JCEEA

# Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury

# Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture

Kwartalnik
tom XXXIII
zeszyt 63 (nr 3/2016)
lipiec-wrzesień

(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*)
dr hab. inż. Bartosz MILLER, 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. Michał JUREK, 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. 589

# SPIS TREŚCI

Janusz BELOK, Beata WILK-SŁOMKA: Wpływ parametrów oszklenia na zużycie energii w strefie o regulowanej temperaturze ..... 9

Jarosław BIGORAJSKI: Analiza techniczno-ekonomiczna hybrydowej mikroinstalacji słonecznej ..... 17

Jan BRÓDKA, Andrzej WOJNAR: Projektowanie wiązarów z ceowników i kątowników równoramiennych o węzłach typu K. Część 1. Węzły pasa dolnego..... 25

Marta CHODYKA, Jerzy NITYCHORUK, Fabian WELC, Anna ROGÓŻ, Zofia LUBAŃSKA, Tomasz GRUDNIEWSKI: Wpływ zmian klimatu na osadnictwo prehistoryczne Mazur w kontekście badań osadów jeziornych ..... 43

Marta CHODYKA, Jerzy NITYCHORUK, Marek ZREDA, Tomasz GRUDNIEWSKI, Zofia LUBAŃSKA: Innowacyjna metoda pomiaru wilgotności gleby z zastosowaniem neutronów kosmicznych – trzy lata funkcjonowania czujnika na południowym Podlasiu..... 51

Dariusz CZEKALSKI, Martyna TOMASZEK: Rozkład natężenia promieniowania względem południa słonecznego na płaszczyźnie poziomej w kwietniu i we wrześniu ..... 59

Bernardeta DĘBSKA, Karolina GÓRSKA: Ocena możliwości zagospodarowania odpadów w sektorze budowlanym ..... 67

Jolanta FIEDUCIK: Samowystarczalne energetycznie gospodarstwo agroturystyczne ..... 75

Tomasz GACZOŁ: Podciśnieniowy i nadciśnieniowy system wentylacji grawitacyjnej ..... 85

Halina GARBALIŃSKA, Jarosław STRZAŁKOWSKI: Kruszywo jako czynnik kształtujący parametry cieplne betonów o niemodyfikowanej matrycy cementowej ..... 95

Magdalena GRUDZIŃSKA: Dobór oszklenia w pasywnych systemach szklarniowych na przykładzie oszklonego balkonu ..... 105

Marian HOLUB, Magdalena BALINTOVA, Stefan DEMCAK, Maria HURAKOVA: Characterization of Natural Zeolite and Determination Its Adsorption Properties..... 113

Marek JABŁOŃSKI, Katarzyna KLEMM: Wykorzystanie symulacji numerycznej do wyznaczania parametrów przepływu powietrza..... 123

Hanna JĘDRZEJUK, Mateusz SZMIDT: Porównanie metod stosowanych do określania długości okresu ogrzewczego ..... 131

Galina KALDA, Beata KOCZERA: Analiza zanieczyszczenia wód powierzchniowych i podziemnych zakładami przemysłowymi na Podkarpaciu..... 139

Marek KAMIENIARZ: Nowatorskie i ekologiczne budownictwo z gliny ..... 151

Justyna KLESZCZ: Farma miejska jako nowy sposób kształtowania kameralnych przestrzeni mieszkaniowych. Analiza sposobów i barier wdrożenia ..... 159

Dominika KNERA, Dariusz HEIM: Warunki pracy paneli fotowoltaicznych wykonanych w systemie ściany wentylowanej ..... 169

Piotr KONCA, Anna MAĆKOWIAK, Marcin KONIORCZYK: Tynki renowacyjne jako ochrona murów przed zniszczeniem wskutek krystalizacji soli..... 177

Ada KOWALSKA, Karolina KURTZ-ORECKA: Analiza dobrych praktyk w zakresie wykorzystania OZE oraz energii odpadowej na przykładzie rozwiązań obiektu przemysłowo-biurowego w Schwabach/Niemcy ..... 185

Ewelina KRAWCZAK, Agata ZDYB: Analiza pracy instalacji fotowoltaicznej w zależności od orientacji geograficznej..... 193

Jan KRUPA, Andrzej MANTAJ, Piotr KOSZELNIK: Gospodarka energetyczna a ochrona środowiska w opinii różnych grup respondentów. Część 1 ..... 201

Karolina KURTZ-ORECKA: Współczynnik redukcji temperatury w obliczeniach strat ciepła do przestrzeni nieogrzewanych piwnic .. 211

Dominika KUŚNIERZ-KRUPA, Michał KRUPA: Uwagi do rewaloryzacji terenu wokół zabytkowego kościoła pw. św. Marcina w Grywałdzie ..... 219

Przemysław LEŃ, Ewa GŁOWIENKA: Zastosowanie metod GIS w analizie struktury przestrzennej obszarów wiejskich gminy Sławno w powiecie opoczyńskim ..... 227

Zofia LUBAŃSKA, Tomasz GRUDNIEWSKI, Marta CHODYKA, Jerzy NITYCHORUK: Rodzaje metod sekwestracji $CO_2$ ..... 239

Maria Teresa MAŁEK, Halina KOCZYK: Wpływ rozwiązania ściany zewnętrznej na rozkłady temperatur w przegrodzie ..... 247

Michał MARCHACZ, Antonina ŻABA: Pilotażowe badania akustyczne zabytkowych kościołów drewnianych na terenie Górnego Śląska ... 255

Robert MARCINKOWSKI: Intensywna zabudowa a ochrona walorów krajobrazu ..... 263

Przemysław MARKIEWICZ: Zintegrowane projektowanie energetyczne budynków energooszczędnych ..... 271

Paweł NOSZCZYK, Henryk NOWAK: Termografia aktywna jako nowoczesna metoda badań elementów żelbetowych ..... 279

Vlasta ONDREJKA HARBULAKOVA, Pavol PURCZ, Adriana ESTOKOVA, Alena LUPTAKOVA: Relation Between Concrete Leachability and ph Using Statistical Approach..... 287

Leszek OPYRCHAŁ, Aleksandra BĄK: Funkcja niezawodności i czas bezawaryjnej pracy odpowiadający wykładniczej intensywności uszkodzeń na przykładzie niezawodności zapór ..... 295

Krzysztof OSTROWSKI, Roman KINASZ, Jerzy CIEŚLIK, Daniel WAŁACH, Bartłomiej AHMIDA: Nośność elementów osiowo ściskanych na przykładzie kolumn z betonu i fibrobetonu wysokowartościowego wzmocnionych włóknami węglowymi ..... 309

Agnieszka PĘKALA, Joanna CZARNOTA, Agnieszka WOTA: Ocena stanu środowiska glebowego w sąsiedztwie zakładu WSK-PZL Rzeszów S.A ..... 317

Katarzyna PIETRUCHA-URBANIK, Tatiana CHRYŃ: Analysis of Water Supply Infrastructure State in Lublin Province..... 329

Katarzyna PIETRUCHA-URBANIK, Justyna KARNAS: Assessment of Water Network Functioning on the Basis of Water Losses ..... 341

Dorota PIWIŃSKA, Jadwiga KALETA: Model rozprzestrzeniania kadmu w warstwie wodonośnej z wykorzystaniem programu Processing Modflow ..... 351

Estera PRZENZAK, Justyna TARNOWSKA, Mariusz FILIPOWICZ: Symulacje odbiornika ciepła wysokotemperaturowego pracującego w układzie helioenergetycznym ..... 365

Adam RUSZAJ: Bioinspiracje w inżynierii środowiska..... 373

Elżbieta RYBAK-WILUSZ, Paulina SAWICKA-CHUDY, Marian CHOLEWA: Analiza wykorzystania energii słonecznej w budynku na podstawie danych eksploatacyjnych..... 381

Beata SADOWSKA: Efektywny ekonomicznie i ekologicznie standard energetyczny budynków mieszkalnych jednorodzinnych w województwie podlaskim..... 391

Tomasz SALATA, Barbara PRUS, Krzysztof GAWROŃSKI: Ocena rozwiązań planistycznych z wykorzystaniem przestrzennych baz danych w aspekcie skalowalności rozwoju zabudowy ..... 399

Karolina SIEDLISKA, Agata ZDYB: Zastosowanie wybranych barwników organicznych w barwnikowych ogniwach słonecznych ..... 413

Izabela SKRZYPCZAK, Janusz KOGUT, Lidia BUDA-OŻÓG, Joanna KUJDA: Zalecenia normowe w ocenie stanu technicznego drogowej konstrukcji inżynierskiej na przykładzie badań wybranych cech fizyko-chemicznych ..... 421

Katarzyna STANISZ, Stanisław GUMUŁA: Energetyka prosumencka w budownictwie rozproszonym..... 431

Aleksander STARAKIEWICZ, Lech LICHOŁAI, Przemysław MIĄSIK, Joanna KRASOŃ : Zużycie nośników energii w budynku jednorodzinnym na cele ogrzewania ciepłej wody użytkowej i potrzeb bytowych..... 439

Milena STETTNER: Rewitalizacja zasobów mieszkaniowych w miastach do 10 tys. mieszkańców szansą na rozwój małych miast..... 447

Leszek STYSZKO, Diana FIJAŁKOWSKA: Wpływ odmian i klonów wierzby oraz gęstości sadzenia na plon biomasy na cele energetyczne w 8 roku uprawy ..... 461

Aleksandra ŚCIUBIDŁO: Innowacyjny sposób zagospodarowania popiołów lotnych ..... 469

Tomasz ŚWIĘTOŃ: Transformacja odwrotna w regularnej siatce korekt jako metoda transformacji pomiędzy państwowymi układami odniesień przestrzennych ..... 477

Jarosław TATARCZAK, Jarosław SIKORA: Konwersja energii słonecznej w elektryczną z wykorzystaniem fotonowo wzmocnionej termoemisji elektronowej..... 489

Dawid TĄTA, Henryk FOIT: Poszukiwanie najkorzystniejszej wielkości okien budynku pasywnego..... 497

Barbara TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK, Dorota PAPCIAK, Jadwiga KALETA, Alicja PUSZKAREWICZ: Analiza niezawodności stacji uzdatniania wody ..... 507

Beata WILK-SŁOMKA, Janusz BELOK: Parametry oszklenia a komfort cieplny w strefie o regulowanej temperaturze ..... 517

Barbara WŁODARCZYK, Paweł P. WŁODARCZYK: Mikrobiologiczne ogniwo paliwowe z katodą Cu-B..... 525

Krystyna WRÓBEL, Wiesław KUBISZYN: Remont zabytkowego ogrodzenia Letniego Pałacu Lubomirskich w Rzeszowie ..... 533

Wojciech ZALEWSKI: Obliczenia cieplne wymiennika stanowiącego ujęcie dolnego źródła ciepła powietrznej pompy ciepła ..... 543

Robert ZARZYCKI, Zbigniew BIS: Zastosowanie paleniska cyklonowego w procesie witryfikacji popiołów lotnych na potrzeby produkcji materiałów budowlanych ..... 553

Agata ZDYB, Piotr LICHOGRAJ: Znaczenie warunków wiatrowych w funkcjonowaniu modułów fotowoltaicznych ..... 563

Kinga ZĘBALA: Pomiary izolacyjności akustycznej wybranych ścian zewnętrznych w budynku wielkopłytowym przed i po dociepleniu ..... 571

Dominika ZIAJA, Bartosz MILLER: Detekcja uszkodzeń na przykładzie dwukondygnacyjnej ramy portalowej z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych..... 579

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 9-16

**Janusz BELOK**[1]
**Beata WILK-SŁOMKA**[2]

# WPŁYW PARAMETRÓW OSZKLENIA NA ZUŻYCIE ENERGII W STREFIE O REGULOWANEJ TEMPERATURZE

Celem pracy było określenie wpływu parametrów oszklenia na zużycie energii w wybranej strefie cieplnej. Jako strefę o regulowanej temperaturze wybrano pomieszczenie o charakterze pokoju dziennego z aneksem kuchennym (open space), często spotykane w rozwiązaniach architektonicznych współczesnego budownictwa jednorodzinnego, energooszczędnego. Elewację południową pomieszczenia stanowi przeszklona fasada, która w założeniu miała być elementem pozyskiwania energii cieplnej z promieniowania słonecznego. Wymiary pomieszczenia wynoszą 4,0 x 6,0 m, wysokość 2,8 m. Metoda badawcza przyjęta w pracy to badania numeryczne z wykorzystaniem programów Comfen, Window, Therm oraz EnergyPlus. Do analiz przyjęto 4 warianty. Punkt odniesienia stanowi przeszklona fasada złożona z zestawu szybowego jednokomorowego wypełnionego powietrzem. Pozostałe warianty dobrano tak, aby odpowiadały współczesnym rozwiązaniom zestawów szybowych dla budownictwa niskoenergetycznego. Spełniają one aktualne wymagania izolacyjności termicznej wg [3], przy czym różnią się wartościami współczynników: przenikania ciepła U, całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego g oraz przepuszczalności światła $\tau_{vis}$. Są to zestawy trójszybowe, w których komory wypełniono argonem, szyby pokryto powłokami selektywnymi (por. tab. 1). Dodatkowo analizowano wpływ zastosowania ruchomych żaluzji. Najbardziej korzystnymi z punktu widzenia miesięcznych zysków ciepła przez fasadę oraz zużycia energii w roku wydają się być rozwiązania W2 oraz W2_Ż czyli zestaw trójszybowy, w którym komory są wypełnione argonem, szyby pokryte powłokami niskoemisyjnymi, bez lub z żaluzjami.

**Słowa kluczowe:** współczynnik całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego, zyski ciepła od promieniowania słonecznego, zestawy szybowe, powłoki niskoemisyjne, budownictwo energooszczędne

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Janusz Belok, Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice; tel. 322372687; janusz.belok@polsl.pl

[2] Beata Wilk-Słomka, Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice; tel. 322372142; beata.wilk-slomka@polsl.pl

# 1. Wprowadzenie

Na zużycie energii w budynku wpływ mają wszystkie przegrody budowlane. Ich udział w bilansie energetycznym jest zależny od powierzchni oraz izolacyjności cieplnej. Szacuje się, że straty ciepła przez przegrody przezroczyste wahają się w granicach 25 ÷ 40% wszystkich strat [1]. Jednakże nie generują one tylko strat ciepła, ale są także źródłem zysków bezpośrednich.

Parametrami charakteryzującymi jakość energetyczną oszklenia są współczynniki: przenikania ciepła okna $U_w$ oraz całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego g. Na końcową wartość współczynnika przenikania ciepła okna ma wpływ budowa oszklenia, ramy oraz liniowy współczynnik przenikania ciepła opisujący mostek termiczny jako efekt połączenia oszklenia z ramką dystansową i ramą. Sposób obliczania zawarty jest w normie [2]. Należy pamiętać, iż o stratach ciepła okna decyduje cała konstrukcja okna, gdzie nie bez znaczenia jest także sposób montażu. Obecnie preferowany sposób to osadzenie okna w warstwie izolacji termicznej.

Podstawowe wymagania dla okien związane z energetyką budynku oraz koniecznością zapewnienia oświetlenia pomieszczeń światłem dziennym zawarte są w [3]. Dotyczą one m. in.: zapewnienia odpowiedniego stosunku powierzchni okien do powierzchni podłogi w zależności od przeznaczenia pomieszczenia, maksymalnych wartości współczynnika przenikania ciepła. Zawierają również zapis o zaprojektowaniu i wykonaniu budynku w taki sposób, aby ograniczyć ryzyko przegrzewania w okresie letnim, na co wpływ ma wartość współczynnika g dla przegród przezroczystych. Wartość ta dla okresu letniego nie może być większa niż 0,35.

Można zatem stwierdzić, iż współcześnie projektowane przeszklenia muszą spełniać wzajemnie sprzeczne wymagania. Z jednej strony powinny gwarantować energooszczędną eksploatację budynku, a z drugiej zapewniać odpowiednie oświetlenie pomieszczeń. Szczególnie w budownictwie energooszczędnym od elementów przezroczystych wymaga się dużej elastyczności w zakresie parametrów związanych izolacyjnością cieplną i zdolnością do pozyskiwania energii cieplnej z promieniowania słonecznego. Niska wartość współczynnika przenikania ciepła U, powinna być powiązana z wysoką wartością g, która z kolei musi być ograniczana sezonowo celem wyeliminowania przegrzewania budynku latem. W tym celu stosuje się rolety, żaluzje ograniczające dopływ promieniowania słonecznego, bądź zaawansowane technicznie oszklenia z powłokami ograniczającymi dopływ promieniowania, oszklenia fotochromowe itp. Rozwiązania te powinny zagwarantować jednakże prawidłowe oświetlenie pomieszczeń światłem dziennym. W [3] podane są współczynniki optyczne dla różnych rodzajów zasłon, oraz współczynniki redukcji promieniowania słonecznego w zależności od ich typu. Dla budownictwa niskoenergetycznego standardem stały się wymagania sprecyzowane przez NFOŚ w ramach programu wspierania budownictwa energooszczędnego znane pod skrótową nazwą NF 15 czy NF 40 [4].

Dla okien zgodnie z tymi wytycznymi wymagane wartości współczynnika przenikania muszą wynosić odpowiednio $U < 0,8$ (1,1) $W/m^2K$, a dla tzw. okien aktywnych $U < 0,8$, natomiast $g \geq 0,45$.

W niniejszym artykule autorzy podjęli próbę określenia wpływu wybranych parametrów oszklenia na zużycie energii w strefie o regulowanej temperaturze. Rozpatrywano także istotność zastosowania ruchomych żaluzji jako elementów zacieniających.

## 2. Opis procedury badawczej

### 2.1. Opis programu symulacyjnego i założenia analiz

Metoda badawcza przyjęta w pracy to badania numeryczne z wykorzystaniem programów Comfen, Window, Therm oraz EnergyPlus [5], [6]. Jest to zestaw narzędzi do oceny energetycznej okien oraz całych obiektów budowlanych. Za ich pomocą można modelować parametry energetyczne i optyczne okien, fasad przeszklonych oraz wyznaczać zużycie energii na potrzeby ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, oświetlenia oraz zużycia ciepłej wody w budynkach. Ponadto dają możliwość modelowania oświetlenia pomieszczeń (wyznaczenie natężenia oświetlenia, iluminancji, olśnienia w wybranych punktach analizowanej strefy) z uwzględnieniem elementów zacieniających. Istnieje także możliwość określenia komfortu cieplnego w analizowanej strefie. Analizy bazują na wykorzystaniu metody MES w powiązaniu z implementacją równań empirycznych dla zjawisk nie opisanych w inny sposób. Obliczenia prowadzone są z godzinowym krokiem czasowym na bazie rzeczywistych danych klimatycznych.

W obliczeniach wykorzystano bazę danych klimatycznych dla miasta Katowice, stacja aktynometryczna – Chorzów.

Zewnętrzna fasada strefy jest jedyną powierzchnią, która jest wystawiona na działanie środowiska zewnętrznego. Wszystkie inne powierzchnie (sufit, podłoga, ściany wewnętrzne) są traktowane jako adiabatyczne.

Założenia przyjęte w analizach:
– rodzaj budynku: mieszkalny,
– wymiary pomieszczenia: $4,0 \cdot 6,0 \cdot 2,8$ m,
– wymiary fasady szklanej: $4,0 \cdot 2,8$ m, podzielona na sześć jednakowych pól, o powierzchni całkowitej oszklenia $F = 9,363$ $m^2$,
– zyski ciepła od źródeł wewnętrznych przyjęto zgodnie z [7] dla budynku jednorodzinnego $q_{int} = 6,8$ $W/m^2$, od oświetlenia $q_{electr} = 5,0$ $W/m^2$,
– strumień objętości powietrza wentylacyjnego $V_{inf} = 20$ $m^3/h \cdot$osoba,
– liczba osób: $n = 3$,
– nośnik energii: dla ogrzewania: gaz, dla chłodzenia: energia elektryczna,
– pomieszczenie ogrzewane jest do temperatury $20^oC$, w okresie letnim chłodzenie jest uruchamiane, gdy temperatura przekroczy $24^oC$.

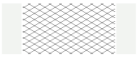
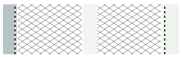
Dodatkowo przeanalizowano wpływ zastosowania ruchomych żaluzji, które umieszczono między szybami. Żaluzje wykonane w postaci cienkich lameli aluminiowych wpływają wyłącznie na transmisję promieniowania słonecznego, natomiast z uwagi na prawie zerowy opór cieplny nie stanowią elementu polepszającego wartość współczynnika przenikania ciepła całego okna. Żaluzje są sterowane temperaturą powietrza w pomieszczeniu i natężeniem promieniowania słonecznego na powierzchni szyby. Zasłaniają się, gdy zostaną osiągnięte wartości progowe powyższych wielkości, które przyjęto jako: temperaturę w pomieszczeniu $t_i$ = 23°C, natomiast natężenie całkowitego promieniowania słonecznego $I_c$ = 100 W/m$^2$.

## 2.2. Charakterystyka wariantów

W celu określenia wpływu parametrów oszklenia na zużycie energii w wybranej strefie cieplnej przeprowadzono badania porównawcze. Rozpatrzono 4 warianty oszklenia. Wariant wyjściowy W0 spełnia wymagania izolacyjności termicznej stawiane przegrodom przezroczystym do 2014 r. Pozostałe warianty dobrano tak, aby odpowiadały aktualnym rozwiązaniom technicznym, spełniały aktualne wymagania izolacyjności termicznej [3], ale różniły się wartością współczynników: przenikania ciepła U, całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego g oraz przepuszczalności światła $\tau_{vis}$. W wariancie W0 przyjęto ramę drewnianą o współczynniku przenikania ciepła $U_f$ = 2,27 W/m$^2$K, natomiast w pozostałych – ramę PVC o $U_f$ = 1,0 W/m$^2$K. W tab. 1 zestawiono parametry dla poszczególnych wariantów.

