Natomiast przebieg gęstości strumieni cieplnych pod powierzchniami badanych płyt wskazuje na mniejsze wartości szczytowe w przypadku płyty z PCM. W przypadku płyty referencyjnej przebiegi gęstości strumieni cieplnych zarówno na jak i pod powierzchnią płyt mają bardzo zbliżony przebieg, czyli prawie całkowity strumień



Rys. 3.Przebieg rozkładu gęstości strumieni cieplnych na i pod powierzchnią płyt gipsowo kartonowych

Fig. 3. Course of the densities of a thermal flux distribution on and under the surface of the plaster boards

ciepła wnikający na powierzchni czołowej jest przekazywany przez powierzchnię tylną do głębszych warstw przegrody. Wskazuje to na niewielką ilość magazynowanej energii cieplnej i świadczy o większych możliwościach akumulowania energii w warstwie modyfikowanej materiałem fazowo zmiennym. Potwierdzeniem tego jest rysunek 4 obrazujący różnice w każdym kroku czasowym wskazań ciepłomierzy zlokalizowanych na i pod powierzchnią płyty zwykłej i z dodatkiem PCM, czyli ilość magazynowanej w czasie energii cieplnej wewnątrz warstwy.



Rys. 4. Przebieg rozkładu gęstości strumieni cieplnych na i pod powierzchnią płyt gipsowo kartonowych

Fig. 4. Course of the densities of a thermal flux differences on and under the surface of the examined boards (distribution of the accumulated in time heat energy)

Wynik całkowania tych wykresów wskazuje na zakumulowanie odpowiednio ponad 4,99 i 6,25 razy większej ilości energii w płytach z materiałem fazowo zmiennym odpowiednio o temperaturze przemiany fazowej 26 i 23°C niż w płycie referencyjnej w analizowanym okresie czasu. W tabeli 1 zestawiono warunki klimatyczne w analizowanym okresie czasu - zarówno temperatura powietrza jak i nasłonecznienie osiągały umiarkowane wartości.

Tabela 1. Warunki klimatyczne w analizowanym okresie czasu, na podstawie [7]

Table 1 Climate conditions in the studied time, based on [7]

Data	Temperatura powietrza, ^{o}C max./min.	Godziny słoneczne	Max. całkowite natężenie promieniowania słonecznego W/m^2	Natężenie promieniowania kWh/m^2
13.09	18,3/10,3	2,1	812	2,6
14.09	18,8/9,5	2,2	904	2,6
15.09	23,4/14,2	2,9	835	3,3
16.09	21,1/14,4	0,4	916	1,7
17.09	15,0/7,6	0,0	269	0,7

2.2. Wnioski

Uzyskane wyniki całkowania strumienia gęstości cieplnego przejmowanego przez obydwie płyty w badanym okresie czasowym wskazują na dużo większe możliwości akumulacji ciepła przez płytę z materiałem fazowo zmiennym - ponad 4,99 dla PCM 26 i 6,25 dla PCM 23 razy większe niż dla płyty referencyjnej. Tak więc dla analizowanego okresu lepszą efektywność wykazuje materiał fazowo zmienny o temperaturze przemiany fazowej 23°C.

Należy zauważyć, że zarówno temperatura powietrza zewnętrznego jak i natężenie promieniowania słonecznego nie osiągają szczytowych wartości, które mogą wystąpić podczas lata - efektywność w takim przypadku może znacznie różnić się od uzyskanej w analizowanym okresie.

Bardzo dużą zaletą magazynowania ciepła w postaci ciepła utajonego przemiany fazowej jest bierność systemu nie wymagająca dodatkowych nakładów eksploatacyjnych. Jednakże rozwiązania te wiążą się z dodatkowymi niemałymi kosztami inwestycyjnymi. W związku z tym określenie rzeczywistej efektywności ich jest warunkiem niezbędnym dla ich powszechnego stosowania.

Literatura

[1] Berrouga F., Lakhala E.K., Omaria M. El, Faraji M., Qarniac H. El.: Thermal performance of a greenhouse with a phase change material north wall, Energy and Buildings 43 (2011) 3027–3035.

[2] Chi-ming Lai, R.H. Chen, Ching-Yao Lin, Heat transfer and thermal storage behaviour of gypsum boards incorporating micro-encapsulated PCM, Energy and Buildings 42 (2010) 1259–1266.

[3] Chwieduk D., Wybrane aspekty stosowania materiałów zmiennofazowych w przegrodach zewnętrznych w polskich warunkach klimatycznych, Zeszyty naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska z. 59 (2/2012/II).

[4] Heim D., Clarke JA., Numerical modelling and thermal simulation of PCM–gypsum composites with ESP-r. Energy Build, UK 2004;36(8):795–805.

[5] Nowak K., Zastawna-Rumin Anna.: Badanie i analiza przegrody z dodatkiem materiałów fazowo – zmiennych w warunkach niestacjonarnych, Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce 2013, 291-296.

[6] Oliver A., Thermal characterization of gypsum boards with PCM included: Thermal energy storage in buildings through latent heat, Energy and Buildings 48 (2012) 1–7.
[7] http://meteo.kdwd.webd.pl [dostęp 00.11.2014 r.].
[8] Rdriguez-Ubinas E., Arranz Arranz B., Vega Sánchez S., Neila González F.J, Influence of the use of PCM drywall and the fenestration in building retrofitting, Energy and Buildings 65 (2013) 464–476.
[9] Soares N., Costab J.J., Gasparb A.R., Santosc P.: Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, Energy and Buildings 59 (2013) 82–103.
[10] Wnuk R.: Magazynowanie ciepła, pozyskanego z energii promieniowania słonecznego, z wykorzystaniem materiałów fazowo-zmiennych, w budownictwie, II Konferencja SOLINA 2008, Innowacyjne Rozwiązania Materiały i Technologie dla Budownictwa.
[11] Wnuk R.: Bilans energetyczny pomieszczenia ze strukturalnym, funkcjonującym w cyklu dobowym, magazynem ciepła z materiałem fazowo-zmiennym, Czasopismo Techniczne 2009 Z. 5. Budownictwo Z. 1-B 269-277.

EXAMINATION OF A WALL BARRIER CONTAINING PHASE CHANGE MATERIAL IN SITU

S u m m a r y

The article presents the results of examination of a wall barrier containing phase change material layer. Specific heat of the traditional construction materials does not exceed 2 kJ/kgK. Phase change materials are characterised by a higher effective heat capacity which in a given temperature range can even increase by several dozens times. It in turn leads to the ability of accumulating higher amount of heat energy by the same amount of applied material. The aim of the PCM application in building components is to significantly increase heat capacity of a building without changing its low construction weight.