Tabela 1. Charakterystyka analizowanych wariantów

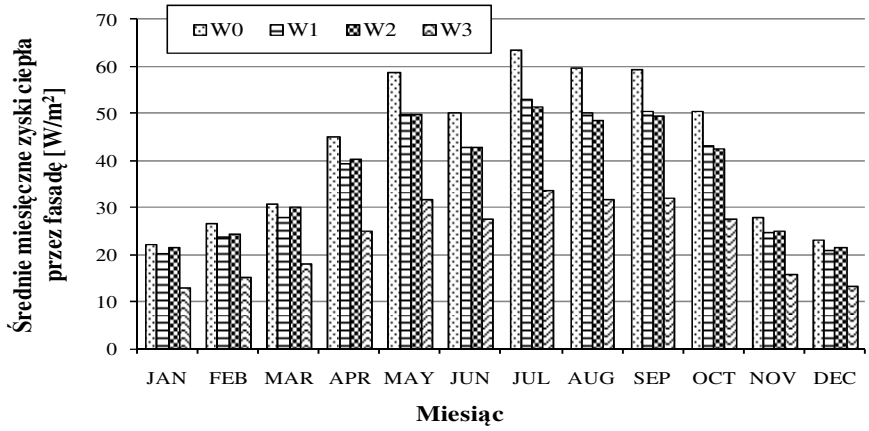
Table 1. Characteristic of analyzed variants

| Wariant | Schemat zestawu szybowego | Współczynnik g [-] | Współczynnik $\tau_{vis}$ [-] | Współczynnik $U_w$ [W/m$^2$K] |
|---|---|---|---|---|
| W0 |  (4-18-4) | 0,79 | 0,82 | 2,71 |
| W1 |  (4-18-4-18-4) | 0,71 | 0,74 | 1,64 |
| W2 |  (6-18-4-18-6) | 0,60 | 0,72 | 0,65 |
| W3 |  (4-18-4-18-6) | 0,34 | 0,43 | 0,71 |

Wariant W0 to zestaw jednokomorowy złożony z szyb zwykłych, z wypełnieniem komory międzyszybowej powietrzem. Warianty W1 ÷ W3 to zestawy trójszybowe, w których komory są wypełnione argonem. W1 to zestaw złożony z szyb zwykłych, W2 – szyby zwykłe z powłokami niskoemisyjnymi, natomiast W3 od strony zewnętrznej szkło z powłoką przeciwsłoneczną oraz od wewnętrznej strony z powłoką niskoemisyjną. W dalszych analizach dla wariantów W0 ÷ W2 przyjęto dodatkowo ruchome żaluzje (W0_Ż ÷ W2_Ż).

## 3. Wyniki badań i ich analiza

W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano szereg wyników obrazujących zachowanie się modelu pod obciążeniem cieplnym wywołanym klimatem zewnętrznym. Z punktu widzenia celu jakiemu podporządkowane były badania, uzyskane wyniki obliczeń, dla założeń opisanych w rozdziale 2, przedstawiają wykresy na rys. 1 ÷ 4. Przyjęto, iż budowa zestawu szybowego w wariancie W3 stanowi dostateczne rozwiązanie zabezpieczające przed przegrzewaniem, dlatego nie zastosowano w nim żaluzji. Dla porównania na wykresach wprowadzono wartości uzyskane dla wariantu W3.

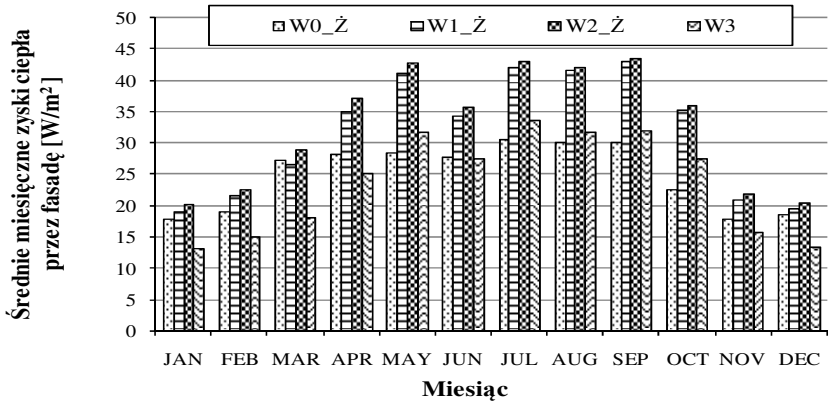



Rys. 1. Średnie miesięczne zyski ciepła przez fasadę dla poszczególnych wariantów bez żaluzji w przeliczeniu na $m^2$ powierzchni podłogi

Fig. 1. Average monthly heat gains via the façade for individual variants without shutters - per 1 $m^2$ of the floor

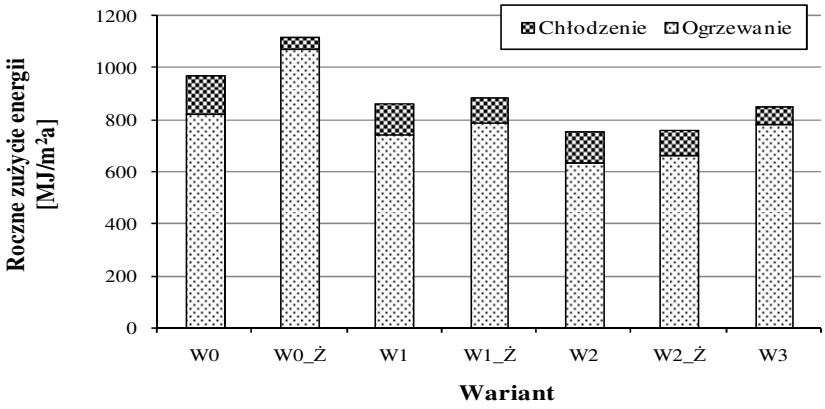
Najwyższymi wartościami średnich miesięcznych zysków ciepła przez fasadę charakteryzuje się wariant W0. Nie spełnia on jednak aktualnych wymagań w zakresie izolacyjności termicznej. Najniższe wartości uzyskano dla wariantu W3. Warianty W1 oraz W2 charakteryzują się porównywalnymi wartościami miesięcznych zysków ciepła. Zastosowanie ruchomych żaluzji wpływa na zmniejszenie miesięcznych zysków ciepła w porównaniu z wariantami bez nich.

Najwyższe wartości średnich miesięcznych zysków ciepła przez fasadę uzyskano dla wariantu W2_Ż. W wariancie W3 pomimo braku żaluzji występują najniższe zyski ciepła.




Rys. 2. Średnie miesięczne zyski ciepła przez fasadę dla poszczególnych wariantów z uwzględnieniem żaluzji w przeliczeniu na $m^2$ powierzchni podłogi

Fig. 2. Average monthly heat gains via the façade for individual variants with shutters - per 1 $m^2$ of the floor




Rys. 3. Roczne zużycie energii dla poszczególnych wariantów w przeliczeniu na $m^2$ powierzchni podłogi

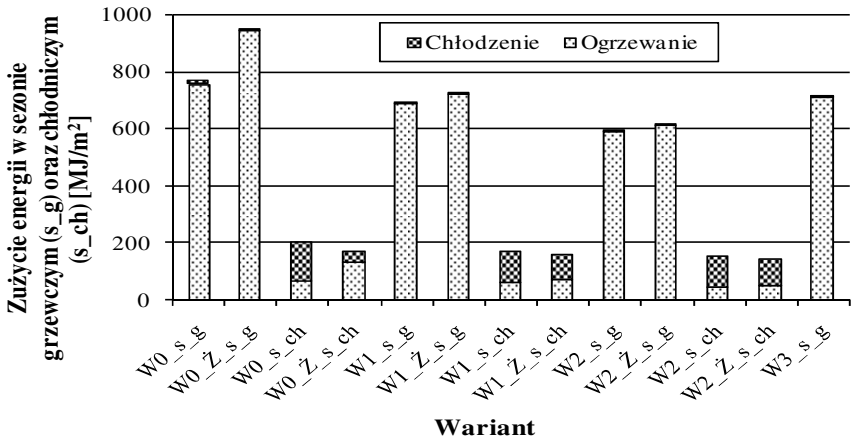
Fig. 3. Annual energy consumption for individual variants per 1 $m^2$ of the floor

Analizując zużycie energii dla wszystkich wariantów, łącznie dla sezonu grzewczego i chłodniczego, zaobserwowano poniższe prawidłowości:

– najniższe zużycie energii na cele ogrzewania występuje dla wariantu W2, najwyższe dla W0_Ż;

– najniższe zużycie energii na cele chłodzenia występuje dla W0_Ż, najwyższe dla W0;
– najniższe zużycie energii na cele oświetlenia dla W0, najwyższe dla W3.

Na rys. 4. przedstawiono wykres zużycia energii w sezonie grzewczym (s_g, XI ÷ IV) oraz chłodniczym (s_ch, V ÷ X) dla wariantów z i bez żaluzji. Dla wariantów z żaluzjami w sezonie letnim (s_ch) obserwujemy mniejsze zapotrzebowanie na chłodzenie, ale wyższe na grzanie niż dla wariantów bez żaluzji. Natomiast w sezonie zimowym (s_g) warianty te charakteryzują się wyższym zapotrzebowaniem na ogrzewanie niż rozwiązania bez żaluzji. Zdaniem autorów należałoby zmienić algorytm sterowania żaluzjami w zależności od sezonu.




Rys. 4. Zużycie energii w sezonie grzewczym (s_g) i chłodniczym (s_ch) dla poszczególnych wariantów z oraz bez żaluzji w przeliczeniu na $m^2$ powierzchni podłogi

Fig. 4. Energy consumption in the heating season (s_g) and cooling (s_ch) for individual variants with and without shutters per 1 $m^2$ of the floor

## 4. Podsumowanie

Zastosowanie żaluzji powoduje zwiększenie zużycia energii dla ogrzewania i oświetlenia, natomiast zmniejszenie zużycia energii na chłodzenie oraz wentylację, zarówno w sezonie grzewczym jak i chłodniczym w porównaniu z wariantami bez żaluzji. Najbardziej korzystnymi z punktu widzenia miesięcznych zysków ciepła przez fasadę oraz zużycia energii w roku wydają się być rozwiązania W2 oraz W2_Ż czyli zestaw trójszybowy, w których komory są wypełnione argonem, szyby zwykłe z powłokami niskoemisyjnymi, bez lub z żaluzjami. Należy również zwrócić uwagę na względnie niewielką różnicę w rocznym zużyciu energii pomiędzy wariantami W0 i W3. Jest to szczególnie interesujące, bowiem różnią się one istotnie izolacyjnością termiczną (2,71 vs. 0,71 $W/m^2K$). Wpływają na to zyski ciepła przez fasadę, które dla wariantu W0 są najwyższe.

## Literatura

[1] Laskowski L.: Ochrona cieplna i charakterystyka energetyczna budynków, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.

[2] EN ISO 10077-1.: Cieplne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji – obliczanie współczynnika przenikania ciepła. Cz. 1.: Postanowienia ogólne.

[3] Rozporządzenie MIiR z dn. 17.07.2015 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. z 2015 r. poz. 1422.

[4] www.nfosigw.gov.pl/.../gfx/nfosigw/pl/.../wytyczne_do_pp.pdf {dostęp 10.05.2016 r.}.

[5] http://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/input-output-reference/page-094.html {dostęp 10.05.2016 r.}.

[6] https://windows.lbl.gov/software/comfen/comfen.html {dostęp 10.05.2016 r.}.

[7] Rozporządzenie MIiR z dn. 18.03.2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku..., Dz. U. z 2015 r. poz. 376.

## IMPACT OF GLAZING PARAMETERS ON ENERGY CONSUMPTION IN A ZONE WITH ADJUSTABLE TEMPERATURE

**S u m m a r y**

The goal of this paper was to determine the impact of glazing parameters on energy consumption in selected thermal zone. A room with parameters of a living room and kitchenette was selected as such a zone. Such zones are frequently used in architectural solutions for contemporary energy-saving detached buildings. The south façade is glazed in order to gather thermal energy from solar radiation. The dimensions of this room are as follows: 4.0 x 6.0 m, height of 2.8 m. We chose the numerical method for testing - Comfen, Window, Therm and EnergyPlus software. 4 variants were used in the analysis. The reference point was the glazed façade made of single chamber pane set filled with air. Other variants were selected in such a way that they corresponded to modern solutions of pane sets assigned for low-energy buildings. They meet current requirements of thermal insulating power [3] but they have different values of the following coefficients: heat transfer [U], total permeability of solar radiation energy [g] and light transmittance [$\tau_{vis}$]. They are sets with three glasses and chambers filled with argon and the panes are covered with selective coats (see Table 1). Additionally, the impact of movable shutters was tested. From the point of view of monthly heat gains via the façade and annual energy consumption it seems that the most advantageous are W2 and W2_Ż solutions – that is the set with three panes and chambers filled with argon, the panes are covered by low emission coats without or with shutters.

**Keywords:** total solar radiation energy permeability coefficient, solar heat gain, pane sets, low emissions coats, energy saving building

DOI:10.7862/rb.2016.181

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 17-24

**Jarosław BIGORAJSKI**[1]

# ANALIZA TECHNICZNO-EKONOMICZNA HYBRYDOWEJ MIKROINSTALACJI SŁONECZNEJ

Artykuł jest poświęcony analizie hybrydowej instalacji słonecznej. Publikacja dotyczy zarówno wytwarzania energii elektrycznej, jak i ciepła z energii promieniowania słonecznego. Największym problemem związanym z wytwarzaniem energii elektrycznej z energii słonecznej jest stosunkowo niska sprawność obecnie dostępnych ogniw fotowoltaicznych. Większość absorbowanej energii słonecznej jest konwertowana na ciepło, które jest tracone do otoczenia. Ciepło podwyższa temperaturę ogniw fotowoltaicznych. Ogniwa fotowoltaiczne mają tę własność, że im wyższa jest ich temperatura tym niższą osiągają sprawność. Aby rozwiązać ten problem odbiera się ciepło od ogniw fotowoltaicznych - takie rozwiązanie stosuje się w kolektorach hybrydowych PVT (ang. photovoltaic thermal).
W artykule opisany został model promieniowania słonecznego oraz model rozważanej instalacji. Jako wejściowe dane pogodowe wykorzystano temperaturę powietrza zewnętrznego, promieniowanie całkowite i jego składowe. Natężenie promieniowania półsferycznego padającego na płaszczyznę odbiornika o danej orientacji i pochyleniu było wyznaczane za pomocą modelu izotropowego promieniowania słonecznego dyfuzyjnego (model Liu-Jordana). Do zamodelowania kolektora hybrydowego PVT wykorzystano zmodyfikowany model Hottela-Whilliera-Blissa. Z przeprowadzonej analizy wynika, że instalacja PVT o mocy elektrycznej 2 kWp może wytworzyć 1714 kWh energii elektrycznej przez rok oraz 2359 kWh ciepła przez rok. Zaprezentowane w artykule wyniki dowodzą, że układy hybrydowe PVT mogą być efektywnie stosowane w warunkach krajowych, jednak okres zwrotu nakładów inwestycyjnych jest dość długi (około 16 lat).

**Słowa kluczowe:** odnawialne źródła energii, energia słoneczna, fotowoltaika, instalacje hybrydowe

## 1. Wprowadzenie

Moduły fotowoltaiczne są szeroko rozpowszechnione i dostępne na rynku. W zależności od rodzaju osiągają sprawności konwersji energii promieniowani słonecznego na energię elektryczną od 5 do 20% (w warunkach standardowych) [1]. Obecnie dostępne na rynku moduły fotowoltaiczne to głównie modu-

[1] Jarosław Bigorajski, Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Cieplnej, Zakład Chłodnictwa i Energetyki Budynku, ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa; jaroslaw.bigorajski@itc.pw.edu.pl

ły wykonane z ogniw krzemowych. W przypadku krzemowych ogniw fotowoltaicznych absorpcja promieniowania słonecznego powoduje znaczny wzrost temperatury ogniw w wyniku następujących procesów [2], [3]:
– nieaktywnej absorpcji fotonów (niegenerujących par elektron-dziura),
– rekombinacji nośników ładunku poza obszarem złącza p-n,
– ciepła Joule'a-Lenza, wydzielanego na rezystancji szeregowej.
Wzrost temperatury modułów fotowoltaicznych powoduje spadek sprawności elektrycznej. To zjawisko ma dwie przyczyny: wzrost amplitudy drgań sieci krystalicznej, utrudniający przepływ nośników ładunków wskutek zmniejszenia ich ruchliwości oraz utratę zdolności rozdzielania fotogenerowanych ładunków przez złącze [4], [5]. Drugi czynnik nie wpływa istotnie na sprawność konwersji dopóki temperatura nie przekroczy 300°C (osiągnięcie tak wysokiej temperatury w naszych warunkach klimatycznych nie jest możliwe) [4], [5]. Wzrost temperatury ogniw fotowoltaicznych powoduje spadek sprawności elektrycznej o 0,4 - 0,5%/K w przypadku modułów z krzemu polikrystalicznego oraz o 0,2%/K w przypadku modułów z krzemu amorficznego [6]. Jedną z metod, która pozwala na rozwiązanie problemu spadku sprawności ogniw fotowoltaicznych wraz ze wzrostem ich temperatury jest integracja tradycyjnych kolektorów słonecznych fototermicznych z modułami fotowoltaicznymi - ang. photovoltaic thermal - PVT [5], [6]. Pod modułami fotowoltaicznymi przepuszcza się czynnik (zazwyczaj woda lub powietrze) odbierający od nich ciepło (analogicznie jak w kolektorach słonecznych). Taki zabieg pozwala na obniżenie temperatury pracy ogniw fotowoltaicznych oraz zachowanie stosunkowo wysokiej sprawności ogniw fotowoltaicznych. Uzyskane dodatkowo ciepło można wykorzystać np. do wstępnego podgrzewania ciepłej wody użytkowej. Względny wzrost sprawności elektrycznej dzięki chłodzeniu ogniw fotowoltaicznych może wynosić nawet do 20% [7]. W dalszej części pracy opisano model matematyczny, który został wykorzystany do przeprowadzenia symulacji komputerowej działania hybrydowej mikroinstalacji słonecznej.

## 2. Model matematyczny

Jako wejściowe dane meteorologiczne dla Warszawy wykorzystano temperaturę powietrza zewnętrznego, napromieniowanie całkowite i jego składowe. Wykorzystane dane to dane godzinowe dla uśrednionego roku (wyliczone na podstawie danych wieloletnich) [8]. Do określania napromieniowania słonecznego docierającego do modułów PVT wykorzystano model izotropowy promieniowania słonecznego dyfuzyjnego (model Liu-Jordana). Zgodnie z teorią Liu-Jordana godzinne napromieniowanie słoneczne $I_c$ docierające na powierzchnię odbiornika pochyloną pod kątem $\beta$ do poziomu zawiera trzy składowe [9]:
– promieniowanie bezpośrednie,
– promieniowanie rozproszone,
– promieniowanie odbite od otoczenia.

Równanie opisujące napromieniowanie słoneczne $I_c$ docierające na powierzchnię odbiornika pochyloną pod kątem $\beta$ do poziomu ma następującą postać, [9]:

$$I_c(t) = I_b(t)R_b(t) + I_d(t)R_d + (I_b(t) + I_d(t))\rho_o R_o \quad (1)$$

gdzie: $t$ - czas, [s]

$I_b(t)$ - napromieniowanie godzinne bezpośrednie, [J/m$^2$];

$I_d(t)$ - napromieniowanie godzinne dyfuzyjne, [J/m$^2$];

$R_b(t)$ - współczynnik korekcyjny dla promieniowania bezpośredniego, [-];

$R_d$ - współczynnik korekcyjny dla promieniowania rozproszonego, [-];

$\rho_o$ - refleksyjność podłoża, [-];

$R_o$ - współczynnik korekcyjny dla promieniowania odbitego, [-].

W obliczeniach zastosowano uproszczony model matematyczny modułów PVT. Dla uproszczenia przeprowadzonej analizy przyjęto, że średnia temperatura modułów PVT - $T_{PVT}$ jest równa średniej temperaturze czynnika chłodzącego moduł [5], [10], [11]. Sprawność modułów fotowoltaicznych została opisana następującą zależnością, [10]:

$$\eta_{el}(t) = \eta_{ref}(1 - B_{ref}(T_{PVT}(t) - T_{ref})) \quad (2)$$

gdzie: $\eta_{el}(t)$ - sprawność elektryczna modułu fotowoltaicznego, [-];

$\eta_{ref}$ - sprawność elektryczna modułu fotowoltaicznego w warunkach standardowych, [-];

$B_{ref}$ - temperaturowy współczynnik spadku sprawności, [1/K];

$T_{PVT}(t)$ - temperatura modułu PVT, [K];

$T_{ref}$ - temperatura referencyjna modułu PVT, [K].

Moc elektryczna modułów PVT wyznaczana była z następującej zależności:

$$Q_{el}(t) = \eta_{el}(t) \cdot A_{PVT} \cdot \frac{I_c(t)}{\Delta t} \quad (3)$$

gdzie: $Q_{el}(t)$ - moc elektryczna modułów, [W];

$A_{PVT}$ - powierzchnia modułów fotowoltaicznych, [m$^2$];

$\Delta t = 3600$ s - krok czasowy wykorzystywany podczas obliczeń, [s].