Despite the fact of high theoretical potential of PCM application in the elements of the premises, it is problematic to specify their real effectiveness. These materials are characterised by a high sensitivity to many factors such as climatic conditions in which specific object is located.
The examination was conducted for a wall barrier placed inside the premises. Main object of the measurements was the verification of a profitable influence of PCM on thermal conditions in the premises located in Poland. Conducted research is the continuation of completed evaluation performed in a climate chamber. The measurement of the specific parameters supports the analysis of PCM influence on the accumulation ability of wall barriers in the real conditions.

So far there have been many simulations and examinations conducted in a laboratory conditions in a climate chamber. Necessary stage is the verification of these solutions in real conditions (taking under consideration influence of the insolation).

Keywords: heat capacity, phase change material-PCM, thermal energy storage

Przesłano do redakcji: 20.06.2015 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.88

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 603-610

Anna ZASTAWNA-RUMIN[1]
Katarzyna NOWAK[2]

POMIAR WŁAŚCIWOŚCI CIEPLNYCH MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH PRZY ZASTOSOWANIU RÓŻNEJ APARATURY POMIAROWEJ – ANALIZA WYNIKÓW

Celem artykułu jest weryfikacja parametrów termicznych materiałów budowlanych otrzymanych przy użyciu dwóch różnych metod pomiarowych. Metody pomiarowe parametrów termicznych można podzielić na dwie zasadnicze grupy: metody stacjonarne (realizowane przy ustalonym strumieniu cieplnym) oraz metody niestacjonarne (realizowane przy nieustalonym strumieniu cieplnym). W artykule analizowano możliwość prowadzenia stosunkowo szybkich badań przy użyciu urządzenia przenośnego, którego działanie oparte jest na metodzie dynamicznej. Wyniki porównywano do wartości otrzymanych z pomiarów wykonanych metodą stacjonarną w bardzo dokładnym i rekomendowanym aparacie płytowy. Badaniom poddano próbki popularnie stosowanych materiałów docieplenniowych tj.: sztywnej pianki poliuretanowej, styropianu i wełny mineralnej (mat miękkich oraz twardych płyt) o grubościach 4 – 6 cm i 10cm. Analizowano także możliwość stosowania różnych rodzajów sond pomiarowych, które współpracują z urządzeniem przenośnym. Dużą zaletą urządzenia przenośnego jest możliwość jego użycia podczas badań polowych. Niestety przeprowadzona analiza wykazała, że w przypadku materiałów termoizolacyjnych dokładność tej metody można uznać za wysoką jedynie w przypadku warstw o grubości 10 cm. W przypadku cieńszych warstw materiału (ok.5 cm) uzyskane wyniki mogą być obarczone znacznym błędem. Na podstawie przeprowadzonych badań dla wąskiego zakresu materiałów termoizolacyjnych zaobserwowano, iż wyniki uzyskane z pomiarów wykonanych przy użyciu przyrządu Isomet są w większości przypadków wynikami zawyżonymi (w porównaniu z wynikami otrzymanymi z pomiarów w aparacie płytowym jak i wartościami zawartymi w specyfikacji producenta).

Słowa kluczowe: współczynnik przewodzenia ciepła, przewodność, badania parametrów termicznych

[1] Autor do korespondencji: Anna Zastawna-Rumin, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, zastawna.anna@gmail.com
[2] Katarzyna Nowak, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, kaskanowa@poczta.onet.pl

1. Metody pomiarowe

1.1. Wstęp

Wymóg budowania obiektów jak najbardziej energooszczędnych skutkuje zwiększeniem roli materiałów termoizolacyjnych. Podstawowym parametrem termicznym, który bierze się pod uwagę przy wyborze takiego materiału jest współczynnik przewodzenia ciepła. Wartość tego współczynnika istotnie wpływa na efektywność użytej warstwy termoizolacyjnej oraz jej minimalną grubość, która pozwoli na spełnienie wymagań cieplnych stawianych przegrodom budowlanym [6].

Metody pomiarowe parametrów termicznych materiałów budowlanych można podzielić na dwie zasadnicze grupy: metody stacjonarne (realizowane przy ustalonym strumieniu cieplnym) oraz metody niestacjonarne (realizowane przy nieustalonym strumieniu cieplnym). Metody stacjonarne są metodami dostarczającymi dokładniejszych wyników. Wadą tych metod jest uzależnienie długości czasu niezbędnego do przeprowadzenia pomiarów od uzyskania stanu ustalonego. Metody niestacjonarne nie mają takiej dokładności jak metody stacjonarne, pozwalają jednak na szybki pomiar. [3,4]

1.2. Metoda stacjonarna pomiaru parametrów cieplnych i opis użytej aparatury

W metodach ustalonego strumienia ciepła strumień przechodzący przez próbkę materiału powinien być stały co do wartości, a temperatura powierzchni ustalona. Współczynnik przewodzenia ciepła badanego materiału określa się mierząc gęstość strumienia cieplnego i różnicę temperatur po obu stronach próbki. Wartości współczynnika przewodzenia ciepła i oporu cieplnego są w takim przypadku obliczane z równania Fouriera (1), przy założeniu jednowymiarowego przepływu ciepła. [4]

$$Q = -\lambda \cdot grad\ T \quad [W/m^2] \tag{1}$$

gdzie: λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/m·K]
T – temperatura [K]

Pomiar metodą stacjonarną można przeprowadzić przy użyciu aparatu płytowego. Badanie możliwe jest tylko w laboratorium i wymaga dostarczenia próbki badanego materiału o wymiarach 30 cm x 30cm.

Inną metodą stacjonarną pozwalającą na wyznaczenie parametrów izolacyjności termicznej materiałów lub oporu cieplnego przegród wielowarstwowych jest metoda ścianki pomocniczej. Głównym założeniem metody jest równość wartości strumieni przepływających przez ciepłomierz przymocowany do badanej przegrody i przez samą badaną przegrodę. Pomiar tą metodą powinien

być przeprowadzany w tzw. komorach klimatycznych, w których warunki brzegowe są ustalone. Pomimo swojego założenia o ustalonym strumieniu ciepła metoda umożliwia również wyznaczenie parametrów termicznych przegrody w warunkach niestacjonarnych. Jest to możliwe pod warunkiem wyznaczenia parametrów cieplnych jako wartości średniej z pomiarów przeprowadzonych w okresie obejmującym pełne cykle zmienności warunków brzegowych. [5] Dużą wadą tej metody jest bardzo długi okres przeprowadzania pomiarów (od kilku do kilkunastu dni).