Podczas wyliczania mocy elektrycznej instalacji PVT dodatkowo uwzględniono średnioroczną sprawność falownika oraz przewodów DC i AC, [12]. Sprawność termiczna modułów PVT została określona zgodnie z rozszerzonym modelem Hottella -Whilliera-Blissa następująco, [13]:

$$\eta_{th} = F_R\left[(\tau\alpha)(1-\eta_{el}(t)) - U_L\left(\frac{T_{in}(t)-T_a(t)}{\frac{I_c(t)}{\Delta t}}\right)\right] \tag{4}$$

gdzie: $F_R$ - współczynnik odprowadzenia ciepła z kolektora, [-];

$\tau\alpha$ - współczynnik transmisyjno-absorpcyjny, [-];

$U_L$ - współczynnik strat ciepła, [W/(m$^2$K)];

$T_{in}(t)$ - temperatura cieczy na wejściu do kolektora, [K];

$T_a(t)$ - temperatura powietrza atmosferycznego, [K].

Moc cieplna użyteczna uzyskiwana z modułów PVT była określana następująco:

$$Q_u(t) = \eta_{th} \cdot A_{PVT} \cdot \frac{I_c(t)}{\Delta t} \tag{5}$$

gdzie: $Q_u(t)$ - moc cieplna użyteczna, [W];

$A_{PVT}$ - powierzchnia modułów PVT, [m$^2$];

$\eta_{th}$ - sprawność termiczna, [-];

Założono, że ciepło jest odzyskiwane z całej powierzchni modułów PVT. Zbiornik magazynujący jest zbiornikiem z pełnym mieszaniem, tzn. temperatura $T_s$ czynnika magazynującego w danej chwili czasu *t* jest jednakowa w całej objętości zbiornika. Założono, że zużycie energii przez dodatkowe urządzenie mieszające jest na tyle niewielkie, że można je pominąć w bilansie energetycznym zbiornika. Zgodnie z powyższymi założeniami bilans energii zbiornika magazynującego w danej chwili *t* można zapisać jako równanie różniczkowe następującej postaci, [9]:

$$(\rho \cdot c_w \cdot V)\frac{dT_s}{dt} = Q_{in}(t) - Q_{out}(t) \tag{6}$$

gdzie: $\rho$ - gęstość wody, [kg/m$^3$];

$c_w$ - ciepło właściwe wody, [J/(kgK)];

$V$ - objętość zasobnika, [m$^3$];

$Q_{in}(t)$ - moc cieplna dostarczana do zbiornika magazynującego, [W];

$Q_{out}(t)$ - moc cieplna pobierana ze zbiornika magazynującego, [W].

Wszystkie obliczenia przeprowadzono z przedziałem czasowym $\Delta t = 3600$ s. Po scałkowaniu równanie (6) zapisano następująco:

$$T_s^{t+1} = T_s^t + \frac{\Delta t}{V \rho c_w}\left[Q_{in}^t(t) - Q_{out}^t(t)\right] \tag{7}$$

Równanie (7) określa temperaturę magazynowania po czasie Δt. Dodatkowo założono, że temperatura magazynowania $T_s$ nie może osiągnąć wartości mniejszej niż wartość minimalnej temperatury magazynowania $T_{min}$ oraz wartości większej niż wartość maksymalnej temperatury magazynowania $T_{max}$. Gdy temperatura magazynowania jest wyższa lub równa wymaganej temperaturze c.w.u. - $T_{cwu}$, wtedy woda jest pobierana bezpośrednio ze zbiornika magazynującego, który jest uzupełniany zimną wodą wodociągową o temperaturze $T_{min}$. W przypadku, gdy woda w zbiorniku magazynującym ma temperaturę niższą niż $T_{cwu}$ , wtedy woda również jest pobierana ze zbiornika ale dodatkowo jest jeszcze podgrzewana konwencjonalnym podgrzewaczem, tak aby uzyskać wymaganą temperaturę.

## 3. Analiza wyników

W tabeli 1 zestawione zostały wybrane wartości parametrów wykorzystanych do przeprowadzenia symulacji komputerowej funkcjonowania hybrydowej mikroinstalacji słonecznej.

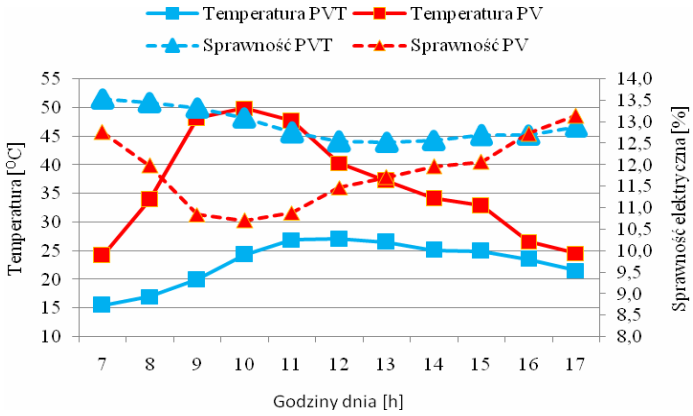
Rozważana instalacja PVT ma moc 2 kWp, co odpowiada powierzchni modułów równej 13 m$^2$. Rozważano moduł hybrydowy PVT bez osłony. W sy-

Tabela 1. Wartości wybranych parametrów wykorzystanych podczas analizy

Table 1. The selected parameter values used in the analysis

| Lp. | Symbol | Opis | Wartość | Źródło |
|---|---|---|---|---|
| 1. | $\eta_{ref}$ | sprawność elektryczna modułu fotowoltaicznego w warunkach standardowych [-] | 0,127 | [10] |
| 2. | $B_{ref}$ | temperaturowy współczynnik spadku sprawności [-] | 0,0063 | |
| 3. | $A_{PVT}$ | powierzchnia modułów PVT [m$^2$] | 13 | - |
| 4. | $A_{PV}$ | powierzchnia modułów PV [m$^2$] | 13 | - |
| 5. | $F_r$ | współczynnik odprowadzenia ciepła [-] | 0,6 | [13] |
| 6. | $U_L$ | współczynnik strat ciepła, [W/(m$^2$K)] | 22 | |
| 7. | τα | współczynnik transmisyjno-absorpcyjny, [-] | 0,78 | |
| 8. | $V$ | objętość zasobnika c.w.u., [m$^3$] | 0,4 | - |

mulacji założono, że moduły są skierowane na południe i pochylone pod kątem 45 stopni do poziomu. Moduły nie są zacieniane. Założono, że instalacja pracuje na potrzeby budynku jednorodzinnego zlokalizowane w Warszawie.
Na rysunku 1 zaprezentowane zostały dzienne zmiany temperatury modułów fotowoltaicznych oraz sprawności elektryczne, w dniu 6 czerwca, w przypadku instalacji PVT oraz w przypadku analogicznej instalacji PV (bez chłodzenia modułów). Można zaobserwować , że zastosowanie chłodzenia modułów w przypadku instalacji PVT pozwala na znaczne obniżenie wartości osiąganych temperatur, co bezpośrednio przekłada się na zachowanie wyższych wartości sprawności elektrycznej. To z kolei pozwala na zwiększenie produkcji energii elektrycznej. W rozważanej instalacji PVT roczna produkcja energii elektrycznej wynosi 1714 kWh/rok, a w standardowej analogicznej instalacji PV 1502 kWh/rok. Dodatkową korzyścią z zastosowania instalacji PVT jest ciepło pozyskane z instalacji. Ciepło to jest wykorzystywane do wstępnego podgrzewania c.w.u. Z przeprowadzonej analizy wynika, że roczny uzysk ciepła z instalacji PVT wynosi 2359 kWh/rok (181 kWh/m$^2$/rok).




Rys. 1. Dzienny przebieg temperatury oraz sprawności elektrycznej instalacji PV oraz PVT
Fig. 1. Daily course of temperature and electrical performance of PV and PVT installation

W uproszczonej analizie ekonomicznej założono, że porównujemy instalację PVT z sytuacją, w której cała energia elektryczna jest kupowana z sieci elektroenergetycznej, a c.w.u. przygotowywana jest przy pomocy elektrycznego podgrzewacza. Dodatkowo założono, że zużycie w rozważanym obiekcie jest na tyle duże, że całą wyprodukowana energia elektryczna jest zużywana na bieżąco. W przypadku instalacji PVT daje to oszczędność wynoszącą 1396 PLN/rok (przy założeniu ceny energii elektrycznej 0,60 PLN/kWh). Biorąc pod uwagę, że koszt rozważanej instalacji PVT został oszacowany na 22000 PLN [14] to prosty okres zwrotu rozważanej instalacji wynosi około 16 lat.

## 4. Wnioski

Z przeprowadzonej analizy wynika, że zastosowanie modułów PVT pozwala na znaczne ograniczenie temperatur modułów, co pozwala na utrzymanie wyższych sprawności elektrycznych oraz uzyskanie dodatkowego ciepła użytecznego. Koszty inwestycyjne związane z instalacją PVT są stosunkowo wysokie i nie pozwalają na uzyskanie zadowalających okresów zwrotu nakładów inwestycyjnych. Celowym wydaje się zastosowanie wsparcia finansowego dla tego typu instalacji, aż do momentu gdy efekt skali oraz powszechność tego typu instalacji spowoduje spadek kosztów, a co za tym idzie większą opłacalność inwestycji.

### Literatura

[1] Bai A., Popp J., Balogh P., Gabnai Z., Palyi B., Farkas I., Pinter G., Zsiboracs: Technical and economic effects of cooling of monocrystalline photovoltaic modules under Hungarian conditions, Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 60, 2016, 1086-1099.

[2] Radziemska E.: Thermal performance of Si and GaAs based solar cells and modules: a review. Progr. Energy Combust. Sci., 2003, 29, 407-424.

[3] Tripanagnostopoulos Y.: Aspects and improvements of hybrid photovoltaic/thermal solar energy systems, Solar Energy 81, 2007, 1117-1131.

[4] Lewandowski W.M.: Proekologiczne odnawialne źródła energii, Wydawnictwo WNT, Warszawa 2012.

[5] Bigorajski J. Chwieduk D.: Systemy hybrydowe fotowoltaiczno-termiczno-słoneczne, w: Wybrane problemy techniki Dzięgielewski Andrzej, Szychowski Dariusz, Wernik Jacek ( red.), 2015, 269-279.

[6] Tripanagnostopoulos Y. (2012), Photovoltaic/Thermal Solar Collectors, In: Comprehensive Renewable Energy, Volume 3.

[7] Olchowik J.M. i in.: Comparative analysis of solar cells efficiency in stationary and navigated hybrid systems under southeast Poland conditions, Photovoltaic Energy Conversion, 2006 IEEE 2006 Proc. of 4th World Conference on Photovol taic Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii, 7-12 maja 2006.

[8] Strona internetowa Ministerstwa Infrastruktury i Budownictwa, http://mib.gov.pl/2-Wskazniki_emisji_wartosci_opalowe_paliwa.htm#, data dostępu: 18.05.2016.

[9] Chwieduk D. (2011), *Energetyka słoneczna budynku*, Wydawnictwo "Arkady", Warszawa.

[10] Skoplaki E., Palyvos J.A., Operating temperature of photovoltaic modules: A survey of pertinent correlations, Renewable energy 34, 2009, 23-29.

[11] Moharram K.A., Abd-Elhady M.S., Kandil H.A., El-Sherif H.: Enhancing the performance of photovoltaic panels by water cooling, Ain Shams Engineering Journal 2013, 4, 869-877.

[12] Piątek W.: Ekonomika różnych instalacji PV, Ośrodek Szkoleniowo-Badawczy w Zakresie Energii Odnawialnej w Ostoi, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, 2014.

[13] Anderson T.N., Duke M., Morrison G.L., Carson J.K. (2009), *Performance of a building integrated photovoltaic/thermal (BIPVT) solar collector*, Solar Energy, str. 445-455.

[14] Chwieduk Dorota, Bigorajski Jarosław, Michał Chwieduk: *Narzędzie użytkowe wymiarowania i symulacji funkcjonowania słonecznych systemów grzewczych w warunkach krajowych*, w: Instal, Ośrodek Informacji "Technika instalacyjna w budownictwie", nr 12, 2013, ss. 39-42.

## TECHNICAL AND ECONOMIC ANALYSIS OF HYBRID SOLAR MICROINSTALLATION

**S u m m a r y**

The article is devoted to the analysis of hybrid solar installation. Article applies both to the production of electricity and heat from solar radiation. The biggest problem associated with the generation of electricity from solar energy is relatively low efficiency of photovoltaic cells currently available. Most of the absorbed solar energy is converted to heat, which is lost to the environment. This heat raises the temperature of photovoltaic cells. Photovoltaic cells have the property that the higher the temperature, the lower achieve efficiency. To solve this problem we can receive heat from the photovoltaic cells - such a solution is called a photovoltaic thermal - PVT.

The article describes the model of solar radiation and the model of the installation concerned. As input data were used: the ambient temperature, the total irradiation and its components. Semispherical radiation intensity incident on the plane of the receiver of the orientation and the inclination was determined by the model of isotropic diffuse solar radiation (model Liu-Jordan). To model hybrid PVT collector was used a modified model Hottel-Whillier-Bliss. The analysis shows that the installation of PVT with the power of 2 kWp can produce 1714 kWh of electricity per year and 2359 kWh of heat per year. Results presented in this paper show that hybrid systems PVT can be effectively used in domestic conditions, but payback period time is quite long (16 years).

**Keywords:** renewable energy sources, solar energy, photovoltaic, hybrid installations

DOI:10.7862/rb.2016.182

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 25-42

**Jan BRÓDKA**[1]
**Andrzej WOJNAR**[2]

# PROJEKTOWANIE WIĄZARÓW Z CEOWNIKÓW I KĄTOWNIKÓW RÓWNORAMIENNYCH O WĘZŁACH TYPU K. Część 1. WĘZŁY PASA DOLNEGO

Wiązary dachowe o węzłach typu K projektuje się według układu prętów pokazanego na rys. 1. Pasy kratownicy wykonuje się z ceowników, a skratowanie z kątowników równoramiennych. Połączenie krzyżulców z pasem dolnym kratownicy można wykonać jak na rys. 2 lub 3. W pierwszym przypadku występuje nieosiowe połączenie krzyżulców i pasa. Przedstawiono sposób sprawdzania nośności węzła kratownicy, wykonanego według rysunku 2, biorąc pod uwagę wpływ momentu zginającego w pasie dolnym kratownicy (rys. 4) na nośność węzła.

**Słowa kluczowe:** kratownice stalowe, projektowanie węzłów kratownic z prętów o przekroju otwartym, mimośrodowe połączenie prętów skratowania z pasem dolnym kratownicy

## 1. Wstęp

Konstrukcje stalowe z kształtowników zamkniętych o przekrojach kwadratowych i prostokątnych [5], [10] są powszechnie stosowane jako przekrycia dachowe budynków różnego przeznaczenia. W państwach Europy Zachodniej, Ameryki Północnej, Australii, Japonii i wielu innych ich walory, związane z niskim zużyciem stali, prostym wykonaniem elementów i dobrą ochroną przed korozja, są powszechnie uznane. Wiązary dachowe hal produkcyjnych i magazynowych oraz pawilonów usługowych o średnich i dużych rozpiętościach są regularnie wznoszone z tych wyrobów, gdyż umożliwiają uzyskanie niskich kosztów wytwarzania i odnowy powłok antykorozyjnych przy wydatkowaniu małej ilości robocizny i materiału.

W Polsce tego rodzaju konstrukcje są stosowane w zakresie niedużym do obiektów specjalnego użytkowania. Ich niezbyt powszechne stosowanie wynika nie

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Jan Bródka, 01-452 Warszawa, ul. Księcia Janusza 41/43 m. 152, jan.brodka@gmail.com

[2] Andrzej Wojnar, Politechnika Rzeszowska, Katedra Konstrukcji Budowlanych, awojnar@prz.edu.pl

z możliwości wytwórczych przedsiębiorstw wykonujących konstrukcje stalowe, lecz z tego, że oszczędzanie materiału i robocizny jest nadal mało popularne. Koszty wytwarzania są związane nie tylko z wyposażeniem technologicznym wytwórni konstrukcji stalowych i umiejętnościami załogi, lecz także z poziomem płac. Te są niższe niż w wymienionych wcześniej państwach, co powoduje, że cena konstrukcji jest nadal konkurencyjna mimo wyższego zużycia materiału. Z kolei projektanci wolą przygotowywać dokumentację według wyuczonych wcześniej rozwiązań konstrukcyjnych, skoro ani wytwórca konstrukcji, czy też inwestor budynku nie skłaniają ich do zmian ich nawyków. Uczelnie dostosowują się do istniejącej sytuacji.

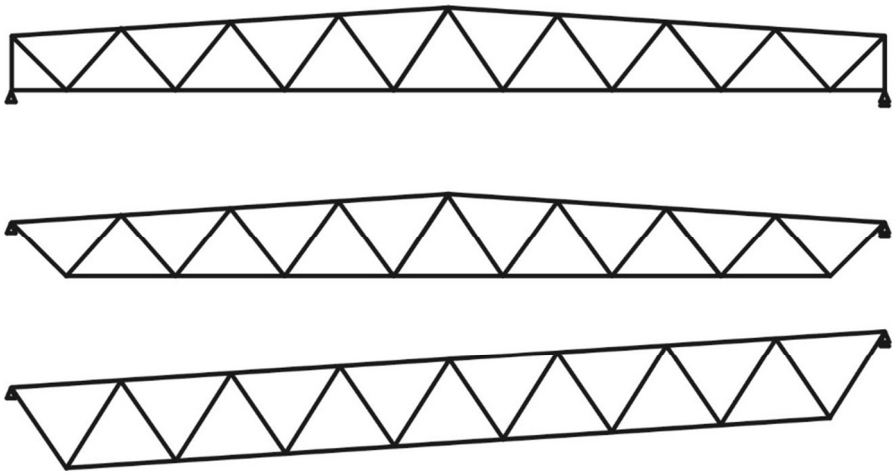
Zarówno krajowe przedsiębiorstwa, produkujące konstrukcje stalowe i wznoszące z nich budynki są dobrze wyposażone technicznie do wytwarzania elementów z kształtowników zamkniętych, jak też projektanci mają do dyspozycji odpowiednie normy [7] do [9], czy też pomoce, dotyczące ich kształtowania i obliczania [1], [5], [11]. Pracownie projektowania pod względem ekonomicznym są najsłabszym ogniwem procesu inwestycyjnego i zawsze są zmuszane do ustępstw względem inwestorów i wykonawców, którzy żądają krótkich terminów i niskich cen ich usług.

W publikacjach [2] do [4] przedstawiono zagadnienia projektowania i obliczania wiązarów dachowych o średniej rozpiętości, które wskutek prostoty wykonania mogą skłaniać projektantów i wykonawców do zmiany ich podejścia. Opracowano propozycje kształtowania elementów kratowych i ich węzłów, powodujących nieco większe zużycie materiału, lecz podobne wydatkowanie robocizny w odniesieniu do konstrukcji z kształtowników zamkniętych, a więc znacznie mniejsze niż w elementach z kątowników, łączonych na blachy węzłowe. Cena takich elementów powinna zachęcać do ich stosowania. Jednak jak to zawsze jest z nowymi produktami, w każdym z proponowanych rozwiązań przy ich zaletach pojawiły się pewne niedostatki. W wypadku wiązarów dachowych o węzłach typu N [2], [3] jest konieczne projektować pasy dolne z takich samych kształtowników jak pasy górne. To powoduje zbędne zużycie stali. Mimo stosowania na te pręty materiału różnych gatunków ich koszt jest jednak zwiększony. Natomiast w wypadku wiązarów typu K [4] niektóre węzły pasa górnego trzeba dodatkowo wzmacniać, gdyż ceowe wkładki dogodne do prostego układania spoin pachwinowych są zbyt cienkich środników, aby bez nich przenosiły, przykładane do nich obciążenie.

Obecny artykuł służy częściowemu eliminowaniu wskazanych niedostatków przy zachowaniu prostoty kształtowania, obliczania i wytwarzania. Pojawiła się jednak konieczność zwiększenia mimośrodów mocowania krzyżulców względem osi pasów.

## 2. Kształtowanie elementów i ich węzłów

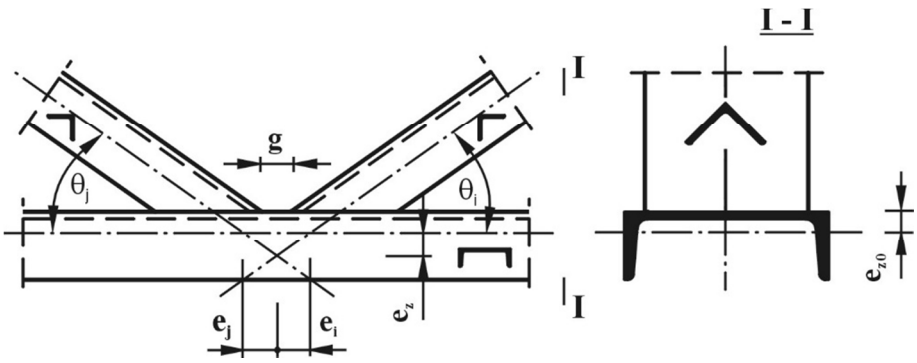
Wiązary dachowe o węzłach typu K z ceowników stosowanych na pasy i kątowniki równoramienne na krzyżulce projektuje się według układu prętów kratownicy, pokazanych na rys. 1. Ceowniki pasów i kątowniki skratowania umiesz-



Rys. 1. Kratownice dachowe o węzłach typu K

Fig. 1. Roof trusses, K joints

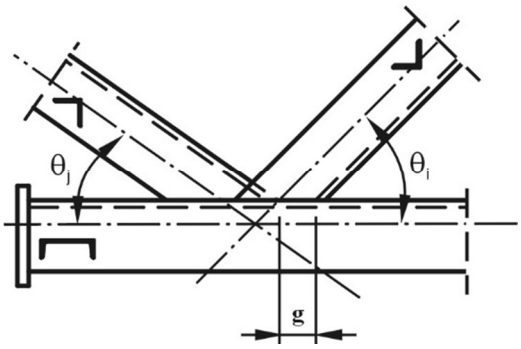
cza się w płaszczyźnie kratownicy w ich osiach symetrii. Słupek podporowy zwykle projektuje się o przekroju prostokątnym z elementu skrzynkowego lub rzadziej z kształtownika zamkniętego Podpory wiązara wykonuje się w poziomie pasa dolnego. Jest to konieczne ze względu na to, że węzły krzyżulców i pasa dolnego w obszarze przypodporowym kształtuje się na dość dużych mimośrodach. Wtedy umieszczenie podpory w poziomie pasa górnego wymagałoby projektowania skrajnego krzyżulca przy bardzo niekorzystnym działaniu momentu zginającego i stosowania nadmiernie dużego przekroju tego pręta. W takiej sytuacji projektowej węzły krzyżulców z pasem dolnym kształtuje się według rys. 2. Odstęp g między narożami kątowników powinien być mały o wartości $t_1 + t_2$ (gdzie t jest grubością półek kątowników).