Rys. 1 Aparat płytowy FOX 314

Fig. 1. Heat Flow Meter FOX 314

Pomiar metodą stacjonarną wykonany był w aparacie płytowym FOX 314 firmy LaserComp (rys. 1). Aparat dostarcza wiarygodnych i bardzo dokładnych wyników. Składa się z nieruchomej płyty górnej oraz z płyty dolnej, która ma możliwość ruchu w górę i w dół, tak aby badana próbka dokładnie do niej przylegała. Na powierzchni każdej z płyt zamontowane są ciepłomierze z termoparami. Obie płyty wyposażono w zaawansowany system chłodząco-grzewczy. Zakres pomiarowy urządzenia wynosi 0,01 – 0,2 W/m·K.

1.3. Metoda niestacjonarna pomiaru parametrów cieplnych i opis użytej aparatury

Metody pomiarowe oparte na nieustalonym przewodzeniu ciepła umożliwiają szybkie wykonanie pomiaru. W większości przypadków sprowadzają się do wyznaczenia dyfuzyjności cieplnej w oparciu o pomiar zmiany temperatury w czasie nagrzewania lub chłodzenia próbki.

Pomiar może być realizowany w sposób dynamiczny przy użyciu przenośnego urządzenia ISOMET 2114 (Rys. 2). Ze względu na swoje małe gabaryty oraz krótki okres wykonywania pomiaru urządzenie może być używane w warunkach polowych.

Podstawę pomiaru stanowi analiza odpowiedzi termicznej na docierający do powierzchni próbki sygnał cieplny, przy założeniu że rozprzestrzenianie

ciepła występuje w nieograniczonym ośrodku. Strumień ciepła generowany jest przez elektryczny rezystor - grzejnik, umiejscowiony wewnątrz sondy, która pozostaje w bezpośrednim kontakcie z testowaną próbką. Pomiar polega na rejestracji reakcji termicznej badanego materiału w funkcji czasu. Przyrząd jest wyposażony w dwa rodzaje sond pomiarowych (rys. 3): sondę igłową do pomiarów miękkich materiałów oraz sondę powierzchniową do materiałów twardych (ze względu na brak możliwości wywiercenia precyzyjnego otworu). Zakres pomiarowy sondy powierzchniowej deklarowany przez producenta to 0,04 - 0,30 W/m·K. Do pomiarów współczynnika przewodzenia w zakresie 0,015 - 0,05 W/m·K dedykowana jest sonda igłowa. Ograniczeniem stosowania sondy igłowej są minimalne wymiary próbki wynoszące 80 mm x 40 mm. Urządzenie ISOMET 2114 ma możliwość pomiarów różnorodnych parametrów cieplnych tj.: współczynnika przewodzenia ciepła „λ" [W/(m·K)], współczynnika dyfuzyjności cieplnej „a" [m^2/s], objętościowej pojemności cieplnej „C_q" [J/m^3·K] oraz temperatury [°C].



Rys. 2. Przenośne urządzenie do pomiaru parametrów termicznych ISOMET 2114

Fig. 2. Portable device for measuring the thermal performance ISOMET 2114



Rys. 3. Rodzaje sond pomiarowych kompatybilnych z urządzeniem ISOMET 2114

Fig. 3. Types of probes compatible with a measuring device ISOMET 2114

Pomiar współczynnika przewodzenia ciepła przeprowadzono dla 5 i 10 centymetrowych próbek następujących materiałów termoizolacyjnych: sztywna pianka poliuretanowa, styropian o gęstości 15 kg/m^3 i 16 kg/m^3 , miękkie maty oraz twarde płyty z wełny mineralnej. Pomiar był przeprowadzony zarówno metodą stacjonarną (w urządzeniu FOX 314) oraz metodą niestacjonarną (przy użyciu przyrządu ISOMET 2114). Pomiary metodą stacjonarną były wykonywane przy temperaturze płyt 0 i 20°C. Zarówno pomiar w aparacie płytowym jak i urządzeniem ISOMET przeprowadzone były w laboratorium, przy ustabi-

lizowanej temperaturze i wilgotności powietrza. Metoda dynamiczna obejmowała 20 serii pomiarowych, a prezentowane w tabeli 1 i 2 wyniki są wartościami średnimi. Uzyskane wyniki są zbieżne z zakresem wielkości współczynnika przewodzenia ciepła podawanego przez producentów materiałów termoizolacyjnych.

2. Porównanie i analiza otrzymanych wyników

Tabela 1 przedstawia porównanie wyników współczynnika λ dla próbek styropianu o grubości 10 cm. Do pomiarów metodą niestacjonarną użyto sondy igłowej. Średnia wartość współczynnika przewodzenia ciepła z pomiarów urządzeniem ISOMET różni się nie więcej niż 5% w stosunku do wyników metody stacjonarnej. Wskazuje to na jej dużą dokładność.

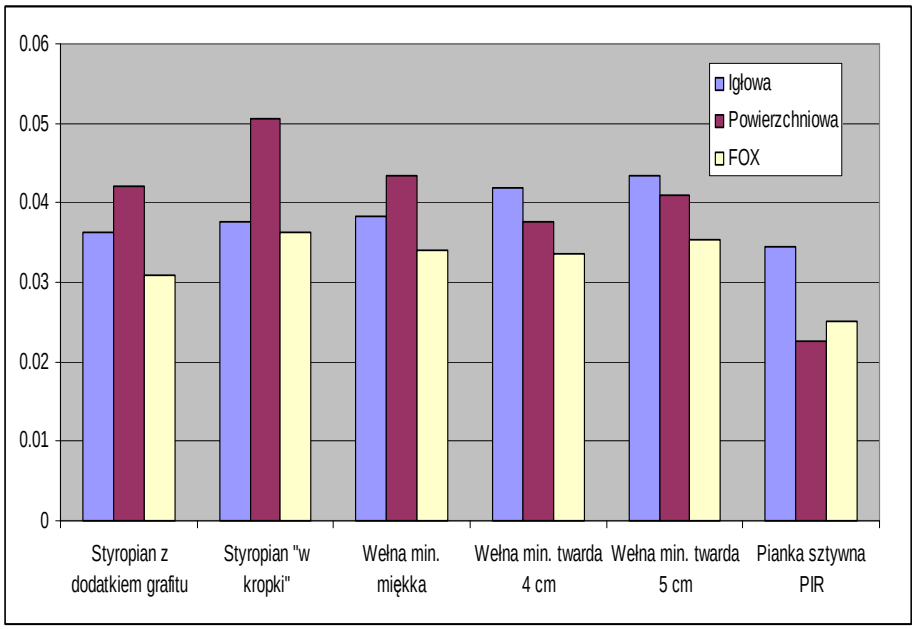
Tabela 1. Wyniki pomiarów dla różnych rodzajów styropianu o grubości 10 cm