Rys. 2. Połączenie krzyżulców z pasem dolnym kratownicy – węzeł typu K

Fig. 2. Connection between brace members and lower channel section chord of truss - K joint

Można także projektować węzły według rozwiązania, pokazanego na rys. 3. Wtedy odstęp g między narożami kątowników jest duży, umożliwiając osiowe dołączanie krzyżulców i pasa. Wówczas nie występuje zginanie pasa, a także krzyżulca skrajnego. W takim wypadku podpory umieszcza się w poziomie pasa górnego (rys. 1b). Rozwiązanie według rys. 3 nie jest jednak pozbawione mankamentu. Będzie o nim mowa w dalszej części artykułu.




Rys. 3. Inne połączenie krzyżulców z pasem dolnym kratownicy

Fig. 3. Another connection between brace members and lower channel section chord of truss

## 3. Nośność węzła

Kształty węzłów, pokazanych na rysunkach 2 i 3, wskazują, że należy je rozważać jako węzły podatne. Oceny długości współpracujących spoin pachwinowych, układanych wzdłuż półek kątowników dokonano w [3] w wypadku słupka kratownicy, a więc wtedy, kiedy kątownik jest dołączany pod kątem $\theta = \pi/2$. Podane tam wzory można zastosować w odniesieniu do połączeń pod kątem $\theta < \pi/2$. Modyfikacja polega na wprowadzeniu funkcji kąta $\theta_j$ lub $\theta_i$, przy czym indeksy odnoszą się do krzyżulców umieszczonych w węźle z jego strony lewej lub prawej (patrz rys. 2 i rys. 3). Będzie:

$$d_{f1} = \frac{\pi b}{4\sin\theta}, \qquad d_{f2} = \frac{2b}{\sqrt{2}\sin\theta}, \qquad d_f = \frac{d_{f1} + d_{f2}}{2} \tag{1a}$$

oraz

$$b_{eff} = 0{,}6124 d_f \tag{1b}$$

Dalsza ocena połączenia spawanego i części składowych węzła jest przeprowadzana w sposób, omówiony w [3].

## 4. Nośność prętów kratownicy

Projektowanie i obliczanie przeprowadza się zgodnie z regułami, podanymi w PN-EN 1993-1-1 i PN-EN 1993-1-8. W wypadku krzyżulców należy oprócz ich obciążenia podłużnymi siłami ściskającymi lub rozciągającymi brać pod uwagę zginanie w płaszczyźnie symetrii lub wyboczenie giętno – skrętne ze względu na to, że pręty te są dołączane w węźle na mimośrodzie ich osi względem osi pasa (patrz wskazania w [3]). W wypadku węzła, projektowanego zgodnie z rys. 2, powstaje moment zginający ceownik pasa. Sposób oceny nośności pręta kratownicy rozciąganego i zginanego w płaszczyźnie symetrii wiązara podano w [1] i [5]. Biorąc przedstawione tam informacje, skrótowo wskazuje się w odniesieniu do węzła, pokazanego na rys. 2:

$$e_z = \left( t_j + \frac{v_j + e_{dj}}{\sin\theta_j} \right) \tan\theta_j - e_{z0} \tag{2}$$

przy czym:

t – grubość półki kątownika, będąca częścią odstępu g,

v – odstęp środka ciężkości zastosowanego kątownika od jego zewnętrznego naroża, oceniany w osi symetrii,

$e_d$ – mimośród zastosowanego kątownika według [3],

$$e_d = \left( b - 0{,}5 b_{eff} - \sqrt{2} v \right) / \sqrt{2} \tag{3}$$

b – szerokość półki kątownika,

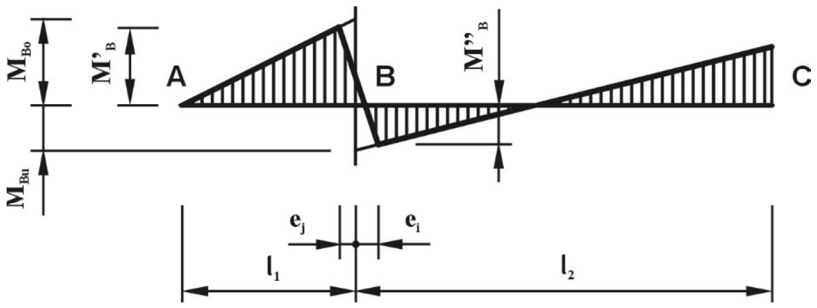
$b_{eff}$ – długość współpracująca półki kątownika, ustalona przy $\theta = \pi/2$,

$\theta$ – kąt nachylenia krzyżulca względem pasa ($\theta < \pi/2$),

$e_{z0}$ – odstęp od osi ceownika zastosowanego na pas do zewnętrznego brzegu jego środnika.

Pas jest obciążony siłą podłużną $N_{0,Ed}$, siłą poprzeczną $V_{Ed} = K_j \sin\theta_j = K_i \sin\theta_i$ oraz momentem zginającym $M'_B$ (w przedziale z lewej strony węzła) lub $M''_B$ (w przedziale z prawej strony węzła), (patrz rys. 4). Krzyżulce są projektowane z kątowników równoramiennych, których siły podłużne powodują powstawanie w pasach sił poprzecznych $V_{Ed}$. Jednak ich ramiona w stosunku do płaszczyzny środnika pasa są nachylone również pod kątem $\alpha = \theta_j$ lub $\alpha = \theta_i$. Wskutek tego siła $V_{Ed}$ działa na środnik, wywołując składową $V_{Ed,1} = V_{Ed} \sin\alpha$ oraz składową $V_{Ed,2} = V_{Ed} \cos\alpha$. Siły $V_{Ed,1}$ wywołują naprężenia styczne w przekroju pasa, natomiast siły $V_{Ed,2}$ równoważą się w węźle. Moment zginający w węźle wynosi:

$$M_B = N_{0,Ed} e_z \tag{4}$$




Rys. 4. Wykres momentu zginającego w węźle kratownicy

Fig. 4. The diagram of bending moment in lower chord truss joint

Jego wartość dzieli się między odcinki przywęzłowe o długościach $l_1$ i $l_2$ w założeniu stałego momentu bezwładności (rys. 4) o wartościach $M_{Bo}$ i $M_{Bu}$. Do obliczania naprężeń w pasie przyjmuje się wartości momentów zginających $M'_B$ lub $M''_B$, gdyż w obszarze węzła nie następuje skokowa zmiana ich wartości. Ocenia się je w punktach przecięcia się osi krzyżulców z osią pasa, a więc w odstępach $e_j$ i $e_i$ od punktu B. Wartości tych odstępów wynoszą:

$$e_j = \frac{e_z}{\tan\theta_j} \qquad \text{lub} \qquad e_i = \frac{e_z}{\tan\theta_i} \tag{5}$$

Obliczeniowe momenty zginające w przedziałach pasa ustala się:

$$M'_B = \frac{l_1 - e_j}{l_1 + l_2} \cdot \frac{l_2}{l_1} M_B \tag{6a}$$

$$M''_B = \frac{l_1 - e_i}{l_1 + l_2} \cdot \frac{l_1}{l_2} M_B \tag{6b}$$

Naprężenia w przedziałach pasa oblicza się, jak następuje:

$$\sigma = \frac{M'_B}{W_y} \le f_y \tag{7a}$$

lub

$$\sigma = \frac{N_{0,Ed}}{A_0} + \frac{M''_B}{W_y} \le f_y \tag{7a}$$

oraz

$$\tau = \frac{K_j \sin\theta_j}{\sqrt{3}A_v} \le f_y \tag{7b}$$

Maksymalną wartość naprężenia ustala się wzorem Hubera:

$$\sigma_{\max} = \sqrt{\sigma^2 + 3\tau^2} \le f_{y0} \tag{7c}$$

We wzorach (7) symbole mają znaczenie:

$A_0$ – przekrój pasa dolnego,

$A_v$ – pole przekroju czynnego ceownika przy ścinaniu w płaszczyźnie osi z – z, prostopadłej do osi y –y, ustalane zgodnie z PN-EN 1993-1-1,

$A_v = 2(h_b t_{wb} + r_{jb} t_{fb})$,

$h_b$ – szerokość stopki ceownika,

$t_{wb}$ – grubość stopki ceownika,

$r_{jb}$ – promień zaokrąglenia między stopką i środnikiem ceownika,

$t_{fb}$ – grubość środnika ceownika,

$f_{y0}$ – granica plastyczności stali, zastosowanej na pas,

$W_y$ – wskaźnik wytrzymałości przekroju pasa dolnego,

$W_y = I_y/z$,

$I_y$ – moment bezwładności przekroju pasa względem osi y - y, prostopadłej do osi z - z,

z – odległość od osi obojętnej do krawędzi pasa ceownika, $z = h_{b0} – e_{z0}$,

$h_{b0}$ – szerokość stopki ceownika, zastosowanego na pas,

$e_{z0}$ – jak na rysunku 2.

Zwykle naprężenie zredukowane według (7c), ustalone w odniesieniu do skrajnego przedziału pasa jest wartością miarodajną do oceny nośności pasa dolnego.

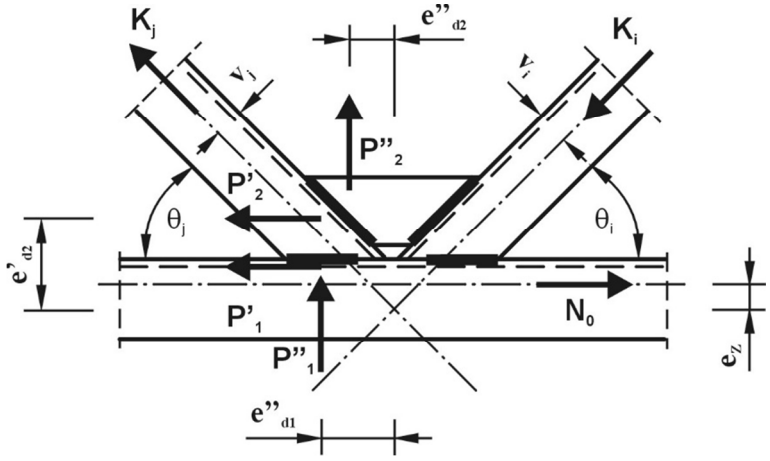
Projektując węzeł według rozwiązania z rys. 2, może wystąpić konieczność zmniejszenia naprężenia stycznego w przekroju pasa dolnego. Uzyskuje się to, projektując w odpowiednim węźle dodatkową blachę węzłową według rys. 5.

Oceny sił w częściach składowych węzła dokonuje się w następujący sposób.

Składowe siły w krzyżulcu równoległa lub prostopadła do pasa, przenoszone przez układ odcinków spoin pachwinowych, łączących elementy z pasem i z blachą węzłową są sumami (rys. 5):

$$4P'_1 + 2P'_2 = K\cos\theta \tag{8a}$$

$$4P''_1 + 2P''_2 = K\sin\theta \tag{8b}$$




Rys. 5. Układ spoin łączących krzyżulce i pas dolny kratownicy

Fig. 5. Welded connection between brace members and lower chord of the truss

Te siły powodują powstanie momentów zginających w tymże układzie odcinków spoin pachwinowych względem punktu przecięcia się osi krzyżulców. Ustala się je:

$$4P'_1 e'_{d1} + 2P'_2 e'_{d2} = N_{0,Ed} e_z \tag{8c}$$

$$4P''_1 e''_{d1} + 2P''_2 e''_{d2} = -N_{0,Ed} e_z \tag{8d}$$

Z rozwiązania układu równań (8) uzyskuje się:

$$P'_1 = \frac{N_{0,Ed} e_z - 0,25 K_j \cos\theta_j e'_{d2}}{4\left(e'_{d1} - e'_{d2}\right)} \tag{9a}$$

$$P'_2 = 0,5 K_j \cos\theta_j - 2P'_1 \tag{9b}$$

$$P''_1 = -\frac{N_{0,Ed} e_z + 0,25 K_j \sin\theta_j e''_{d2}}{4\left(e''_{d1} - e''_{d2}\right)} \tag{9c}$$

$$P''_2 = 0,5 K_j \sin\theta_j - 2P''_1 \tag{9d}$$

Tak ustalone siły, obciążające węzeł, służą do oceny nośności jego składowych części, czyli odcinków spoin pachwinowych i krzyżulca w styku ze środnikiem ceownika pasa. Siła $P''_1$ zmniejsza siłę poprzeczną, przyłożoną do pasa, która obecnie wynosi:

$$V_{Ed} = K_j \sin\theta_j - \frac{N_{0,Ed} e_z + 0,25 K_j \sin\theta_j e''_{d2}}{2\left(e''_{d1} - e''_{d2}\right)} \tag{10}$$

W wypadku krzyżulca, obciążonego siłą $K_i$, we wzorach (9) i (10) należy zastąpić indeksy j przez indeksy i oraz przy symbolu K znak zmienić na przeciwny, gdyż jest to pręt ściskany.

Naprężenia w odcinkach spoin pachwinowych, łączących blachę węzłową z krzyżulcami, których długość wynosi $l_2$, oblicza się, ustalając najpierw składowe osi podłużnych tych spoin:
– składowa, działająca równolegle:

$$P_{2,par} = \left(P'_2 + P''_2\right) / cos\theta \tag{11a}$$

– składowa, działająca prostopadle:

$$P_{2,per} = \left(P'_2 - P''_2\right) / sin\theta \tag{11b}$$

przy czym przyjmuje się $\theta_j$ lub $\theta_i$ w zależności od tego, która z sił $K_j$ lub $K_i$ oddziałuje na wartości sił $P'_2$ lub $P''_2$.

Spoiny, łączące blachę węzłową z krzyżulcami składają się z dwóch odcinków o grubości $a_{w2} \le 0,7 \cdot 0,5 t_p = 0,35 t_p$ (gdzie $t_p$ jest grubością blachy węzłowej). Przekrój układu tych odcinków wynosi $A_{w2} = 2 a_{w2} l_2$. Naprężenia w odcinkach tych spoin wynoszą:

$$\tau_{\parallel} = P_{2,par} / A_{w2} = \left(P'_2 + P''_2\right) / \left(A_{w2} cos\theta\right) \tag{12a}$$

$$\tau_{\perp} = P_{2,per} / A_{w2} = \left(P'_2 - P''_2\right) / \left(A_{w2} sin\theta\right) \tag{12b}$$

oraz naprężenie maksymalne:

$$\tau_{max} = \sqrt{\tau_{\parallel}^2 + \tau_{\perp}^2} \le f_{vw,d} \tag{12c}$$

przy czym $f_{vw,d}$ jest obliczeniową wytrzymałością spoiny pachwinowej na ścinanie.

Blacha czołowa jest rozciągana i ścinana siłami $P'_2$ i $P''_2$. Jej nośność ustala się zgodnie z regułami PN-EN 1993-1-1 w sposób następujący:

$$\left(\frac{\sigma_{Ed}}{f_{yp} / \gamma_{M0}}\right)^2 + 3\left(\frac{\tau_{Ed}}{f_{yp} / \gamma_{M0}}\right)^2 \le 1 \tag{13}$$

przy czym:

$\sigma_{Ed} = P'_2/(h_p t_p)$ – rozciągające naprężenie normalne,

$\tau_{Ed} = 1{,}5P''_2 / (h_p t_p)$ – naprężenie styczne,

$h_p$ – wysokość blachy węzłowej ($h_p = l_2/\sin\theta$),

$t_p$ – grubość blachy węzłowej, zwykle przyjmowana o grubości półki kątownika mniejszego rozmiaru, czyli kątownika rozciąganego,

$f_{yp}$ – granica plastyczności stali, zastosowanej na blachę węzłową.

## 5. Nośność prętów kratownicy

Projektując wiązary omawianego rodzaju, należy brać pod uwagę dwie sytuacje podczas doboru przekroju krzyżulców:

1) W rozwiązaniu węzła według rys. 2 pręty skratowania rozciągane lub ściskane są przycinane tak, że powstaje szpic w narożu, tworzonego przez półki kątownika. Ta część ścianek krzyżulca obliczeniowo jest wyłączona w kontakcie z pasem z przenoszenia siły podłużnej, występującej w krzyżulcu. W takim wypadku w ściankach szpica nie powstaje koncentracja naprężeń, uniemożliwiająca prawidłową ocenę długości współpracującej odcinków spoin pachwinowych.

2) Natomiast w rozwiązaniu węzła według rys. 3 ukośne cięcie kątownika powoduje powstanie szpica na zakończenie długości współpracującej spoiny pachwinowej. Węzły z takimi szpicami na ogół nie są zalecane do stosowania w elementach nośnych konstrukcji stalowych. Jednak propozycje węzłów o podobnych szpicach są znane (patrz rys. 7.33, rys. 7.34, rys. 6.16, rys. 6.33 w [6] lub rys. 10.28, rys. 10.29 w [10]). Najczęściej projektuje się je w wypadku prętów obciążonych niedużymi siłami podłużnymi i przy niedużych przekrojach poprzecznych tych elementów. Jednak autorzy tych wskazań nie ograniczyli korzystania z nich przy występowaniu w prętach większych wartości sił podłużnych. W częściach ścianek krzyżulca z rys. 3 w obszarze szpica mogą jednak powstać duże koncentracje naprężeń. Takie wytężenie zwiększa prawdopodobieństwo zgniecenia ścianki ściskanej lub wystąpienia nadmiernego wydłużenia ścianki rozciąganej, prowadząc do przedwczesnego pęknięcia spoiny pachwinowej. Z tego powodu autorzy proponują projektowanie krzyżulców z omawianymi szpicami o zwiększonym (nadmiernie niewykorzystanym) przekroju poprzecznym kątownika. Nośność prętów poza węzłem ustala się zgodnie z regułami PN-EN 1993-1-1.

## 6. Przykład obliczania prętów i węzła

Węzeł według rys. 2 jest obciążony siłami: $K_j = 394{,}7$ kN, $K_i = -360{,}5$ kN, $N_0 = 538{,}3$ kN. Jego geometria: $\theta_j = 42^o4'6''$, $\sin\theta_j = 0{,}6700$, $\cos\theta_j = 0{,}7434$, $\theta_i = 47^o7'6''$, $\sin\theta_i = 0{,}7328$, $\cos\theta_i = 0{,}6805$.

Pierwszy od podpory krzyżulec projektuje się z kątownika 90×90×11, $A_j = 18{,}7$ cm$^2$, $I_y = 57{,}1$ cm$^4$, v = 3,7 cm, stal S355, $f_{yj} = 355$ MPa, $f_{uj} = 490$ MPa, $\beta_w = 0{,}9$.

Drugi od podpory krzyżulec projektuje się z kątownika 120×120×12, $A_i$ = 27,5 cm$^2$, v = 4,8 cm, $i_y$ = 2,35 cm, $i_ż$ = 4,6 cm, $I_y$ = 152 cm$^4$, $I_w$ = 0, $I_T$ = 13,82 cm$^4$, $r_j = 0{,}5 \cdot 120\sqrt{2}$ = 84,85 mm, $k_b$ = 0,9, $k_w$ = 1,0, stal S355, $f_{yi}$ = 355 MPa, $f_{ui}$ = 490 MPa, $\beta_w$ = 0,9, $\varepsilon$ = 0,81.

Pas dolny projektuje się z ceownika U300, $A_0$ = 58,8 cm$^2$, $z_{e0}$ = 2,7 cm, $h_{b0}$= 100 mm, $t_{fb}$ = 10 mm, $t_{wb}$ = 16 mm, $r_{ib}$ = 16 mm, $I_y$ = 495 cm$^4$, Stal S275, $f_{y0}$ = 275 MPa, $f_{u0}$ = 390 MPa, $\beta_w$ = 0,85.