Table 1. The results of measurements for different types of polystyrene having a thickness 10 cm

Aparatura	**Współczynnik przewodzenia ciepła W/m·K**		
	Próbka 1	**Próbka 2**	**Próbka 3**
FOX λ_F =	0,0404	0,03741	0,03141
Isomet (sonda igłowa) λ_I =	0,0417	0,035704	0,0319
Różnica $(\lambda_F-\lambda_I)/\lambda_F$, %	-3,22	4,56	-1,56

Kolejnym etapem było wykonanie analogicznych pomiarów dla próbek o mniejszej grubości (4 - 6 cm). Ze względu na stosunkowo małą dokładność wyników metody dynamicznej przy użyciu sondy igłowej (9,24% - 39,43%) w kolejnej serii użyto sondę powierzchniową (Rys. 4, Tabela 2).

Różnice pomiędzy pomiarami wykonywanymi w aparacie FOX i Isomet z sondą powierzchniową wynoszą od 3,89% do 37,54%. W przypadku przeprowadzonych przez autorów badań dla opisanej grupy materiałów wartości współczynnika przewodzenia ciepła pochodzące z urządzenia Isomet wykazują większe wartości niż otrzymane z metodą dokładną. Niezależnie od użytej sondy dokładność pomiarów metodą dynamiczną w przypadku małych grubości materiałów termoizolacyjnych jest niewystarczająca.



Rys. 4. Wyniki pomiarów dla różnych materiałów termoizolacyjnych o grubości 4-6 cm

Fig. 4. The results of measurements for different types of insulation materials having a thickness 4-6 cm.

Tabela 2. Wyniki pomiarów dla różnych materiałów termoizolacyjnych i oszacowanie niedokładności pomiaru

Table 2. The measurement results for different types of insulation materials and an estimate of measurement error

	Współczynnik przewodzenia, W/m·K Rodzaj sondy		**Pomiar w FOX**	**Błąd w odniesieniu do pomiarów w FOX**	
Rodzaj materiału	Sonda Powierzchniowa λ_P =	Sonda Igłowa λ_I =	λ_F	$(\lambda_F-\lambda_P)/\lambda_F$, %	$(\lambda_F-\lambda_\square)/\lambda_F$, %
Styropian 1	0,0362	0,042	0,03097	-16,89	-35,62
Styropian 2	0,0377	0,0506	0,03629	-3,89	-39,43
Wełna min. miękka	0,0383	0,0435	0,03398	-12,71	-28,02
Wełna min. twarda 4 cm	0,0418	0,0376	0,03356	-24,55	-12,04
Wełna min. twarda 5 cm	0,0435	0,0409	0.03533	-23,12	-15,77
Pianka sztywna PIR	0,0344	0,0227	0,02501	-37,54	9,24

3. Podsumowanie i wnioski

Współczesne tendencje skierowane są w kierunku ograniczania zużycia energii cieplnej w sektorze budowlanym, a co za tym idzie w kierunku minimalizacji strat ciepła i zaostrzania wymogów izolacyjności. Aktualne wymogi zmuszają inwestorów do stosowania bardzo grubych warstw termoizolacji. Tak więc niewielkie obniżenie współczynnika przewodzenia ciepła może skutkować redukcją wymaganej minimalnej grubości ocieplenia. Dlatego tez pomiar i znajomość tego parametru jest tak istotna.

Pomiar oparty na nieustalonym strumieniu ciepła (urządzeniem ISOMET 2114) jest możliwy w dowolnym miejscu, w zdecydowanie krótszym niż metody stacjonarne czasie. Niestety przeprowadzona analiza wykazała, że w przypadku materiałów termoizolacyjnych dokładność tej metody można uznać za wysoką jedynie w przypadku warstw o grubości 10 cm. W przypadku cieńszych warstw materiału (4 - 6 cm) uzyskane wyniki mogą być obarczone znacznym błędem. Na podstawie przeprowadzonych badań dla wąskiego zakresu materiałów termoizolacyjnych zaobserwowano, iż wyniki uzyskane z pomiarów wykonanych przy użyciu przyrządu Isomet są w większości przypadków wynikami zawyżonymi (w porównaniu z wynikami otrzymanymi z pomiarów w aparacie płytowym jak i wartościami zawartymi w specyfikacji producenta).

Literatura

[1] E. Radziszewska – Zielina, Analiza porównawcza parametrów materiałów termoizolacyjnych mających zastosowanie jako termoizolacja ścian zewnętrznych, Przegląd budowlany 4/2009
[2] C. Oleśkowicz – Popiel, J. Wojtkowiak, Eksperymenty w wymianie ciepła, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2004
[3] W. Miękina, S. Chudzik, Pomiary parametrów cieplnych materiałów termoizolacyjnych – przyrządy i metody, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2004.
[4] J. A. Pogorzelski, Fizyka cieplna budowli, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976.
[5] T. Kisilewicz, A. Wróbel, Diagnostyka termowizyjna przegród w niestacjonarnych warunkach brzegowych. Fizyka budowli w teorii i praktyce, Czasopismo Naukowe tom IV, Politechnika Łódzka, Łódź 2009.
[6] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie z dnia 12 kwietnia 2002 r. (Dz.U. Nr 75, poz. 690) ze późniejszymi zmianami.
[7] Instrukcja do urządzenia FOX 314
[8] Instrukcja do urządzenia ISOMET 2114
[9] G. Desogus, S. Mura, R. Ricciu, Comparing different approaches to in situ measurement of building components thermal resistance, Energy and Buildings 43 (2011) 2613–2620.
[10] V. Gori, C. A. Elwell, C. Scott, C. Rye, R. Lowe, T. Oreszczyn, Inferring the thermal resistance and effective thermal mass of a wall using frequent temperature and heat flux measurements Energy and Buildings 78 (2014) 10–16.