A. Sprawdzenie nośności pręta, węzła i połączenia drugiego krzyżulca od podpory.

a) Sprawdzenie przy wyboczeniu giętnym w płaszczyźnie symetrii wiązara. Długość krzyżulca: l = 2388,4 mm.

$$\lambda_1 = 93{,}9 \cdot 0{,}81 = 76{,}4 \qquad \bar{\lambda} = \frac{0{,}9 \cdot 2388{,}4}{76{,}4 \cdot 23{,}5} = 1{,}2 \qquad \alpha = 0{,}49$$

$$\Phi = 0{,}5\left[1 + 0{,}49\left(1{,}2 - 0{,}2\right) + 1{,}2^2\right] = 1{,}465$$

$$\chi = \frac{1}{1{,}465 + \sqrt{1{,}465^2 - 1{,}2^2}} = 0{,}47$$

$$N_{Rd} = 0{,}47 \cdot 2750 \cdot 355 = 458{,}8 \cdot 10^3\, N = 458{,}8\ kN$$

$$\frac{360{,}5}{458{,}8} = 0{,}785 < 1{,}0$$

b) Obliczenie mimośrodu w celu osiowego przyłożenia obciążenia we współpracującym przekroju spoin węzła. Ustala się długość współpracującą, stosując wzory (1) przy $\theta = \pi/2$:

$$d_{f1} = 3{,}14 \cdot 120 / 3 = 94{,}2\ mm$$

$$d_{f2} = 2 \cdot 120 / \sqrt{2} = 169{,}7\ mm$$

$$d_f = 0{,}5\left(94{,}2 + 169{,}7\right) = 132\ mm$$

$$b_{eff} = 0{,}6124 \cdot 132 = 80{,}8\ mm$$

Mimośród ustala się, jak następuje:

$$e_d = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(b_l - 0{,}5 b_{eff} - \sqrt{2} v_j\right) = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(120 - 0{,}5 \cdot 80{,}8 - \sqrt{2} \cdot 45\right) = 8{,}27\ mm$$

Moment zginający pręt wynosi:

$$M_{Ed} = K_i e_d = 360{,}5 \cdot 8{,}27 = 2988{,}3\ kNmm$$

Wskaźnik wytrzymałości:

$$z = b_i / \sqrt{2} - v_i = 120 / \sqrt{2} - 48 = 36,9 \ mm$$

$$W_{el,y} = I_y / z = 152 \cdot 10^4 / 36,9 = 41,2 \cdot 10^3 \ mm^3$$

Nośność przekroju przy zginaniu:

$$M_{Rd} = 355 \cdot 41,2 \cdot 10^3 = 14,6 \cdot 10^6 \ Nmm = 14,6 \cdot 10^3 \ kNmm$$

Sprawdzenie nośności

$$\frac{360,5}{458,8} + 2988,3 / 14620 = 0,989 < 1,0$$

c) Sprawdzenie nośności pręta w węźle. Ustala się długość współpracującą połączenia, stosując wzory (1) przy $\theta_i$:

$$d_{f1} = 3,14 \cdot 120 / (4 \cdot 0,7328) = 125,1 \ mm$$

$$d_{f2} = 2 \cdot 120 / \left(\sqrt{2} \cdot 0,7328\right) = 231,6 \ mm$$

$$d_f = 0,5\left(125,1 + 131,6\right) = 178,4 \ mm$$

$$b_{eff} = 0,6124 \cdot 178,4 = 109,5 \ mm$$

Naprężenia w przekroju współpracującym wynoszą:

$$\sigma = \frac{K_i \sin\theta_i}{2 \cdot t_i \cdot b_{eff}} = \frac{360500 \cdot 0,6805}{2 \cdot 12 \cdot 109,5} = 93,3 \ MPa$$

$$\tau = \frac{1,15 \cdot K_i \cos\theta_i}{2\left(b_i - 0,5t_i\right) \cdot t_i} = \frac{1,15 \cdot 360500 \cdot 0,7328}{2\left(120 - 0,5 \cdot 12\right) \cdot 12} = 111,0 \ MPa$$

Przyjęto naprężenia styczne z możliwością wyrównania się w przekroju podczas jego uplastyczniania zmieniającego rozkład paraboliczny na prostokątny. Maksymalne naprężenia zgodnie ze wzorem Hubera wynoszą:

$$\sigma_{max} = \sqrt{93,3^2 + 3 \cdot 111,0^2} = 213,7 \ MPa < 355 \ MPa$$

d) Sprawdzenie naprężeń w spoinach pachwinowych. Przyjęto $a_w$ = 5 mm < 0,7·12 = 8,4 mm oraz $A_w = 4a_w b_{eff} = 4 \cdot 5 \cdot 109,5 = 2190$ mm$^2$.

Siły, obciążające spoiny wynoszą:

$$V_{II} = K_i \cos\theta_i = 360,5 \cdot 0,6805 = 245,3 \ kN$$

$$V_{\perp} = K_i sin\theta_i = 360,5 \cdot 0,7328 = 264,2 \ kN$$

Naprężenia ścinające:

$$\tau_{II} = 245200 / 2190 = 112 \ MPa$$

$$\tau_{\perp} = 264200 / 2190 = 120,6 \ MPa$$

$$\tau_{max} = \sqrt{\tau_{II}^2 + \tau_{\perp}^2} = 164,6 \ MPa < 430 / \left(\sqrt{3} \cdot 0,85 \cdot 1,25\right) = 233,9 \ MPa$$

Dalsze sprawdzenie nośności węzła jest zbędne, gdyż długość współpracująca $b_{eff}$ krzyżulca z kątownika 120x120x12 jest większa niż długość współpracująca krzyżulca z kątownika 90x90x11, a siła $V_{\perp}$ = 246,2 kN jest taka sama.

e) Sprawdzenie wyboczenia giętno – skrętnego przy zginaniu na mimośrodzie $e_d$ = 8,27 mm. Wartości pomocnicze wynoszą (patrz wzory w [3]):

$$i_p^{\ 2} = 2,35^2 + 4,6^2 = 26,7 \ cm^2$$

$$i_s^{\ 2} = 26,7 + 4,8^2 = 49,7 \ cm^2$$

$$c^2 = 0,03 \frac{13,82}{484} \left(0,9 \cdot 238,84\right)^2 = 51,5 \ cm^2$$

Smukłość zastępcza wyboczenia giętno – skrętnego [3]:

$$\lambda_{ZT} = \frac{0,9 \cdot 238,84}{4,6} \sqrt{\frac{51,5 + 49,7 - 0,827\left(8,485 - 2 \cdot 4,8\right)}{2 \cdot 51,5}} \cdot$$

$$\frac{}{\left\{1 \pm \sqrt{1 - \frac{4 \cdot 51,5\left[26,7 - 0,827\left(8,485 + 0,827\right) + 0,1\left(0,9^2 - 1\right)\left(-0,827 - 4,5\right)^2\right]}{\left[51,5 + 49,7 - 0,827\left(8,485 - 2 \cdot 4,8\right)\right]^2}}\right\}} = 58,8$$

$$\lambda_{zT} / \lambda_1 = 58,8 / 76,4 = 0,769 < 1,2$$

Wyboczenie giętno – skrętne nie jest miarodajne do oceny nośności pręta.

B. Sprawdzenie nośności pręta, węzła i połączenia pierwszego krzyżulca od podpory:

a) Sprawdzenie nośności pręta przy rozciąganiu i zginaniu a płaszczyźnie symetrii.

$$d_{f1} = 3,14 \cdot 90 / 4 = 71 \ mm$$

$$d_{f2} = 2 \cdot 90 / \sqrt{2} = 121,3 \ mm$$

$$d_f = 0,5\left(71+121,3\right) = 96,2 \ mm$$

$$b_{eff} = 0,6124 \cdot 96,2 = 58,9 \ mm$$

$$e_d = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(90 - 0,5 \cdot 58,9 - \sqrt{2} \cdot 37\right) = 5,8 \ mm$$

$$M_{Ed} = 394,7 \cdot 5,8 = 2289,3 \ kNmm$$

$$N_{Rd} = 1870 \cdot 355 = 663,9 \ kN$$

$$z = 90 / \sqrt{2} - 37 = 26,6 \ mm$$

$$M_{Rd} = 571000 \cdot 355 / 26,6 = 7620 \cdot 10^3 \ Nmm = 7620 \ kNmm$$

Sprawdzenie nośności:

$$\frac{394700}{883900} + \frac{2289,3}{7620} = 0,895 < 1,0$$

b) Sprawdzenie nośności pręta w węźle:

$$d_{f1} = 3,14 \cdot 90 / \left(4 \cdot 0,67\right) = 105,4 \ mm$$

$$d_{f2} = 2 \cdot 90 / \left(\sqrt{2} \cdot 0,67\right) = 190 \ mm$$

$$d_f = 0,5\left(105,4 + 190\right) = 147,7 \ mm$$

$$b_{eff} = 0,6124 \cdot 147,7 = 90,5 \ mm$$

$$\sigma = 394700 \cdot 0,67 / \left(2 \cdot 90,5 \cdot 11\right) = 132,8 \ MPa$$

$$\tau = 1,15 \cdot 394700 \cdot 0,7434 / \left(2 \cdot 11\left(90 - 0,5 \cdot 11\right)\right) = 181,5 \ MPa$$

$$\sigma_{max} = \sqrt{132,8^2 + 3 \cdot 181,5^2} = 340,9 \ MPa < 355 \ MPa$$

c) Sprawdzenie połączenia. Przyjęto $a_w$ = 7 mm, $A_w = 4 \cdot 7 \cdot 90,5 = 2534$ mm$^2$

$$\tau_{\square} = 294700 \cdot 0,7434 / 2534 = 115,8 \ MPa$$

$$\tau_{\perp} = 394700 \cdot 0,67 / 2534 = 104,4 \ MPa$$

$$\tau_{max} = \sqrt{115,8^2 + 104,4^2} = 214,7 \ MPa < 233,9 \ MPa$$

d) Sprawdzenie nośności środnika pasa dolnego przy jego lokalnym obciążeniu (patrz wzory w [3]):

Wartości nośności $N^*_{j,Rd}$:

- przy uplastycznieniu środnika pasa:

$$N_{1,Rd} = k_m \cdot f_{y0} \cdot t_{fb}^2 \frac{2 + 2{,}8\beta}{\sqrt{1 - 0{,}9\beta}} / \gamma_{M5}$$

$$\beta = \frac{2 \cdot b_{eff}}{\sqrt{2} \cdot b_{jb}} = \frac{2 \cdot 90{,}5}{\sqrt{2} \cdot 300} = 0{,}427$$

$$N_{1,Rd} = 1 \cdot 275 \cdot 10^2 \frac{2 + 2{,}8 \cdot 0{,}427}{\sqrt{1 - 0{,}9 \cdot 0{,}427}} / 1{,}0 = 112 \cdot 10^3 N = 112 \ kN$$

- podczas zginania brzegów pasa:

$$N_{1,Rd} = 2k_m \cdot f_{y0} \cdot t_{fb}^2 \left(2t_j + 10t_{wb}\right) / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = 2 \cdot 1{,}0 \cdot 275 \cdot 10 \left(2 \cdot 11 + 10 \cdot 16\right) / 1{,}0 = 1001 \cdot 10^3 \ N = 1001 \ kN$$

- podczas przebicia pasa:

$$N_{1,Rd} = 2 \frac{f_{y0} \cdot t_{fb}}{\sqrt{3}} \left(2t_j + 2b_{ep}\right) / \gamma_{M5}$$

$$b_{ep} = \frac{10}{b_{fb} / t_{fb}} \cdot \frac{b_{eff}}{\sqrt{2}} = \frac{10}{300 / 10} \cdot \frac{90{,}5}{\sqrt{2}} = 21{,}3 \ mm < \frac{90{,}5}{\sqrt{2}} = 64 \ mm$$

$$N_{1,Rd} = 2 \cdot \frac{275 \cdot 10}{\sqrt{3}} \left(2 \cdot 11 + 2 \cdot 21{,}3\right) / 1{,}0 = 205 \cdot 10^3 \ N = 205 \ kN$$

Wartość nośności $N^{**}_{j,Rd}$:

$$N_{1,Rd} = 2k_m f_{y0} t_{fb}^2 \left(2b_{eff} / b_{fb} + 4\sqrt{1 - t_j / t_{fb}}\right) / \gamma_{M5}$$

$$N_{1,Rd} = 2 \cdot 1{,}0 \cdot 275 \cdot 10^2 \left(2 \cdot 90{,}5 / 300 + 4\sqrt{1 - 11 / 300}\right) / 1{,}0$$

$$N_{1,Rd} = 249{,}1 \cdot 10^3 N = 249{,}1 \ kN$$

Nośność środnika:

$$N_{j,Rd} = 0{,}5\left(112 + 249{,}1\right) = 180{,}6 kN < 394{,}7 \cdot 0{,}6700 = 264{,}4 kN = V_{Ed,1}$$

Nośność środnika pasa jest niedostateczna. Najprostszym sposobem usunięcia tego niedostatku jest wzmocnienie środnika ceownika w obszarze węzła przez przyspawanie blachy o grubości 13 mm. Innym rozwiązaniem jest zamiana stali pasa z gatunku S275 na S355. To pozwala zwiększyć nośność środnika do wartości 233,1kN < 264,4kN, ale ponadto trzeba uzyskać zmniejszenie siły poprzecznej w węźle o 12% przez wspawanie blachy między krzyżulcami, według rozwiązania z rys.5.

e) Pas dolny jest zginany i ścinany w przedziale między słupkiem podporowym i rozpatrywanym węzłem, a rozciągany, zginany i ścinany w drugim przedziale. Moment zginający w węźle powstaje wskutek mimośrodowego przecinania się osi krzyżulców względem osi pasa (rys. 2). Jego wartość oblicza się według wzoru (4) przy mimośrodzie według (2):

$$e_z = \left(11 + \frac{37+5,8}{0,67}\right)\frac{0,67}{0,7434} - 27 = 40,5 \ mm$$

$$M_B = 538,3 \cdot 40,5 = 21,8 \cdot 10^3 \ kNmm$$

$$z = 100 - 27 = 73 \ mm$$

$$e_j = 40,5 \cdot 0,7434 / 0,67 = 44,9 \ mm$$

$$e_i = 40,5 \cdot 0,6085 / 0,7328 = 33,6 \ mm$$

Zredukowane momenty zginające w węźle oblicza się według (6) przy $l_1 = 1625$ mm i $l_2 = 3250$ mm:

$$M'_B = \frac{1625 - 44,9}{1625 + 3250} \cdot \frac{3250}{1625} \cdot 21,8 \cdot 10^3 = 14,1 \cdot 10^3 \ kNmm$$

$$M''_B = \frac{3250 - 33,6}{1625 + 3250} \cdot \frac{1625}{3250} \cdot 21,8 \cdot 10^3 = 7,2 \cdot 10^3 \ kNmm$$

Składowa siły poprzecznej w węźle prostopadła do pasa wynosi:

$$V_{Ed} = 395,7 \cdot 0,6700 = 264,4 \ kN$$

Cechy geometryczne przekroju pasa:

$W_{y,min} = 495 \cdot 10^4 / 73 = 67,8 \cdot 10^3$ mm$^3$

$W_{y,max} = 495 \cdot 10^4 / 27 = 183,3 \cdot 10^3$ mm$^3$

$$A_v = 2(100 \cdot 16 + 16 \cdot 10) = 3520 \ mm^2$$

Naprężenia w skrajnym przedziale pasa:

$$\sigma = 14,1 \cdot 10^3 / 67800 = 208 \ MPa$$

$$\tau = 264400 / 3520 = 75,1 \ MPa$$

$$\sigma_{max} = \sqrt{208^2 + 3 \cdot 75,1^2} = 245,3 \ MPa < 275 \ MPa$$

Naprężenia w drugim od podpory przedziale pasa:

$$\sigma = 538300 / 5880 + 7,2 \cdot 10^3 / 67800 = 197,6 \ MPa$$

$$\tau = 71,5 \ MPa$$

$$\sigma_{max} = \sqrt{197,6^2 + 3 \cdot 75,1^2} = 236,6 \ MPa < 275 \ MPa$$

$$\sigma_{min} = 538300 / 5880 - 7,2 \cdot 10^6 / 183300 = 52,3 \ MPa < 275 \ MPa$$

W węźle środnik zawsze jest rozciągany, wobec czego współczynnik $k_m$ = 1,0, jak przyjęto podczas jego sprawdzania pod obciążeniem lokalnym.

Środnik skrajnego przedziału pasa jest rozciągany pod działaniem momentu zginającego. Natomiast środnik pasa dolnego w drugim przedziale od podpory jest rozciągany mimo występowania momentu zginającego, dającego dodatkowe naprężenie ściskające.

Połączenie pasa dolnego z blachą czołową styku montażowego w środku rozpiętości wiązara przeprowadza się w sposób, przedstawiony w [4].

## Literatura

[1] Bródka J., Broniewicz M.: Projektowanie konstrukcji stalowych według Eurokodów. PWT. Rzeszów 2013.

[2] Bródka J., Broniewicz M.: Truss design with one-membered elements. and N-joints. XIII International Conference on Metal Structures. Zielona Góra. 15-17 June 2016.

[3] Bródka J., Broniewicz M.: Projektowanie wiązarów z ceowników i kątowników równoramiennych o węzłach typu N. – Inżynieria i Budownictwo. 2016, nr 2.

[4] Bródka J., Broniewicz M.: Design of trusses made of channel sections according to Eurocode rules. "Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury - Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture. JCEEA", t. XXXII, z. 62 (3/II/15), pp. 37-61. 2015. DOI: 10.7862/rb.2015.139.

[5] Bródka J., Kozłowski A., Ligocki I, Łaguna J., Ślęczka L.: Projektowanie i obliczanie połączeń i węzłów konstrukcji stalowych. PWT. Drugie wydanie. Rzeszów 2013.

[6] Łubiński M., Filipowicz A., Żółtowski W.: Konstrukcje metalowe. Część 1. Arkady. Warszawa 2001.

[7] PN-EN 1090-2: 2007 Wykonanie konstrukcji stalowych i aluminiowych – Część 2: Wymagania techniczne dotyczące wykonania konstrukcji stalowych.

[8] PN-EN 1993-1-1: 2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych - Część 1: Reguły ogólne i reguły dla budynków.

[9] PN-EN 1993-1-8: 2006 Eurokod 3: Projektowanie konstrukcji stalowych – Część 8: Projektowanie węzłów.

[10] Wardenier J., Packer J. A., Zhao X.-L., van der Vegte G. J.: Hollow section in structural applications. Bouven met staal. Zoetemeer 2010.

[11] Rykaluk K.: Konstrukcje stalowe. Podstawy i elementy. Dolnośląskie Wydawnictwo Edukacyjne. Wrocław 2001.

# DESIGN OF LATTICE GIRDERS WITH K-JOINTS MADE FROM CHANNELS AND ANGLES WITH EQUAL SIDES. PART 1. LOWER CHORD JOINTS

**S u m m a r y**

Lattice girders with K-joints are designed as a member lay-out shown in Fig. 1. Lower chords are made from channels and branch members in angles with equal sides. K-joints can be designed as shown in Fig. 2 or Fig. 3. In the first case, branch members and a lower chord are jointed in eccentricity. The estimation of the truss joint capacity according to Fig. 2. is discussed. A gusset plate can be designed to reinforce the joint resistance and lower chord in bending. The design example is made to explain the calculations of member strength and joint resistance.

**Keywords:** steel trusses, designing of trusses joints connecting angle brace members and channel section chords, gap K joints in trusses

DOI:10.7862/rb.2016.183

*Przesłano do redakcji: 15.11.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 43-50

**Marta CHODYKA**[1]
**Jerzy NITYCHORUK**[2]
**Fabian WELC**[3]
**Anna ROGÓŻ**[4]
**Zofia LUBAŃSKA**[5]
**Tomasz GRUDNIEWSKI**[6]

# WPŁYW ZMIAN KLIMATU NA OSADNICTWO PREHISTORYCZNE MAZUR W KONTEKŚCIE BADAŃ OSADÓW JEZIORNYCH

Badania zmian klimatu odbywają się z dużym sukcesem na osadach jeziornych. Przedstawione w artykule dotychczasowe badania ujmowały zagadnienia antropopresji na dużym obszarze przy uwzględnianiu badań pojedynczych jezior, co dawało wnioski ciekawe ale dosyć ogólne. Zaproponowana w pracy koncepcja badań stawia na pierwszym miejscu bezpośredni związek obiektu archeologicznego z towarzyszącym mu jeziorem. Badanie i tym samym wyszczególnienie faz osadniczych opiera się głównie na analizie materiału archeologicznego pozyskanego w trakcie wykopalisk. W przypadku regionu Warmii i Mazur odtworzenie poszczególnych etapów dawnego osadnictwa utrudnia nie tylko brak źródeł pisanych ale również fragmentaryczność danych archeologicznych. Przedstawione przez autorów analizy palinologiczne i diatomologiczne pozwoliły na wstępną charakterystykę litologiczno – sedymentologiczną osadów dennych tego zbiornika. Wykazały, iż dno jeziora wyścielają głównie osady organogeniczne (gytie), które nie są przewarstwione osadami piaszczystymi, co wskazuje na bardzo spokojne środowisko sedymentacji oraz ciągły zapis procesów depozycyjnych. Co więcej, wykona-

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Marta Chodyka, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych, Zakład Informatyki, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; tel. 833449907; m.chodyka@dydaktyka.pswbp.pl

[2] Jerzy Nitychoruk, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych, Zakład Budownictwa, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; ; tel. 833449907; jerzy.nitychoruk@.pswbp.pl

[3] Fabian Welc, Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie, Instytut Archeologii, ul. Wóycickiego 1/3

[4] Anna Rogóż, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Centrum Badawcze EKO AGRO TECH, ul. Sidorska 105, 21-500 Biała Podlaska

[5] Zofia Lubańska, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych, Zakład Informatyki, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska

[6] Tomasz Grudniewski, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych, Zakład Informatyki, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska

ne już pomiary podatności magnetycznej wstępne dane geochemiczne z analizy SEM/EDS (mikroskop skaningowy z mikrosondą), w celu korelacji opisywanych rdzeni, ujawniły, iż charakteryzują się one niemal identycznym zapisem sedymentacyjnym i tym samym paleośrodwiskowym, co potwierdza fakt, iż w zbiorniku zachodziła ciągła i spokojna sedymentacja, która doskonale odzwierciedla lokalne ale i też regionalne przemiany środowiskowe. Z przeprowadzonych badań wynika, że w osadach jeziornych zanotowane są wyraźne zmiany, które można utożsamiać z momentami antropopresji oraz/lub zmianami klimatycznymi powiązanymi z wahaniami poziomu wód w jeziorze.