[11] P. J. Bjørn, Traditional state-of-the-art and future thermal building insulation materials and solutions – Properties, requirements and possibilities, Energy and Buildings 43 (2011) 2549–2563.
[12] H. Garbaliństka, M. Bochenek, Izolacyjność termiczna a akumulacyjność cieplna materiałów ściennych, Czasopismo Techniczne 2011. Zeszyt 11 :89 – 96.
[13] M. Sobolewski, K. Prekiel. Możliwości badawcze materiałów izolacyjnych w aparacie płytowym na przykładzie polistyrenu ekstradowanego. Czasopismo Techniczne Zeszyt 2012. 3: 388 – 394.
[14] L. Żabski, J. Papiński Pianki PIR – nowy typ izolacji typu sztywna pianka poliuretanowa, Izolacje 6 2012 (167.
[15] M. Rutowicz, Wykonanie izolacji cieplnych z pianki poliuretanowej, Materiały Budowlane 7/2012
[16] P. Cieślewicz, Nowoczesne termoizolacje przyszłości, Materiały Budowlane, 5/2012

MEASUREMENT OF THERMAL PROPERTIES OF BUILDING MATERIALS THROUGH THE USE OF DIFFERENT MEASURING EQUIPMENT - ANALYSIS OF RESULTS

S u m m a r y

The aim of the article is to verify the thermal parameters of building materials obtained by using two different methods. Methods for measuring thermal performance of building materials can be divided into two main groups: stationary methods (implemented with a fixed heat flux) and the non-stationary methods (implemented with the transient heat flux). The article contains an analysis of opportunities for relatively rapid tests using a mobile device, which operation is based on a dynamic method. The results are compared to the values obtained from measurements in a very accurate and recommended instrument for measuring thermal conductivity. Measurements were carried out on samples commonly used insulation materials such as .: rigid polyurethane foam, polystyrene and mineral wool (mat soft and hard boards) having thicknesses of 4 - 6 cm and 10 cm. Article also examines the possibility of using different types of sensors that work with the mobile device. The big advantage of the mobile device is that it can be used in field tests. Unfortunately, the analysis showed that in case of thermal insulation materials accuracy of this method can be considered high only for layers with a thickness of 10 cm. In case of lesser thickness of insulation (5 cm) obtained measurement results may be subjected to considerable error. Based on the survey for a narrow range of thermal insulation materials it was observed that the results obtained from measurements made using the instrument Isomet are in most cases overestimated, compared to both the research on the heat flow meter and these contained in the manufacturer's specifications.

Keywords: thermal conductivity, conductivity, testing thermal parameters

Przesłano do redakcji: 28.11.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.89

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXII, z. 62 (2/15), kwiecień-czerwiec 2015, s. 611-617

Agata ZDYB[1]

WYBRANE MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA NANOSTRUKTUR W INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Obecnie ludzkość stoi przed wyzwaniami, jakie stanowią: remediacja środowiska, monitorowanie zanieczyszczeń oraz poszukiwanie czystych źródeł energii. W pracy prezentowane są perspektywy efektywnego zastosowania nanostruktur w katalitycznym i fotokatalitycznym rozkładzie zanieczyszczeń, w czujnikach toksycznych materiałów i w przyjaznych dla środowiska metodach wytwarzania energii z odnawialnych źródeł. Badania w dziedzinie nanotechnologii skupiają się na nanostrukturach, których wyjątkowe własności zależne od ich kształtów i rozmiarów pozwalają na szerokie potencjalne zastosowania. Wykorzystywanie nanostruktur umożliwia miniaturyzację urządzeń pracujących w różnych środowiskach np. w wodzie, powietrzu glebie, na wysypiskach śmieci i w innych zanieczyszczonych miejscach lub obiektach. Perspektywy zastosowań nanostruktur w inżynierii środowiska są interesujące dzięki ich szczególnym własnościom termicznym, mechanicznym, chemicznym, magnetycznym i optycznym. W pracy prezentowane są różne sposoby wykorzystania nanotechnologii. Spośród wielu perspektywicznych zastosowań nanostruktur, najbardziej interesujące w kontekście ochrony środowiska są następujące możliwości: katalityczny i fotokatalityczny rozkład toksycznych związków chemicznych, detekcja zanieczyszczeń, termoelektryczna konwersja energii oparta na zjawisku Seebecka i Peltiera jak również fotowoltaika. Użyteczne struktury, które mogą znaleźć zastosowania mają różnorodne formy. Mogą to być: nanocząstki Fe, TiO_2, ZnO, nanokolumny ZnO pokryte radialnie przez kryształki TiO_2 lub nanokolumny ZnO/V_2O_5, jak również zbudowane z CdS/CdTe, InP, Si, InP TiO_2/metal szlachetny, nanorurki węglowe, nanodźwignie krzemowe, nanokompozyty typu half-Heuslers oraz z takich materiałów jak PbTe, $CoSb_3$, $BiTe_3$.

Słowa kluczowe: kataliza, rozkład zanieczyszczeń, czujniki zanieczyszczeń, czysta energia

1. Wstęp

W związku ze wzrostem liczby ludności, rozwojem technologicznym i rosnącym zapotrzebowaniem na energię potrzebne są innowacyjne rozwiązania, które umożliwią zrównoważony rozwój. Obecnie duże zainteresowanie skupia

[1] Autor do korespondencji: Agata Zdyb, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel./fax: (+081) 53 81 997, tel: (+081) 538 4747, a.zdyb@pollub.pl

rozwój nanotechnologii. Przedmiotem badań nanotechnologii są nanostruktury, które posiadają wyjątkowe, zależne od rozmiaru i kształtu własności, co umożliwia potencjalne zastosowania w wielu dziedzinach. Główną cechą nanostruktur różnych rodzajów, wykonanych z różnych materiałów jest duża wartość stosunku powierzchni do objętości dzięki czemu są one bardzo reaktywne, a ich własności mogą być dostosowywane do praktycznych celów. Z powodu bardzo małych rozmiarów nanostruktur ich własności są inne niż dla tych samych materiałów o dużej objętości. Zmieniona jest więc ich struktura, energia układu, jak również termiczne, mechaniczne, chemiczne, magnetyczne i optyczne własności. Nanostruktury mogą działać w skali nano, możliwa jest więc miniaturyzacja urządzeń, służących do oczyszczania powietrza, wody, gleby, a także na wysypiskach, terenach przemysłowych i w innych zanieczyszczonych miejscach. Ogólnie, perspektywy zastosowania nanocząstek w ochronie środowiska są bardzo obiecujące.