**Słowa kluczowe:** zmiany klimatu, osady jeziorne, analiza badań, przemiany środowiskowe

## 1. Wprowadzenie

Badania zmian klimatu odbywają się z dużym sukcesem na osadach jeziornych. Zaletą osadów jeziornych jest ich duże tempo sedymentacji, od 0,3 do kilku milimetrów rocznie, które umożliwia badanie zmian w osadach z dokładnością do miesięcy; dobre warunki do powstawania osadów niezaburzonych, czasami z wyraźną roczną laminacją; stosunkowo duża łatwość w pozyskaniu rdzeni kopalnych osadów jeziornych; możliwość wykonania wszechstronnych badań tych osadów, od paleontologicznych, po geochemiczne, co daje możliwość uchwycenia najmniejszych zmian środowiskowych i klimatycznych. Sztandarowymi przykładami opracowań osadów jeziornych są badania prowadzone w jeziorze pokraterowym Holzmaar w Niemczech [1], czy jeziora Gościąż w Polsce [2,3]. Jednym z ciekawszych opracowań pokazujących zależność sedymentacji jeziornej od aktywności ludzkiej jest praca [4], gdzie przedstawiono wpływ antropopresji w 12 stanowiskach, w okresie ostatnich 5000 lat.

Na obszarze południowo-zachodniej części pojezierza warmińsko-mazurskiego, począwszy już do lat 60-tych XX wieku, przeprowadzono szereg projektów, których celem było odtworzenie zmian paleośrodowiskowych w szerokim kontekście chronologicznym, obejmującym okres od schyłku ostatniego zlodowacenia po późne średniowiecze. Szczególnie cenne dane otrzymano z analiz palinologicznej i malakologicznej, które pozwalają z dużą rozdzielczością odtworzyć ewolucje pokrywy leśnej oraz zmiany wahań wód jeziornych.

Z punktu widzenia analizowanych zagadnień, szczególnie istotne wyniki przyniosły badania osadów dennych jeziora Strażym, położonego na obszarze pojezierza brodnickiego, którymi kierował W. Niewiarowski [5]. Wykonano m.in. analizy geochemiczne, palinologiczne, makroszczątków oraz szereg datowań radiowęglowych. Badania te pozwoliły w pierwszym rzędzie określić wahania poziomu wód jeziora począwszy od końca interstadiału Allerød do okresu subatlantyckiego włącznie. Stwierdzono m.in., że w tym ostatnim okresie poziom wód jeziora był o około 5 metrów wyższy od obecnego i zapewne najwyższy w całym Holocenie.

Dla porównania: według studiów innych badaczy średni poziom wód jezior mazurskich oscylował od znacząco wyższego niż obecnie w okresie między 750-400 p.n.e., aby opaść następnie o dwa metry (w stosunku do obecnego) w latach 1000-1400 n.e., osiągając swoje maksimum między 1500 a 1800 n.e.

Dzięki badaniom palinologicznym osadów jeziora Strażym udało się zrekonstruować nie tylko sukcesję roślinną w trakcie całego Holocenu, ale również uchwycić bezpośredni wpływ człowieka na środowisko przyrodnicze, tj. określić antropopresję. Z analiz tych wynika jednoznacznie, że w okresie rzymskim doszło do zakrojonego na szeroką skalę procesu odlesiania w bezpośrednim otoczeniu jezior. Przejawia się to m.in. zanikiem pyłku Ulmus (wiąz), Fraxinus (jesion) i jednoczesnym wzrostem udziałów procentowych pyłków zbóż – Secale cereale (żyto). W okresie wędrówek ludów nastąpiła ponowna regeneracja lasów, co wiąże się najprawdopodobniej z zanikiem osadnictwa na omawianym obszarze. W diagramach pyłkowych zjawisko to uwidacznia się m.in. w ponownej dominacji pyłku dębu i grabu – drzew, które rozpoczęły ponowną ekspansję na obszar gleb użyźnionych wcześniej popiołami na skutek wielkoskalowego karczowania w okresie rzymskim.

Zgodnie z tymi samymi badaniami ponowny okres wycinki zwartych zbiorowisk leśnych datuje się na wczesne średniowiecze, przy czym w XII wieku proces ten został nagle przerwany, jednak nie na tak długo, aby las mógł się ponownie zregenerować. Zjawisko to na diagramach pyłkowych ilustruje m.in. rozprzestrzenianie się pyłku brzozy i grabu. Kolejna faza to ekstensywne odlesienie obszaru wokół jeziora Strażym zapewne w celu powiększania areału uprawnego, co manifestuje się obecnością pyłku zbóż. Fazę tę według B. Noryśkiewicz [6] należy korelować z drugą połową średniowiecza.

Wyniki badań palinologicznych B. Noryśkiewicz zdają się potwierdzać analizy paleoekologiczne przeprowadzone z obszaru Wielkich Jezior Mazurskich. Na południowy wschód od Giżycka, A. Wacnik [7] wykonała badania palinologiczne próbek osadów jeziora Miłkowskiego i Wojnowo, których głównym celem było zbadanie zmian w szacie roślinnej w okresie ekspansji krzyżackiej. Warte nadmienienia jest to, że obecnie obszar znajdujący się wokół obydwu jezior jest niemal całkowicie bezleśny i silnie zmieniony antropogeniczne.

Według A. Wacnik najprawdopodobniej już w XI wieku rozpoczął się intensywny proces przeobrażania szaty roślinnej wokół jeziora Miłkowskiego i Wojnowo. W sąsiedztwie tych jezior, w pierwszej połowie średniowiecza, lasy zostały w dużym stopniu wykarczowane w celu utworzenia pól uprawnych i pastwisk. Proces ten poprzedzał bezpośrednio podbój regionu przez Krzyżaków. Na diagramach pyłkowych proces wzmożonego osadnictwa manifestuje się zwiększonym udziałem pyłku roślin ruderalnych, związanym z bezpośrednim sąsiedztwem siedzib ludzkich (m.in. Urtica, Plantago major, Artemisia i Chenopodiaceae). Ponadto w profilu pozyskanym z dna jeziora Wojnowo odnotowano liczne pozostałości spalonych tkanek roślinnych, które wskazują na intensywne pożary, zapewne wzniecane w procesie karczowania terenu wokół samego jeziora.

Podsumowując swoje badania A. Wacnik zwraca uwagę na znaczące rozbieżności pomiędzy zapiskami historycznymi wzmiankującymi istnienie w okresie średniowiecza w sąsiedztwie jezior Miłkowskiego i Wojnowo puszczy a danymi palinologicznymi świadczącymi jednoznacznie, że na niektórych obszarach zjawisko powstawania trwałych odlesień jest znacznie wcześniejsze i sięga co najmniej dwa stulecia wstecz.

W północno-wschodniej części pojezierza mazurskiego badane były m.in. osady denne jeziora Kruklin, które znajduje się około 10 km na wschód od Giżycka. Zespół kierowany przez J. Stasiak [8] wykonał tam m.in. analizy: palinologiczne, makroszczątków, składu botanicznego torfów, stopnia ich rozkładu, dendrochronologiczne, zawartości węglanów ($CaCO_3$) oraz datowania radiowęglowe. Wyniki tych badań wskazują, że okres subatlantycki cechował się wilgotnym klimatem i wysokim stanem wody w jeziorze.

Z badań M. Ralskiej-Jasiewiczowej [9] osadów jeziora Mikołajkowskiego wynika, że do XIII wieku włącznie około 80% powierzchni pojezierza mazurskiego pokrywały zwarte lasy, a pozostałą część stanowiły bagna i jeziora. Tereny trwale zagospodarowane przez człowieka stanowiły wówczas minimalny procent. Wielkoobszarowy karczunek lasów rozpoczęli dopiero koloniści krzyżaccy w XVI wieku. W 1800 roku obszar zajmowany przez zwartą pokrywę leśną skurczył się do 30%, ulegając w późniejszych czasach dalszemu ograniczeniu.

## 2. Badania osadów jeziornych Warmii i Mazur

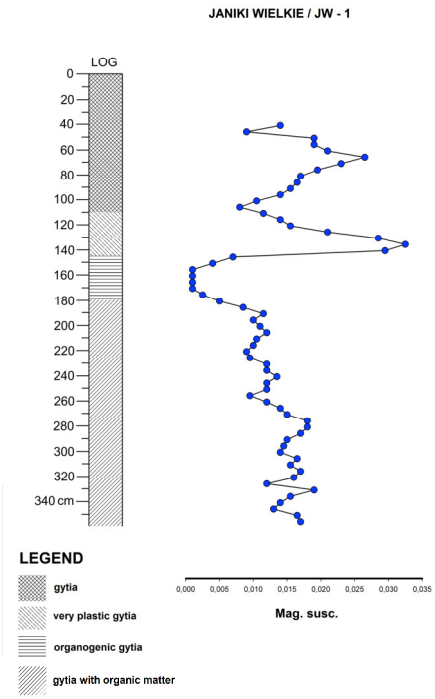
Badanie i tym samym wyszczególnienie faz osadniczych opiera się głównie na analizie materiału archeologicznego pozyskanego w trakcie wykopalisk. W przypadku regionu Warmii i Mazur odtworzenie poszczególnych etapów dawnego osadnictwa utrudnia nie tylko brak źródeł pisanych ale również fragmentaryczność danych archeologicznych. Wyniki przeprowadzonych dotychczas badań wykopaliskowych, pozwalają jedynie w wielkim przybliżeniu określić momenty intensywnego osadnictwa na omawianym terenie. Aby uchwycić z jednej strony aktywność dawnego człowieka, poznać wpływ jaki wywierał na środowisko (antropopresja) oraz uzyskać wgląd w kwestie jak zmiany środowiskowe i klimatyczne stymulowały lub hamowały procesy osadnicze, planuje się odczytać bogate, a dotychczas mało wykorzystane archiwum jakim są osady jeziorne Warmii i Mazur.

Wykonane już wstępne badania osadów pozyskanych w formie czterech kilkumetrowych rdzeni z dna Jeziora Młynek w okolicach wsi Janiki Wielkie (rys. 1) nie pozostają żadnych wątpliwości, co do ich unikalnej wartości poznawczej.



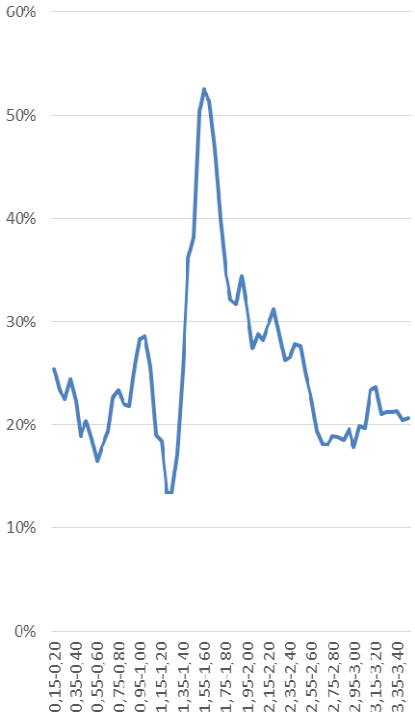

Rys. 1. Lokalizacja Janiki Wielkie

Fig. 1. Location of Janiki Wielkie




Rys. 2. Pomiar podatności magnetycznej

Fig. 2. Measurement of magnetic susceptibility




Rys. 3. Pomiar strat prażenia w %, oś pozioma – głębokość w m

Fig. 3. Measurement of loss-on-ignition in %, the horizontal axis – depth in m

Dla tych osadów wykonano podstawowe badania, na które złożyły się pomiary podatności magnetycznej (rys. 2), pomiar strat prażenia w celu określenia ilości materii organicznej (rys. 3), zawartość węgla organicznego (TOC) i analiza SEM/EDS.

Dla rdzenia Janiki Wielkie/JW 1 wykonano również analizę palinologiczna i diatomologiczną. Badania te pozwoliły na wstępną charakterystykę litologiczno – sedymentologiczną osadów dennych tego zbiornika. Wykazały, iż dno jeziora wyścielają głównie osady głównie organogeniczne (gytie), które nie są przewarstwione osadami piaszczystymi, co wskazuje na bardzo spokojne środowisko sedymentacji oraz ciągły zapis procesów depozycyjnych. Co więcej, wykonane już pomiary podatności magnetycznej wstępne dane geochemiczne z analizy SEM/EDS (mikroskop skaningowy z mikrosondą), w celu korelacji opisywanych rdzeni, ujawniły, iż charakteryzują się one niemal identycznym zapisem sedymentacyjnym i tym samym paleośrodwiskowym, co potwierdza fakt, iż w zbiorniku zachodziła ciągła i spokojna sedymentacja, która doskonale odzwierciedla lokalne ale i też regionalne przemiany środowiskowe. Wyraźny wzrost wartości podatności magnetycznej, zaobserwowany na głębokości ok. 1 m, z jednej strony może odzwierciedlać zmiany klimatyczno – hydrologiczne w obrębie zbiornika, z drugiej może się wiązać ze wzmożoną aktywnością dawnego człowieka.

## 3. Wnioski

Dotychczasowe badania ujmowały zagadnienia antropopresji na dużym obszarze przy uwzględnianiu badań pojedynczych jezior, co dawało wnioski ciekawe ale dosyć ogólne. Zaproponowana koncepcja badań stawia na pierwszym miejscu bezpośredni związek obiektu archeologicznego z towarzyszącym mu jeziorem. Jezioro w tej sytuacji jest archiwum, w którym zanotowane są wszystkie zdarzenia mające miejsce w jego pobliżu. Sedymentacja osadów jeziornych jest w miarę stała, co sprawia, że zapis antropopresji można odczytywać nie tylko jako moment, ale również określić jego długość i intensywność. Innowacyjność prowadzonych badań polega właśnie na odtworzeniu historii osadnictwa na bazie relacji jezioro - obiekt archeologiczny, czyli zamkniętego, pozostającego w związku ze sobą zespołu.

Z opisu rdzenia Janiki Wielkie/JW 1 i przeprowadzonych analiz wynika, że w osadach jeziornych zanotowane są wyraźne zmiany, które można utożsamiać z momentami antropopresji oraz/lub zmianami klimatycznymi powiązanymi z wahaniami poziomu wód w jeziorze. W rdzeniu JW 1/15, o długości 3,5 m, wykonano 4 datowania 14-C, pokazujące, że osady na głębokości 3,5 m powstawały 300 lat przed naszą erą. Stwierdzone w profilu zmiany litologiczne, geochemiczne, zawartości węgla organicznego oraz datowania radiowęglowe wskazują, że okres wczesnej aktywności ludzkiej w naszej erze, przypada na XI – XIII w. Pobrany rdzeń okazał się jednak zbyt krótki, żeby można było da-

tować ślady wcześniejszych działań człowieka. Na podstawie dotychczasowych badań udało się stwierdzić bardzo wyraźne zmiany w rdzeniu z jeziora Młynek koło Janików Wielkich, odpowiadające przyjętym założeniom o wpływie człowieka i/lub klimatu na sedymentację w jeziorze. Te wstępne dane są bardzo interesujące ze względów sedymentologicznych, paleoklimatycznych i archeologicznych. Zanotowane są w tym profilu ślady aktywności człowieka, pozwolą na określenie ich momentu i długości.

## Literatura

[1] Lottermoser, B.G., Oberhänsli, R., Zolitschka, B., Negendank, J.F.W., Schütz, U. & Boenecke, J.: Environmental geology and geochemistry of lake sediments (Holzmaar, Eifwl, Germany) Lecture Notes in Earth Sciences 49, 1993, 305-316.

[2] Różański, K., Goslar, T., Duliński, M., Kuc, T., Pazdur, M.F. & Walanus, A.:The late Glacial-Holocene transition in central Europe derived from isotope studies of laminated sediments from Lake Gościąż (Poland). In: E. BARD & W.S. BROECKER (Eds), The Last Deglaciation: Absolute and Radiocarbon Chronologies. 69-80. Springer-Verlag; Berlin – Heidelberg. 1992.

[3] Różański, K., Kuc, T., Duliński, M. & Wachniew, P.: Oxygen and carbon isotope composition of authigenic carbonates in the Holocene part of the Lake Gościąż sediments. In: M. Ralska-Jasiewiczowa, T. Goslar, T. Madeyska & L. Starkel (Eds), Lake Gościąż, Central Poland a monographic study, part 1, 1998, 229-232.

[4] Zolitschka B. , Behre K.E. , Schneider J.: Human and climatic impact on the environment as derived from colluvial, fluvial and lacustrine archives — examples from the Bronze Age to the Migration period, Germany, „QSR", t. 22, 2003, s. 81-100.

[5] Niewiarowski, W.: Development of lake Strażym (Brodnica lake district) during the late – glacial and Holocene. Acta Pelobotanica, vol. 27, no. 1., 1987, 251-304.

[6] Noryśkiewicz, B.: History of vegetation during the Late –Glacial and Holocene in the Brodnica lake district in the light of pollen analysis of the lake Strażym deposits. Acta Pelobotanica, vol. 27, no. 1.,1987, 283-303.

[7] Wacnik, A.: Galandowie i Krzyżacy – oddziaływania na lokalną roślinność w rejonie Miłek i Staświn (Kariana Wielkich Jezior Mazurskich, północno – wschodnia Polska). Wiadomości Botanicze 53 (1/2)., 2009, 21 – 34.

[8] Stasiak, J.: Historia jeziora Kruklin w świetle osadów strefy litoralnej. Prace Geograficzne nr. 42.,Warszawa, 1963.

[9] Ralska–Jasiewiczowa, M.: Bottom sediments of the Mikołajki Lake (Masurian Lake District) in the light of palaeobotanical investigations. Acta Palaeobot. vol. 7, no. 2., 1966, 1–118.

## AN IMPACT OF CLIMATE CHANGE IN A PREHISTORIC MAZURIAN SETTLEMENT IN THE CONTEXT OF LACUSTRINE SEDIMENTS

**S u m m a r y**

Research on climate change done on lake sediments may be successful. The following article presents the research of an antropogenic impact conducted so far on individual lakes, which yielded interesting yet rather general findings. The proposed research forwards a concept that directly links the archaeological site and the nearby lake. The research, particularly the specification of settlement phases, bases on the analysis of archaeological material obtained in excavations. In the case of Warmia and Mazury region, reconstruction of different stages of the former settlement is hindered by the lack of written sources and fragmentary archaeological data. The palynological and diatomological analysis presented by the authors allows for a characterization of lithological - sedimentological bottom sediments. It shows that the lake bottom is lined mostly with organogenic sediments (gyttjas), not interbedded with sandy sediments, which indicates a very calm sedimentation and continuous depositional processes. Moreover, the already conducted measurements of the magnetic susceptibility of the preliminary geochemical data from the analysis of SEM / EDS (a scanning electron microscope with a microprobe), enabling a correlation of the described cores, reveals that they are characterized by an almost identical sedimentation and paloeenvironmental record, which proves that the reservoir underwent a calm sedimentation process, which at the same time reflects the local but also regional environmental change. The study shows that significant changes have been noted in the lake sediments, which can be related to an antropogenic impact and / or climate change associated with fluctuations in the water level in the lake.

**Keywords:** climate change, lake sediments, research analysis, environmental change

DOI:10.7862/rb.2016.184

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 51-58

**Marta CHODYKA**[1]
**Jerzy NITYCHORUK**[2]
**Marek ZREDA**[3]
**Tomasz GRUDNIEWSKI**[4]
**Zofia LUBAŃSKA**[5]

# INNOWACYJNA METODA POMIARU WILGOTNOŚCI GLEBY Z ZASTOSOWANIEM NEUTRONÓW KOSMICZNYCH – TRZY LATA FUNKCJONOWANIA CZUJNIKA NA POŁUDNIOWYM PODLASIU

Pomiary wilgotności gleby do niedawna były prowadzone punktowo, co miało ograniczenia wynikające z przestrzennych różnic i niejednorodności gleb. Jeśli wykonywane są pomiary punktowe wilgotności gleby, to mogą one być wykorzystane po uśrednieniu, czyli należy zebrać wystarczająco dużą liczbę danych. Aby uzyskać dokładność do trzech punktów procentowych, należy zaprojektować 40 punktów pomiarowych. W artykule przedstawiona została innowacyjna metoda pomiaru wilgotności gleby z zastosowaniem neutronów kosmicznych. Zasadniczą częścią każdego czujnika są dwa liczniki neutronów – licznik z osłoną polietylenową do pomiaru szybkich neutronów oraz nieosłonięty licznik do pomiarów neutronów termicznych. W Stanach Zjednoczonych funkcjonuje system obserwacji wilgotności gleby z zastosowaniem neutronów kosmogenicznych – COSMOS (COsmic-ray Soil Moisture Observing System), który jest wyposażony w 56 stacjonarnych czujników. Pojedyncze czujniki zainstalowane są także miedzy innymi w Kenii, Brazylii, Francji, Szwajcarii i również w Polsce W pracy prezentowane są wyniki badań opracowanych przy wykorzystaniu innowacyjnego czujnika zainsta-

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Marta Chodyka, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych, Zakład Informatyki, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; tel. 833449907; m.chodyka@dydaktyka.pswbp.pl

[2] Jerzy Nitychoruk, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych, Zakład Budownictwa, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; ; tel. 833449907; jerzy.nitychoruk@.pswbp.pl

[3] Marek Zreda, Department of Hydrology and Water Resources, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA; marek@hwr.arizona.edu

[4] Tomasz Grudniewski, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych, Zakład Informatyki, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; tel 833449908; knt@pswbp.pl

[5] Zofia Lubańska, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych, Zakład Informatyki, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; tel. 833449908; z.lubanska@dydaktyka.pswbp.pl

lowanego w Polsce w miejscowości Derło. Dane pozyskane w trakcie trzech rocznych cykli pomiarowych dobrze korelują z obserwowanymi opadami deszczu i śniegu. Cykle pomiarowe obejmują okres od kwietnia do końca marca. Szczegółowa analiza zarejestrowanych w tym okresie danych wskazuje na przyczyny zróżnicowania wilgotności gleby. Okazuje się, że czujnik może być wykorzystywany do identyfikacji okresu występowania pokrywy śnieżnej zalegającej na danym terenie.