2. Zastosowania nanostruktur

Wyróżnić można wiele możliwości zastosowania nanostruktur w inżynierii środowiska. Jedną z nich jest katalityczny rozkład toksycznych związków chemicznych.

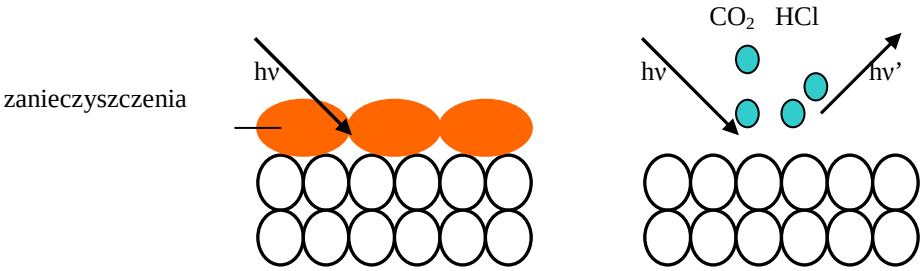
Efektywnym katalizatorem są nanocząstki żelaza, które zapewniają korzystne pod względem ekonomicznym możliwości rozkładu wielu rozpowszechnionych zanieczyszczeń. Struktury te są bardzo reaktywne w stosunku do zanieczyszczeń w glebie i wodzie [9]. Utrzymują własności katalityczne aż do 8 tygodni, a następnie rozpuszczają się w wodach gruntowych dając stężenia niższe niż naturalnie występujące żelazo. Nanocząstki Fe mogą być stosowane in situ ponieważ można je w prosty sposób wstrzykiwać do wód gruntowych ponad 20 m głęboko oraz ex situ w postaci warstwy osadzonej na aktywnym węglu lub krzemionce.

Katalityczne własności nanocząstek żelaza mogą być modyfikowane poprzez dodatek innych metali (Pt, Ag, Ni, Co, Cu) i wówczas powstają struktury bimetaliczne. Są one bardziej reaktywne i stabilne, co zapewnia wzrost wydajności i szybkości reakcji. Nanostruktury oparte na żelazie mogą służyć w efektywnym rozkładzie wielu powszechnych zanieczyszczeń.

Inne zastosowanie nanostruktur w remediacji środowiska naturalnego to fotokataliza. W tym procesie półprzewodnikowe nanocząstki ditlenku tytanu zwykle stosowane są na dwa sposoby [3]. Pierwszy, w którym nanocząstki działają bezpośrednio absorbując promieniowanie UV i drugi, który związany jest z absorpcją światła widzialnego i udział nanocząstek jest pośredni. W pierwszym przypadku absorpcja fotonu powoduje wygenerowanie nośników ładunku elektrycznego, które następnie są rozseparowane i biorą udział w reakcjach redoks. W przypadku drugim na powierzchni TiO_2 zaadsorbowana jest molekuła barwnika organicznego, który działa jak sensybilizator absorbujący światło

widzialne. Wzbudzony elektron jest przekazywany ze stanu wzbudzonego barwnika do pasma przewodnictwa półprzewodnika, a sensybilizator regeneruje się lub ulega rozkładowi. W środowisku wodnym jako produkt reakcji powstaje aktywny tlen i rodniki OH*, które są silnymi utleniaczami i przekształcają cząsteczki zanieczyszczeń. W takich układach zarówno reakcje utleniania jak i redukcji biorą udział w mineralizacji toksycznych związków chemicznych.

Obiecującym materiałem do procesów fotokatalizy jest warstwa osadzonych nanocząstek ZnO. Charakterystyczną cechą tego typu nanostruktury jest zdolność fluorescencji, w związku z tym pod wpływem promieniowania UV emitowane jest światło widzialne. Gdy na powierzchni ZnO znajdą się molekuły zanieczyszczeń ulegną one rozkładowi. Jednocześnie obserwowane jest wygaszenie fluorescencji, które stanowi informację o obecności innych cząsteczek na powierzchni ZnO. W tym zastosowaniu warstwa półprzewodnikowych nanostruktur służy jednocześnie w detekcji i fotokatalitycznym rozkładzie zanieczyszczeń (Rys. 1). Opisany układ ma czułość ~1 ppm, może więc być wykorzystywany do badania jakości wody pitnej i wód podziemnych.



Rys. 1. Schemat wykrywania i rozkładu zanieczyszczeń organicznych

Fig. 1. The scheme of detection and decomposition of organic contaminations

W fotokatalitycznym rozkładzie zanieczyszczeń mogą brać udział nie tylko nanocząstki ale też nanostruktury innych kształtów. Interesującym przykładem są nanokolumny ZnO pokryte radialnie nanokryształkami TiO_2.

Ten rodzaj struktury można otrzymać w kilku stosunkowo tanich i prostych etapach. Kolumny ZnO mogą być przygotowane poprzez syntezę z pary, metaloorganiczne chemiczne naparowanie (MOCVD) lub hydrotermalny wzrost z użyciem maski [10], który jest metodą nieszkodliwą dla środowiska. Otrzymane na szklanym podłożu nanostruktury ZnO pokrywane są przez warstwy TiO_2 przy zastosowaniu rozpylania magnetronowego. Metoda ta jest bardzo czuła na wartość parametrów takich jak temperatura, tempo i czas osadzania.

W celu poprawienia wydajności katalizatora poprzez zwiększenie absorpcji światła w szerokim zakresie widma widzialnego mogą być stosowane również inne układy nanostruktur: ZnO/V_2O_5, TiO_2/metal szlachetny. Badania nad fotokatalitycznym rozkładem zanieczyszczeń wykazują, że stosowanie nanokolumn jest korzystne. Porównanie tempa fotodegradacji przy użyciu różnych materia-

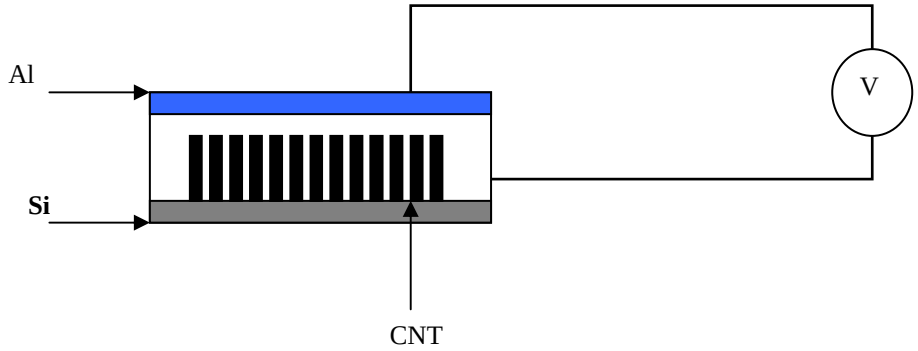
łów np.: warstwy TiO_2, podwójnej warstwy ZnO/TiO_2 i nanokolumn ZnO/TiO_2 wykazuje najlepszą wydajność dla tej ostatniej wymienionej struktury (Tabela 1). Prawdopodobnie główną przyczyną tego typu obserwacji jest bardzo duża wartość powierzchni właściwej nanokolumn ZnO/TiO_2.

Tabela 1. Porównanie tempa degradacji w przypadku zastosowania warstw TiO_2, TiO_2/ZnO i nanokolumn, dane na podstawie [10]

Table 1. Comparison of the degradation rate in case of using TiO_2, TiO_2/ZnO films and composite nanocolumn, data from [10]

Próbka	**Stężenie zanieczyszczeń po 100 min.**	**Stężenie zanieczyszczeń po 200 min.**
Bez katalizatora	100 %	100%
WarstwaTiO_2	77%	68%
Warstwa TiO_2/ZnO	75%	70%
Nanokolumny TiO_2/ZnO	50%	20%

Nanotechnologia dostarcza materiałów, które mogą być wykorzystywane także w innych zastosowaniach. Ochrona środowiska wymaga precyzyjnej detekcji zanieczyszczeń, w związku z tym obecnie rozwijane są nanostruktury do zastosowań w technologii czujników. Obiecującymi kandydatami do roli nanosensorów są nanorurki węglowe, które stanowią jedną z alotropowych odmian węgla. Mają one wyjątkowe własności takie jak duża powierzchnia właściwa, wysoka reaktywność i czułość, dobre przewodnictwo, silna zdolność adsorpcji molekuł, które dają możliwość miniaturyzacji czujników [7]. Schematycznie czujnik wykorzystujący nanorurki węglowe przedstawiony jest na Rys. 2. W urządzeniu tego typu każda nanorurka generuje wokół niejednorodne pole elektryczne, co powoduje jonizację gazu. Przy danych wartościach przyłożonego napięcia pojawiają się impulsy prądu, a interpretacja otrzymanej charakterystyki I-V pozwala na identyfikację zanieczyszczeń.



Rys. 2. Schemat sensora wykorzystującego nanorurki węglowe

Fig. 2. Scheme of sensor using carbon nanotubes

Innym rodzajem czujnika jest urządzenie wykorzystujące układ dźwigni o grubości poniżej kilku mikrometrów [2]. Powierzchnia dźwigni jest pokryta przez materiał czuły na zanieczyszczenia. Osiadanie toksycznych molekuł powoduje ugięcie dźwigni, które jest rejestrowane jako odchylenie promienia laserowego odbitego od powierzchni dźwigni. Stopień ugięcia pozwala na oszacowanie masy zanieczyszczeń. Perspektywiczne zastosowania omówionych nanostruktur zestawione są w Tabeli 2.

Tabela 2. Zastosowania nanostruktur, dane na podstawie [4, 9 ,10]

Table 2. Applications of different nanostructures, data from [4, 9 ,10]

Zastosowanie	**Materiały**	**Zanieczyszczenie**
Kataliza	nanostruktury Fe, Fe/Pt, Fe/Ag, Fe/Ni, Fe/ Co, Fe/Cu	pochodne metanu, benzenu, etanu, pestycydy, barwniki organiczne, metale ciężkie
Fotokataliza	nanostruktury TiO_2, ZnO; ZnO/TiO_2, ZnO/V_2O_5, TiO_2/metal szlachetny	alkany, alkeny i ich pochodne pestycydy, barwniki organiczne
Czujniki zanieczyszczeń	nanorurki węglowe, nanodźwignie krzemowe	NO_2, CO, NH_3, toluen, heksan, aceton, acetonitryl, metanol; metale ciężkie, pestycydy, bakterie

Nanostruktury w formie nanokompozytu mogą być zastosowane w termoelektrycznej konwersji energii opartej na zjawiskach Seebecka i Peltiera. Źródłem energii do wytwarzania ciepła, chłodu i energii elektrycznej w przemianach termoelektrycznych może być energia promieniowania słonecznego lub ciepło odpadowe. Główną zaletę zastosowania nanokompozytów stanowią kanały do łatwego transportu elektronów i blokady drgań cieplnych [5]. Zastosowanie nanokompozytów: half-Heusler, PbTe, $CoSb_3$, $BiTe_3$ pozwala osiągnąć lepsze wartości parametrów termoelektrycznych takich jak współczynnik termoelektryczny, współczynnik Seebecka, przewodnictwo elektryczne, współczynnik przewodnictwa cieplnego.

Inne podejście w poszukiwaniu czystej i taniej energii stanowi fotowoltaika wykorzystująca nanokolumny. W technice tej układy nanokolumn CdS/CdTe, InP, Si używane są w ogniwach słonecznych, co zapewnia zwiększenie wydajności absorpcji światła jak również ułatwienie transportu nośników ładunku [4]. Nanokolumny CdS można otrzymywać na kilka sposobów. Jednym z nich jest proces, w którym nanokolumny rosną na podłożu z porowatego tlenku glinu z Au naniesionym na dnie każdego z porów. Następnie podłoże jest trawione i nanokolumny są pokrywane warstwą CdTe oraz warstwą metalicznego kontaktu. Sposób ten stanowi tanią metodę, która umożliwia seryjną produkcję struktury fotowoltaicznej. Tabela 3 przedstawia para-

metry charakteryzujące nanokolumnowe ogniwa słoneczne. Najlepsza wydajność została osiągnięta przy zastosowaniu nanokolumn InP, jednakże wszystkie zaprezentowane wartości wymagają dalszej poprawy.

Ogólnie, głównym wyzwaniem w rozwoju fotowoltaiki jest poprawa wydajności i obniżenie kosztów. Zalety zastosowania nanokolumn takie jak: maksymalizacja absorpcji światła, redukcja strat przy odbiciu i używanie tanich podłoży umożliwiają osiągnięcie wyznaczonego celu.