**Słowa kluczowe:** wilgotność gleby, neutrony kosmiczne, COSMOS, metoda pomiarowa

## 1. Wprowadzenie

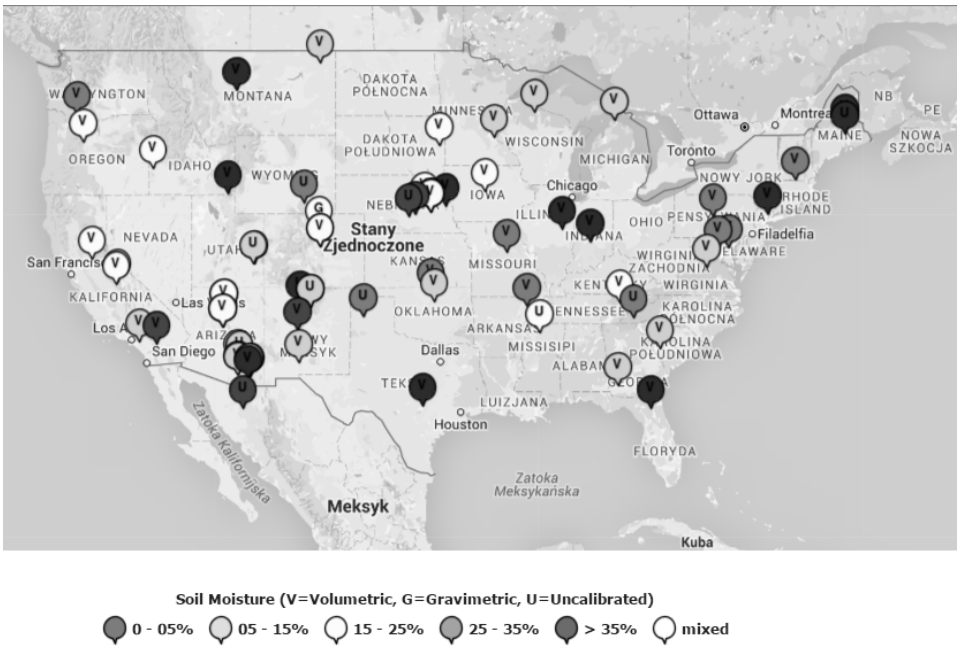
Wilgotność gleby jest związana z bilansem biomasy i energii wymienianej pomiędzy powierzchnią ziemi i atmosferą. Ma ona wpływ na takie procesy jak: odpływ powierzchniowy, infiltracja, parowanie, transpiracja, wegetacja roślin, a także na pogodę i klimat.

Pomiary wilgotności gleby do niedawna były prowadzone punktowo, co miało ograniczenia wynikające z przestrzennych różnic i niejednorodności gleb. Jeśli wykonujemy pomiary punktowe wilgotności gleby, to mogą one być wykorzystane po uśrednieniu, czyli musimy zebrać wystarczająco dużą liczbę danych. Aby uzyskać dokładność do trzech punktów procentowych, należy zaprojektować 40 punktów pomiarowych. Zreda i in. zaproponowali nową metodę pomiaru wilgotności gleby wykorzystującą promieniowanie kosmiczne [1]. Zaprojektowane przez nich nowe czujniki mierzą wilgotność gleby w promieniu ok. 300 m, co skutecznie zastępuje całą sieć pomiarową niezbędną do wyliczenia średniej wilgotności gleby.

Wiktor Hess odkrył promieniowanie kosmiczne w 1912, za co otrzymał Nagrodę Nobla w dziedzinie fizyki w 1936 r. Hess stwierdził, że intensywność jonizacji promieniotwórczej wzrasta wraz z wysokością nad powierzchnią Ziemi, co wskazuje na źródło promieniowania poza Ziemią [2]. To promieniowanie Robert Millikan nazwał w latach 20. XX w. „promieniowaniem kosmicznym". Kolejnym ważnym krokiem w badaniu promieniowania kosmicznego było stwierdzenie, że intensywność niskoenergetycznych neutronów promieniowania kosmicznego zależy głównie od zawartości wodoru w środowisku [3, 4]. Z kolei Hendrick i Edge wykazali, że intensywność „szybkich" neutronów nad powierzchnią ziemi zależy od zawartości wilgoci w glebie [5], co zostało wykorzystane do jej pomiaru [6, 7]. Wodór posiada największą siłę hamowania i usuwania neutronów [1, 8], co stanowi podstawę pomiaru wilgotności gleby metodą neutronów kosmogenicznych. Większa ilość wody w glebie skutkuje większym wyhamowaniem neutronów, powodując zmniejszenie ich ilości nad jej powierzchnią. Mniejsza ilość wody w glebie ma efekt przeciwny. Zreda i in., w 2008 r. umieścili czujniki mierzące promieniowanie kosmiczne ponad powierzchnią ziemi, co pozwoliło na skuteczny pomiar wilgotności gleby [1].

W kolejnych badaniach ich czujnik [9] zmierzył wilgotność gleby w promieniu 300 m, co uczyniło go bardzo skutecznym.

Prof. Zreda z zespołem, założył w USA system obserwacji wilgotności gleby za pomocą neutronów kosmogenicznych - COSMOS (COsmic-ray Soil Moisture Observing System), który jest wyposażony w 56 stacjonarnych czujników (rys. 1).




Rys. 1. Umiejscowienie elementów projektu COSMOS na terenie USA

Fig. 1. COSMOS sites in the U.S.

Pojedyncze czujniki zainstalowane są miedzy innymi w Kenii (2), Brazylii (1), Francji (1), Szwajcarii (1) i również w Polsce (1 – rys. 2). Szczegółowe informacje o czujnikach i ich lokalizacjach można uzyskać na stronie internetowej http://cosmos.hwr.arizona.edu, gdzie są również dostępne dane pomiarowe, dostarczane bezpośrednio poprzez system satelitarny.

Zasadniczą częścią każdego czujnika są dwa liczniki neutronów – licznik z osłoną polietylenową do pomiaru szybkich neutronów oraz nieosłonięty licznik do pomiarów neutronów termicznych.

Dane z pierwszego licznika służą do pomiaru wilgotności gleby, natomiast dane z drugiego do pomiaru ilości wody na powierzchni gruntu, w śniegu, w roślinach itp. Czujniki zasilane są z akumulatorów stale ładowanych z paneli słonecznych. Dane pomiarowe są wysyłane przez modem satelitarny sieci Iridium do centralnego serwera systemu COSMOS, gdzie po przetworzeniu są umieszcza-

ne na ogólnodostępnej stronie internetowej http://cosmos.hwr.arizona.edu, z której można uzyskać dane o liczbie zmierzonych neutronów szybkich, liczbie neutronów termicznych, ciśnieniu atmosferycznym oraz względnej wilgotności i temperaturze wewnątrz urządzenia.




Rys. 2. Lokalizacja czujnika Derło we wschodniej Polsce

Fig. 2. Location of the probe Derło in eastern Poland

Jednym z pierwszych założonych czujników tego typu jest czujnik San Pedro, który działa nieprzerwalnie od lipca 2007 r. i jak dotąd, poza wymiana baterii, nie wymagał interwencji serwisu [8].

## 2. Wyniki pracy czujnika Derło w Polsce

Pierwszy, i jak dotychczas jedyny w Polsce czujnik do pomiaru wilgotności gleby za pomocą pomiaru neutronów kosmicznych został zainstalowany w Derle, na południowym Podlasiu w dniu 15 kwietnia 2013 r. (rys. 3).

Każdy czujnik wymaga ręcznej kalibracji, również czujnik w Derle został skalibrowany przy użyciu 95 próbek gleby, dla których wykonano oznaczenie wilgotności metodą suszenia próbek w piecu i obliczania wilgotności z różnicy wartości wagowej próbki suchej i wilgotnej.

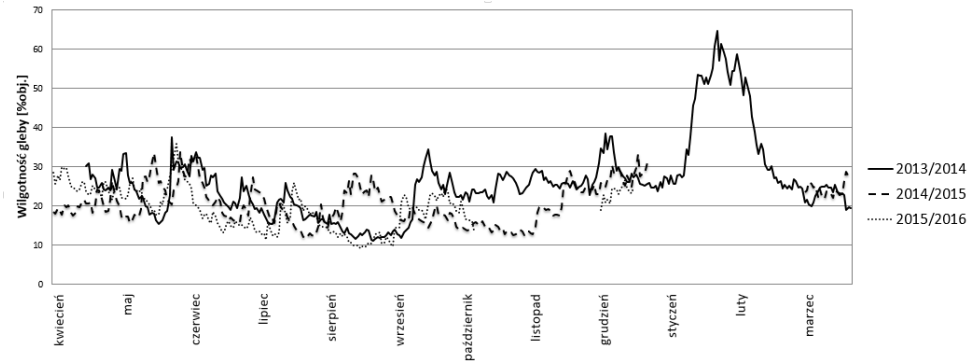
Dotychczas udało się uzyskać trzy roczne cykle pomiarowe, które można dobrze korelować z obserwowanymi opadami deszczu i śniegu (rys. 4).



Rys. 3. Czujnik Derło. Biała skrzynka po prawej stronie zawiera dwa liczniki neutronów każdy z własnym modułem impulsów, rejestrator danych, modem satelitarny i akumulator

Fig. 3. Probe Derło. The white box on the right side contains two neutron counters with a neutron pulse module each, a data logger, a satellite modem and a rechargeable battery

Cykle obejmują okres od kwietnia do końca marca, gdyż w kwietniu zainstalowano czujnik, który rozpoczął wówczas pomiary. Cykl najstarszy 2013/2014 jest najpełniejszy, w pozostałych są luki pomiarowe przypadające na okres zimowy, które są trudne do wyjaśnienia. Mimo pewnych luk można wysunąć ciekawe wnioski z trzech cykli obserwacji.




Rys. 4. Średnie, 12-godzinne wartości wilgotności gleby, zmierzone przez czujnik Derło w okolicach Białej Podlaskiej od 04.2013 do 03.2016

Fig. 4. 12-hour moving average values of soil moisture at the COSMOS site Derło near Biała Podlaska, between April 2013 and March 2016

Szczególnie dobrze zostały odwzorowane opady śniegu i zaleganie pokrywy śnieżnej w okresie zimy 2013/2014. Na wykresie wilgotności gleby z czujnika Derło, obecność śniegu pokrywa się z wartościami wilgotności ponad 45%. Zimy 2014/2015 i 2015/2016 były bezśnieżne, dlatego brak jest tu tak dużych wartości, ale i brak jest pomiarów. Po opadach śniegu zauważalny jest gwałtowny spadek ilości szybkich neutronów, podczas gdy w tym samym czasie wzrosła intensywność neutronów termicznych, co sugeruje, że przy użyciu obu typów neutronów można odróżnić śnieg od wody w glebie. Zliczona ilość szybkich neutronów po opadzie śniegu pozostaje niemal bez zmian, podczas gdy ilość neutronów termicznych powoli maleje. Stosunek neutronów szybkich do termicznych jest dobrym wskaźnikiem pojawienia się pokrywy śnieżnej. Podwyższone wartości wilgotności gleby mają miejsce we wszystkich cyklach na wiosnę, w maju, kiedy wartości przekraczają 30 %. Następnie wilgotność spada i w okresie lata jest najniższa osiągając kilkanaście procent w latach 2013 i 2015. W roku 2014 sierpień był wyjątkowo deszczowy, co przełożyło się na wilgotność gleby. Z kolei w roku 2013 wilgotny był wrzesień i pozostała część jesieni, co dobrze widać porównując z rokiem 2014.

Dobrze zauważalne są generalne trendy, które są charakterystyczne dla wszystkich trzech okresów pomiarowych we wszystkich sezonach obserwacyjnych. Duże opady deszczu skutkują gwałtownym wzrostem wilgotności gleby, po czym następuje stopniowe obniżanie tych wartości związane z osuszaniem gleb. Jednak poszczególne miesiące mogą się różnić intensywnością opadów, co przekłada się na zmiany wilgotności. Ciekawym jest, że różnice w ilości śniegu w zimie nie przekładają się wyraźnie na wilgotność gleby na wiosnę. Zima 2013/2014 była znacznie bardziej śnieżna niż pozostałe. Nie wiadomo jednak, jak śnieżna zima może przełożyć się na ilość opadów w okresie lata? W okresie zimowym 2013/2014, opady śniegu miały miejsce w styczniu i lutym, co zostało zauważone w sygnale neutronów.

## 3. Wnioski

Metoda badania wilgotności gleby za pomocą neutronów kosmogenicznych może być wykorzystywana przy różnorodnych glebach oraz na częściowo zabudowanych terenach miejskich. Wilgotność gleby nie jest uzależniona od jej składu, a sama metoda jest nieinwazyjna i umożliwia podjęcie badań w wielu innych dziedzinach między innymi w: meteorologii, klimatologii, hydrologii, ekologii, teledetekcji, rolnictwie i leśnictwie, czyli wszędzie tam gdzie wilgotność gleby jest istotnym składnikiem środowiskowym.

Pierwszy tego typu czujnik pomiarowy w Polsce pracuje w sposób ciągły od 3 lat. Na podstawie zarejestrowanych za jego pomocą danych można badać przyczyny zróżnicowania wilgotności gleby. Okazuje się, że czujnik bazujący na pomiarze liczby neutronów kosmogenicznych może być z powodzeniem wykorzystywany do identyfikacji okresów występowania pokrywy śnieżnej.

Obszar Polski wschodniej, położony w strefie wpływów klimatu kontynentalnego i morskiego jest szczególnie ciekawy do prowadzenia pomiarów wilgotności gleby. Po wstępnej serii pomiarowej, która zakończyła się sukcesem, przewiduje się zwiększenie liczby czujników i objęcie monitoringiem większych obszarów kraju.

Planowane jest także przyłączenie wszystkich czujników w Polsce systemu COSMOS, co zdaniem autorów korzystnie wpłynie na postęp w prowadzonych badaniach atmosfery – mapy pogody, śledzenie zmian klimatu, badań hydrosfery - bilanse wilgotności gleby i jej wpływ na zmiany w środowisku, przewidywanie suszy i powodzi, dostęp wody dla działalności człowieka, szacowanie ewapotranspiracji, szacowanie zagrożenia osuwiskowego; badań biosfery –zmiany biomasy, stres wodny roślin.

## Literatura

[1] Zreda M., Desilets D., Ferré T. P. A. & Scott R. L.: Measuring soil moisture content non-invasively at intermediate spatial scale using cosmicray neutrons. Geophysic. Res. Lett., 35. L21402, 2008.

[2] Hess V.F.: Uber Beobachtungen der durchdringenden Strahlung bei sieben Freiballonfahrten. Physikal. Z., 13. 1912, 1084–1091.

[3] Fermi E.: Artificial radioactivity produced by neutron bombardment, Nobel Lectures, Physics 1922–1941, Amsterdam, Elsevier Publishing Company. 1938, 414–421.

[4] Bethe H.A., Korff S.A. & Placzek G.: On the interpretation of neutron measurements in cosmic radiation. Physic. Rev., 57. 1940, 573–587.

[5] Hendrick L.D. & Edge R.D.: Cosmic-ray neutrons near the Earth. Physic. Rev. Ser. II, 145. 1966, 1023–1025.

[6] Kodama M., Nakai K., Kawasaki S. & Wada M.: Application of cosmic-ray neutron measurements to the determination of the snow-water equivalent. J. Hydrometeorol., 41. 1979, 85–92.

[7] Kodama M., Kudo S. & Kosuge T.: Application of atmospheric neutrons to soil moisture measurement. Soil Sci., 140. 1985, 237–242.

[8] Zreda M., Shuttleworth W.J., Zeng X., Zweck C., Desilets D., Franz T. & Rosolem R.: COSMOS: the COsmic-ray Soil Moisture Observing System. Hydrol. and Earth System Sci., 16. 2012, 4079–4099.

[9] Desilets D., Zreda M. & Ferre T.: Nature's neutron probe: Landsurface hydrology at an elusive scale with cosmic rays. Water Resour. Res., 46. W11505, 2010.

# AN INNOVATIVE METHOD OF MEASURING SOIL MOISTURE USING COSMIC-RAY NEUTRONS - THREE YEARS OF WORK OF THE SENSOR IN SOUTHERN PODLASIE

**S u m m a r y**

Measurements of soil moisture until recently were conducted by checking particular spots, which had its limitations due to soil spatial differences and heterogeneity. If spot checks are made to measure soil moisture, the gathered data can be used only after being averaged, which means collecting a sufficiently large number of data. To get results that would be accurate to within three percent, one must conduct 40 check points. The article presents an innovative method of measuring soil moisture by using space neutrons, which gives new opportunities. The main part of each sensor are two neutron - counters covered with polythene to measure fast neutrons, and an uncovered counter for measuring thermal neutrons. The United States has a system of measuring the soil moisture that uses space genic neutrons - COSMOS (Cosmic-ray Soil Moisture Observing System), which is equipped with 56 stationary sensors. Individual sensors are also installed, among others, in Kenya, Brazil, France, Switzerland and in Poland. The authors wish to present the results of innovative sensing research done in Derło, Poland. The conclusions have been based on three annual cycles of measurement that can be well correlated with the observed rainfall and snow. The cycles cover the period from April to the end of March (2013 - 2016). The first sensor in Poland has already taken three season measurements, on the basis of which one can draw interesting conclusions about the reasons for soil moisture diversity. It turns out that the sensor can also be used to determine the period of snow.

**Keywords:** soil moisture, cosmic-ray neutrons, COSMOS, measuring method

DOI:10.7862/rb.2016.185

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 59-66

**Dariusz CZEKALSKI**[1]
**Martyna TOMASZEK**[2]

# ROZKŁAD NATĘŻENIA PROMIENIOWANIA WZGLĘDEM POŁUDNIA SŁONECZNEGO NA PŁASZCZYŹNIE POZIOMEJ W KWIETNIU I WE WRZEŚNIU

Głównym celem pracy było porównanie sum promieniowania słonecznego docierającego do płaszczyzny horyzontalnej przed i po południu słonecznym. Dane do analizy statystycznej z wykorzystaniem testu Wilcoxona pochodzą ze stacji pomiarowej znajdującej się na terenie SGGW na warszawskim Ursynowie. Zakres danych obejmował miesiące kwiecień i wrzesień z lat 2005-2014. W obu miesiącach sumy promieniowania po południu były istotnie większe niż przed południem. W porównywanych dwóch parach godzin najbliższych południu słonecznemu nie było podstaw odrzucenia hipotezy o równości ich sum. Natomiast w czwartej i piątej parze godzin według hipotezy alternatywnej wyższe sumy promieniowania wystąpiły w części dnia po południu.

**Słowa kluczowe:** suma promieniowania słonecznego, godzina, połowa dnia, porównanie, test kolejności par

## 1. Wprowadzenie

Ilość energii promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni ziemi jest kształtowana przez różne czynniki. Mają one charakter zarówno deterministyczny (współrzędne geograficzne miejsca, dzień kalendarza) jak też stochastyczny (cyrkulacja, stopień zachmurzenia, zmętnienie atmosfery). Położenie ma decydujący wpływ na wielkość i zmienność dopływu energii pochodzącej z promieniowania słonecznego. Polska zajmuje obszar pomiędzy równoleżnikami 49÷54°N i należy do strefy klimatu umiarkowanego przejściowego. Zachodnia strona kraju zdominowana jest przez czynniki związane z klimatem morskim. Wschodnia strona Polski wykazuje czynniki kontynentalne. Istotną

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Dariusz Czekalski, SGGW w Warszawie, Katedra Podstaw Inżynierii, ul. Nowoursynowska 166, 02-766 Warszawa; tel. 225934601; dariusz_czekalski@sggw.pl

[2] Martyna Tomaszek, SGGW w Warszawie, ul. Nowoursynowska 166, 02-766 Warszawa, studentka 2$^{o}$ studiów na kierunku Technologie Energii Odnawialnej

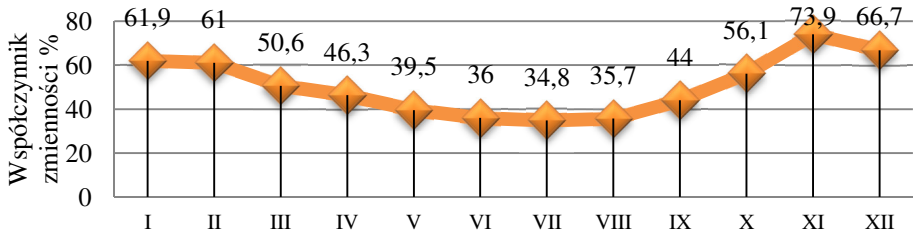
rolę w kształtowaniu klimatu odgrywają oceaniczne masy powietrza, docierające na tereny Polski dwukrotnie w ciągu roku. Pierwszorzędną rolę odgrywają w sezonie jesienno-zimowym [1].