Tabela 3. Parametry pracy ogniw słonecznych, na podstawie [4, 1]

Table 3. Parameters of nanopillar solar cells, data from [4, 1]

Materiał	**Gęstość prądu zwarcia [mA/cm^2]**	**Napięcie obwodu otwartego [V]**	**Sprawność [%]**
Nanokolumny InP	25	0,54	8,1
Nanokolumny CdS/CdTe	21	0,6	6
Nanokolumny Si	16,45	0,525	4,83

3. Wnioski

W pracy zaprezentowane zostały różne podejścia do zastosowania nanotechnologii w remediacji środowiska naturalnego. Aktualny poziom rozwoju nanotechnologii pozwala projektować i wytwarzać nanostruktury o różnych formach np. nanocząstki, nanorurki, nanodźwignie i nanokolumny. Wszystkie z nich mają szczególne własności, które perspektywicznie pozwalają na zastosowanie ich w katalizie, fotokatalizie, czujnikach zanieczyszczeń oraz czystych metodach konwersji energii słonecznej.

Literatura

[1] Cho K., Ruebusch D.J., Lee M.H., Moon J.H., Ford A.C., Kapadia R., Takei K., Ergen O., Javey A.: Molecular Monolayers for Conformal, Nanoscale Doping of InP Nanopillar Photovoltaics, Applied Physics Letters, vol. 98, no. 20, 2011, pp. 203101-1 – 203101-3.

[2] Filipponi L., Sutherland D.: Nanoyou Teachers Training Kit in Nanotechnologies, European Commision Document, Denmark, 2010.

[3] Kamat P.V., Meisel D.: Nanoscience opportunities in environmental remediation. C.R. Chimie, vol. 6, no. 8, 2003, pp. 999-1007.

[4] Kapadia R., Fan Z., Takei K., Javey A.: Nanopillar photovoltaics: Materials, processes, and devices. Nano Energy, vol. 1, no. 1, 2012, pp. 132-144.

[5] Liu W., Yan X., Chen G., Ren Z.: Recent advances in thermoelectric nanocomposites, Nano Energy, vol. 1, no. 1, 2012, pp. 42-56.

[6] Modi A., Koratkar N., Lass E., Wei B., Ajayan P.M.: Miniaturized Gas Ionization Sensors Using Carbon Nanotubes, Nature, vol. 424, no. 6945, 2003, pp. 171-174.

[7] Pan B., Xing B.: Adsorption Mechanisms of Organic Chemicals on Carbon Nanotubes. Environmental Science & Technology, vol. 42, no. 24, 2008, pp. 9005-9013.

[8] Shanov V., Yun Y.-H., Schulz M.J.: Synthesis and Characterization of Carbon Nanotube Materials. Journal of the University of Chemical Technology and Metallurgy, vol. 41, no.4, 2006 pp. 377-390.

[9] Zhang W.-x.: Nanoscale iron particles for environmental remediation: An overview. Journal of Nanoparticle Research, vol. 5, 2003, pp. 323-332.

[10] Zou C.W., Gao W.: Fabrication, Optoelectronic and Photocatalytic Properties of Some Composite Oxide Nanostructures. Transaction on Electrical and Electronic Materials, vol. 11, no. 1, 2010, pp. 1-10.

PROSPECTIVE APPLICATIONS OF NANOSTRUCTURES IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING

S u m m a r y

Nowadays humanity faces with the challenge of environmental remediation, pollution monitoring and searching for clean energy sources. This paper presents the prospects for successful utilizing of nanostructures in environmental applications including catalytic and photocatalytic decomposition of contaminations, pollution sensing and production of clean energy. Nanotechnology researches focus on nanostructures which exceptional size and shape dependent properties allow for potential applications in many fields. Application of nanostructures provides possibility to miniaturise devices working in different environments like water, air, soil, landfills and other contaminated sites. There are interesting prospects for successful usage of nanoparticles in environmental engineering because of their specific thermal, mechanic, chemical, magnetic and optical properties. In this paper, different approaches of nanotechnology applications were presented Among many possible applications of nanostructures in the context of environmental protection, especially interesting are: catalytic decomposition of toxic chemicals, photocatalysis, accurate detection of contaminations, thermoelectric energy conversion based on Seebeck and Peltier effect, photovoltaics. The useful structures that can find applications have different forms like nanoscale iron particles, titanium dioxide semiconductor particles, ZnO nanoparticles, composites of nanostructures like ZnO nanocolumns covered radially by TiO_2 nanocrystals and ZnO/V_2O_5, TiO_2/nobel metal, carbon nanotubes, silicon nanocantilevers, nanocomposite materials including half-Heuslers, PbTe, $CoSb_3$, $BiTe_3$, nanopillars made of CdS/CdTe, InP, Si, InP nanocolumns.

Keywords: catalysis, decomposition of contaminations, pollution sensing, clean energy

Przesłano do redakcji: 22.11.2014 r.
Przyjęto do druku: 22.06.2015 r.

DOI:10.7862/rb.2015.90

I n f o r m a c j e d o d a t k o w e

1. Lista recenzentów współpracujących będzie opublikowana w czwartym numerze *Czasopisma Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*: 62(4/15) oraz na stronie internetowej:
   www.oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/
   (dotychczasowa nazwa: *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej*, *Budownictwo i Inżynieria Środowiska*), strona internetowa:
   www.oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/budownictwo-i/
2. Zasady recenzowania są udostępnione na stronie internetowej:
   www.oficyna.portal.prz.edu.pl/zasady-recenzowania/
3. Informacje dla autorów artykułów są udostępnione na stronie internetowej:
   oficyna.portal.prz.edu.pl/informacje-dla-autorów/
4. Formularz recenzji jest udostępniony na stronie internetowej:
   www.oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/
5. Instrukcja dla autorów omawiająca szczegółowo strukturę artykułu, jego układ, sposób przygotowywania materiału ilustracyjnego i piśmiennictwa jest zamieszczona na stronie internetowej:
   www.oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/instrukcja-dla-autorów/
   oraz
   www.oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/
   w zakładce „Instrukcja dla autorów”
6. Dane kontaktowe do redakcji czasopisma, adresy pocztowe i e-mail do przesyłania artykułów oraz dane kontaktowe do wydawcy są podane na stronie internetowej (Komitet Redakcyjny):
   www.oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/

Nakład 100 + 50 egz. Ark. wyd. 45,80. Ark. druk. 38,75. Papier offset. 80g B1.
Oddano do druku w czerwcu 2015 r. Wydrukowano w czerwcu 2015 r.
Drukarnia Oficyny Wydawniczej, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
Zam. nr 91/15