Decydującą rolę w tworzeniu zachmurzenia odgrywa cyrkulacja atmosfery. Najmniej korzystne warunki usłonecznienia, związane z największym zachmurzeniem występują podczas cyklonalnego typu cyrkulacji. Odwrotna sytuacja występuje, podczas cyrkulacji antycyklonalnej. Na terenie Polski zauważalna jest przewaga sytuacji antycyklonalnych nad cyklonalnymi. Wielkość zachmurzenia w Polsce determinowana jest w głównej mierze ciśnieniem atmosferycznym panującym nad danym obszarem oraz w jego pobliżu [1, 2, 3]. Według Wosia występują dwa typy dobowego rozwoju zachmurzenia:

- w okresie zimowym największe zachmurzenie występujące nad ranem lub w godzinach południowych, najmniejsze zaś wieczorem lub w nocy,
- w okresie letnim największe zachmurzenie notowane po południu, najmniejsze zaś wieczorem i w nocy [2, 4].

Zmienność cyrkulacji i zachmurzenia jest przyczyną wahań sum dobowych promieniowania słonecznego. Rysunek 1 przedstawia współczynniki zmienności sum dobowych napromieniowania płaszczyzny poziomej w Warszawie. Najmniejszy współczynnik zmienności wynoszący 34,8% można zaobserwować w lipcu. Największy zaś odnotowano w listopadzie - 73,9%. Generalnie okres letni charakteryzuje się najmniejszą zmiennością sum promieniowania.

Chwieduk [5] wykazała, że z punktu widzenia napromieniowania płaszczyzny nachylonej azymut jej powinien być odchylony od południa w kierunku zachodnim o 15°. Sugeruje to niesymetryczność napromieniowania względem kierunku górowania Słońca. Głównym celem opracowania jest próba odpowiedzi na pytanie czy dopływ promieniowania słonecznego w godzinach przed południem słonecznym różni się istotnie od notowanego po południu słonecznym. Rozpatrywana jest płaszczyzna horyzontalna, a dane pomiarowe pochodzą z lat 2005-2014 ze stacji znajdującej się na terenie Wydziału Inżynierii Produkcji przy ulicy Nowoursynowskiej w Warszawie. W prezentowanej fazie badań brany jest pod uwagę miesiąc kwiecień otwierający okres intensywnego pozyskiwania energii słonecznej miesiąc wrzesień okres ten zamykający.




Rys. 1. Współczynnik zmienności dobowych sum promieniowania słonecznego na terenie Warszawy w latach 1961-1991, na podstawie [6]

Fig. 1. Coefficient of variation daily irradiation in Warsaw, years 1961-1991, based on [6]

## 2. Stanowisko badawcze i metodyka badań

Stanowisko pomiarowe zlokalizowane na Wydziale Inżynierii Produkcji w Warszawie – Ursynów zostało oddane do użytku w 2005 roku. Głównym jego zadaniem jest pomiar natężenia promieniowania słonecznego na kilku płaszczyznach [7]. Jest ono wyposażone w urządzenia firmy Kipp&Zonen. Na płaszczyźnie horyzontalnej wykorzystywany jest pyranometr CM 11 z podwójną kopułką. Przyrząd zaliczany jest do wzorców wtórnych. Sygnały pobierane z czujników ulegają przekonwertowaniu, a następnie rejestrowane są co minutę. Pomiary zamykane są o północy każdego dnia tworząc archiwizowane pliki.

Badana populacja, po usunięciu dni z awarią urządzeń, reprezentowana jest przez 231 próbek dla kwietnia i 283 próbki dla września. Celem analizy jest statystyczne uzasadnienie różnicy pomiędzy promieniowaniem docierającym na płaszczyznę poziomą przed i po południu słonecznym. Pierwszym etapem postępowania było obliczenie godziny urzędowej południa słonecznego dla każdego dnia. Następnie względem południa zostały wyznaczone pary godzin symetrycznie oddalone od południa słonecznego o jednakową liczbę godzin. W analizowanych miesiącach wygenerowanych zostało 5 par godzin [8].

Porównywane populacje zostały uznane za grupy zależne, ponieważ wysokość Słońca i droga, którą pokonuje jest jednakowa w porównywanych parach pochodzących z tych samych dni, a dany dzień generalnie charakteryzuje określona cyrkulacja. W takich uwarunkowaniach badanie istotności różnic wartości w danych parach można prowadzić testem t-Studenta, o ile próbki porównywane mają rozkłady normalne. Okazało się, że żadna z grup wartości sum promieniowania (całkowite sumy przed południem słonecznym; całkowite sumy po południu słonecznym oraz 5 grup godzinowych przed południem i 5 grup godzinowych po południu) nie mają rozkładów normalnych [8]. Wykazał to test Lilliefors'a, który jest poprawką do testu Kołmogorova-Smirnova. Test Kołmogorova-Smirnova nie mógł być bezpośrednio wykorzystany ze względu na brak znanego odchylenia standardowego oraz średniej populacji.

Wobec braku normalności rozkładów do analizy statystycznej wykorzystany został nieparametryczny test kolejności par Wilcoxona. Istotą tego testu jest zweryfikowanie hipotezy, czy mediana różnic badanych zmiennych jest równa 0. Zgodnie z zasadami wnioskowania statystycznego stawia się hipotezę zerową ($H_0$) o równości wartości grupy porównywanych próbek, w tym teście o medianie różnic równej zero. Jeśli hipoteza zerowa zastaje odrzucona to przyjęta zostaje hipoteza alternatywna ($H_1$) mówiąca, że mediana różnic wartości badanych próbek w grupie jest różna od zera, a więc wartości sum promieniowania istotnie się różnią między sobą. We wnioskowaniu statystycznym błąd I rodzaju polega na odrzuceniu prawdziwej hipotezy zerowej. Prawdopodobieństwo popełnienia błędu I rodzaju nazywany jest poziomem istotności i oznaczany przez $\alpha$ (najczęściej przyjmowane wartości $\alpha$ to: 0,05 oraz 0,01 i 0,001). Przykładowo przyjęty w pracy poziom istotności równy $\alpha = 0,5$ oznacza, że odrzucając w postępowaniu hipotezę zerową w 5 na 100 analiz może wystąpić błąd I rodzaju.

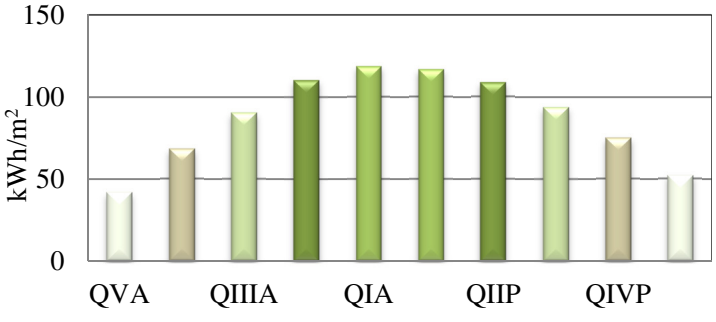
Procedura testu Wilcoxona polega na rangowaniu różnic w wartościach pomiaru dla kolejnych obserwacji, czyli oblicza się w rozpatrywanym przypadku różnice pomiędzy sumą promieniowania przed i po południu słonecznym. Następnie różnice te szereguje się od najmniejszej do największej i nadaje się im kolejno rangi, osobno dla wartości dodatnich, osobno dla wartości ujemnych. Następnie zlicza się sumę rang dla różnic, które były ujemne i dla różnic, które były dodatnie. Mniejsza z otrzymanych sum to wartość statystyki testowej T testu Wilcoxona. Jeśli wartość statystyki T znaleziona w tablicach wartości krytycznych w funkcji liczebności próbek dla tego testu (w wersji przystosowanej do mniejszej z dwóch wartości sumy rang) odpowiada poziomowi istotności poniżej założonego (tu $\alpha = 0{,}05$), to hipoteza $H_0$ zostaje odrzucona i przyjęta alternatywna $H_1$.Dla większej niż 25 liczby obserwacji różnice zmierzają do rozkładu normalnego. Wówczas oblicza się dodatkowo wartość statystyki Z testu Wilcoxona, czyli średnią różnic podzieloną przed odchylenie standardowe.

## 3. Wyniki badań

### 3.1. Miesiąc kwiecień

Dni wybrane do analizy dla kwietnia pochodziły z 9 lat (bez kwietnia 2011). Symetrycznie względem godziny południa słonecznego (między 12.33, a 12.39 czasu CEST, zależnie od numeru dnia) wyznaczono sumy dzienne promieniowania przed południem $Q_{ANTE}$ i popołudniu $Q_{POST}$. Sumy godzinowe promieniowania w pięciu parach symetrycznie oddalonych od południa oznaczono tak, że pierwsza sąsiadująca z południem para to przed południem $QI_A$ po południu $QI_P$. Kolejne pary oznaczono analogicznie: $QII_A$ i $QII_P$ itd.

Suma promieniowania słonecznego docierającego do powierzchni poziomej w kwietniu wynosiła średnio około 97 kWh/m$^2$ (uwzględniając tylko 10 centralnych godzin dnia). Suma promieniowania po południu słonecznym, stanowiła około 51% całkowitego promieniowania z pięciu par godzin słonecznych (rys. 2). Test Wilcoxona rozstrzygnął czy różnica jest istotna statystycznie.



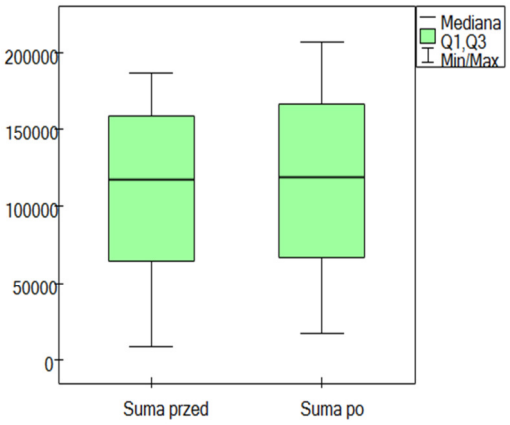

Rys. 2. Rozkład sum promieniowania słonecznego na godziny dnia w kwietniu

Fig. 2. Hourly distribution of solar radiation in April

W tabeli 1 uzupełnionej wykresem ramka-wąsy (rys. 3) zawarto obliczenia wskaźników testu. Mniejsza z sum rang przy 231 próbkach w grupie oznacza poziom istotności 0,0076, czyli zdecydowanie poniżej założonego $\alpha$=0,05. Hipoteza o równości sum promieniowania przed i po południu słonecznym w kwietniu zostaje odrzucona, a przyjęta hipoteza alternatywna o istotnej statystycznie różnicy między sumami. Ujemna mediana różnic wskazuje, że sumy promieniowania w drugiej części dnia są wyższe.

Tabela 1. Wyniki testu Wilcoxona dla sum promieniowania przed i po południu dla kwietnia
Table 1. Wilcoxon's test results for ante and post noon half-daily solar radiation in April

| |
|---|
| Test Wilcoxona dla grup zależnych |
| Analizowane zmienne $Q_{ANTE}$; $Q_{POST}$ |
| Poziom istotności 0,05 |
| Nazwa grupy $Q_{ANTE}$<br>Liczebność grupy 231<br>Mediana grupy, Wmin/m$^2$ 117167 |
| Nazwa grupy $Q_{POST}$<br>Liczebność grupy 231<br>Mediana grupy, Wmin/m$^2$ 118360 |
| Liczebność – ilość par 231<br>Mediana różnic, Wmin/m$^2$ -7037<br>Mniejsza suma rang 10691 |
| Statystyka T 10691<br>Wartość p (dokładna) 0,007609<br>Statystyka Z -2,66228<br>Wartość (asymptotyczna) 0,007761 |




Rys. 3. Wykres ramka-wąsy porównywanych grup sum promieniowania dla kwietnia
Fig. 3. Box-and-whisker plots of half-daily solar radiation data in April

Porównanie sum godzinowych promieniowania w godzinach bezpośrednio poprzedzającej południe słoneczne i następującej po nim wykazało, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy braku różnic w grupach - $H_0$. Dokładny poziom istotności przekracza wielokrotnie przyjętą wartość 0,05 (tab. 2). Badając kolej-

Tabela 2. Charakterystyka porównywanych par sum godzinowych promieniowania i wyniki testu Wilcoxona (kwiecień)

Table 2. Compared pairs of hourly solar radiation data and Wilcoxon's test results (for April)

| Parametr testu | Porównywane grupy | | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | $QI_A$ / $QI_P$ | $QII_A$ / $QII_P$ | $QIII_A$ / $QIII_P$ | $QIV_A$ / $QIV_P$ | $QV_A$ / $QV_P$ |
| Mediana grupy Wmin/m$^2$ | 33282 / 30834 | 31736 / 28935 | 25522 / 24522 | 18324 / 19929 | 10739 / 13260 |
| Mediana różnic, Wmin/m$^2$ | -478 | -997 | -1915 | -1982 | -3070 |
| Statystyka T | 13280 | 13343 | 11580 | 9860 | 6940 |
| Wartość p | 0,90817 | 0,95719 | 0,07382 | 0,000465 | 0,00010 |

ne pary godzin symetrycznie oddalonych od południa słonecznego wnioskowano na podstawie testu Wilcoxona, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o braku różnic w grupach dla pierwszej, drugiej i trzeciej pary godzin. Natomiast istotne statystycznie różnice wystąpiły dla czwartej i piątej pary godzin, oddalonych o 4 i 5 godzin od południa słonecznego (tab. 2).

### 3.2. Miesiąc wrzesień

Do analizy statystycznej dla września wybrano 283 dni z lat 2005-2014. Suma promieniowania słonecznego na płaszczyźnie horyzontalnej we wrześniu w okresie 10 lat wynosiła średnio około 91 kWh/m$^2$ (uwzględniając tylko 10 centralnych godzin dnia). Suma promieniowania w połowie dnia po południu słonecznym (godzina południa słonecznego wg czasu CEST wypadała między 12.25, a 12.36, zależnie od dnia miesiąca) stanowiła 50,62% z całego dnia. Test Wilcoxona rozstrzygnął, że jest to różnica istotna statystycznie (tab. 3), ponieważ hipoteza o równości sum została odrzucona ($p<<0,05$). Mediana różnic wskazuje na to, że to sumy po południu słonecznym są wyższe.

Badając kolejne pary godzin symetrycznie oddalonych od południa słonecznego we wrześniu wnioskowano na podstawie testu Wilcoxona, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o braku różnic w grupach dla pierwszej i pary godzin. Natomiast istotne statystycznie różnice wystąpiły w trzeciej, czwartej i piątej parze godzin, oddalonych odpowiedni o 3, 4 i 5 godzin od południa słonecznego (tab. 3).

Tabela 3. Charakterystyka pięciu porównywanych par sum godzinowych promieniowania i wyniki testu Wilcoxona we wrześniu

Table 3. Compared pairs of hourly solar radiation data and Wilcoxon's test results (for September)

| Parametr testu | Porównywane grupy | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | $Q_{ANTE}$/ $Q_{POST}$ | $QI_A$/ $QI_P$ | $QII_A$ / $QII_P$ | $QIII_A$ / $QIII_P$ | $QIV_A$ / $QIV_P$ | $QV_A$ / $QV_P$ |
| Mediana grupy Wmin/m$^2$ | 103249/ 101657 | 28677/ 28417 | 28635/ 26145 | 23390/ 23179 | 15851/ 16835 | 6905/ 9925 |
| Mediana różnic, Wmin/m$^2$ | -4978 | -387 | 101 | -1272 | -1535 | -2562 |
| Statystyka T | 16062 | 20087 | 18537 | 17082 | 15920 | 9256 |
| Wartość p | 0,00335 | 0,99655 | 0,25940 | 0,02875 | 0,02381 | 0,00010 |

## 4. Analiza wyników badań

Analiza statystyczna sum promieniowania słonecznego w kwietniu w latach 2005-2014 wykazała niewielką, ale istotną statystycznie przewagę sum promieniowania po południu słonecznym. Test przeprowadzony dla par w poszczególnych godzinach nie był tak jednoznaczny. W trzech pierwszych parach godzin

w sąsiedztwie południa, nie stwierdzono istotnej różnicy kształtującej przewagę sum promieniowania po południu słonecznym. Dwie pary godzin najbardziej oddalone od południa słonecznego determinują przewagę sum promieniowania po południu słonecznym. Analiza statystyczna sum promieniowania słonecznego we wrześniu w latach 2005-2014 wskazała istotną przewagę sum promieniowania po południu słonecznym. Największy wpływ na kształtowanie tej przewagi mają pary godzin oddalonych symetrycznie od południa słonecznego o 3, 4 i 5 godzin. W dwóch pierwszych godzinach w sąsiedztwie południa słonecznego sumy promieniowania nie wykazują istotnych różnic.

Trudno jest przedstawić prostą teorię charakteryzującą powstawanie zachmurzenia i wyjaśniającą wykryte zależności. Analizy wymaga m. in. rozkład czasowy zawartość wilgoci, ozonu oraz pyłów zawieszonych w powietrzu w dzielnicy Ursynów. Badania kontynuowane będą w kierunku statystycznej oceny zawartości składników atmosfery wpływających na jej zmętnienie przed i po południu słonecznym. Wstępna ocena (bez instrumentów statystycznych) dotyczyła stężenia pyłu zawieszonego PM10 w dzielnicy Ursynów (stacja Wojewódzkiego Inspektoratu Ochrony Środowiska). Stężenie pyłów zostało sprawdzone o godzinie 9:00 oraz o16:00. Godziny te zawierały się w przedziale mającym istotny wpływ na przewagę sum promieniowania po południu słonecznym. Przykładowo w kwietniu 2012 roku stężenie pyłu zmierzone o godzinie 9:00 było o około 40% wyższe niż o godzinie 16:00. Generalnie dzienna zawartość pyłów przed południem słonecznym była we wrześniu, tak jak i w kwietniu, wyraźnie większa przed południem słonecznym, co może być przyczyną zmniejszenia wtedy sumy promieniowania słonecznego.

## 5. Podsumowanie

Analiza rozkładu promieniowania słonecznego przed i po południu słonecznym opierała się na pomiarach na stacji, znajdującej się na terenie SGGW w Warszawie. Przewaga sum promieniowania po południu słonecznym w kwietniu i we wrześniu okazała się istotna statystycznie. Odchylenie od azymutu południowego w kierunku zachodnim w przypadku płaszczyzn nachylonych znajduje tym samym dodatkowe uzasadnienie. Dalsze badania według analogicznej metodyki będą dotyczyć miesięcy od maja do sierpnia, a także sum promieniowania na płaszczyźnie nachylonej.

## Literatura

[1] Kożuchowski K.: Klimat Polski, nowe spojrzenie, PWN, Warszawa 2011.

[2] Matuszko D.: Wpływ zachmurzenia na usłonecznienie i całkowite promieniowanie słoneczne na przykładzie krakowskiej serii pomiarów, Uniwersytet Jagielloński, Kraków 2009.

[3] Żmudzka E.: Zmienność zachmurzenia nad Polską i jej uwarunkowania cyrkulacyjne, Wydawnictwo Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2007.

[4] Woś A.: Klimat Polski w drugiej połowie XX wieku, PWN, Warszawa 2010.

[5] Chwieduk D.: Modelowanie i analiza pozyskiwania oraz konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku, rozprawa habilitacyjna, IPPT PAN, Warszawa 2006.

[6] Bogdańska B., Podogrocki J.: Zmienność całkowitego promieniowania słonecznego na obszarze Polski w okresie 1961-1995, IMiGW, Warszawa 2000.

[7] Chochowski A., Czekalski D., Obstawski P.: Pomiary pyranometryczne na stanowisku SGGW – Ursynów. Polska Energetyka Słoneczna nr 2, 2005.

[8] Krassowska M.: Rozkład dobowego natężenia promieniowania słonecznego na płaszczyźnie poziomej w miesiącu kwietniu i wrześniu w latach 2005-2014, SGGW, praca inżynierska, Warszawa 2015.

## DISTRIBUTION OF SOLAR RADIATION IN RELATION TO SOLAR NOON ON HORIZONTAL SURFACE IN APRIL AND SEPTEMBER

**S u m m a r y**

In this paper, we present comparison between a global solar radiation on a horizontal surface before and after solar noon. Ten years (2005-2014) data from meteorological station located within campus SGGW – Warsaw were used. April and September data were selected for analysis. We have used statistical Wilcoxon's test to compare sums of solar radiation for statistical differences. Solar radition after noon is significant higher than before one, both the months. With regard to first and second pair nearest noon hours, there were no evidence to reject hypothesis about equality of hourly solar radiation before and after solar noon. However, in the fourth and fifth pair of hours, were accepted alternative hypothesises – hourly solar radition after noon is significant higher than before one.

**Keywords:** half-daily solar radiation, hourly solar radiation, comparison, paired difference test

DOI:10.7862/rb.2016.186

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 67-74

**Bernardeta DĘBSKA**[1]
**Karolina GÓRSKA**[2]

# OCENA MOŻLIWOŚCI ZAGOSPODAROWANIA ODPADÓW W SEKTORZE BUDOWLANYM

Ogromne ilości powstających odpadów stały się jednym z najważniejszych problemów środowiskowych. Zwiększona aktywność w dziedzinie budownictwa sprawia, że dużą część odpadów stałych stanowią odpady budowlane i rozbiórkowe. Konieczność zrównoważonego wykorzystania naturalnych zasobów i negatywne skutki niewłaściwej utylizacji odpadów, sprawiają, że możliwość zagospodarowania odpadów jest przedmiotem rosnącego zainteresowania wielu ośrodków badawczych na świecie. Korzystne i coraz częściej proponowane rozwiązania sugerują konieczność użycia materiałów odpadowych podczas produkcji wyrobów budowlanych przeznaczonych na budowę domów, dróg oraz innych elementów infrastruktury. Praktyka ta umożliwia zmniejszenie objętości odpadów składowanych na wysypiskach, jednocześnie ograniczając wykorzystanie naturalnie wydobywanych surowców, a tym samym przyczynia się do zmniejszenia emisji szkodliwych gazów cieplarnianych i wpływu przemysłu budowlanego na środowisko naturalne. Eksperymenty opisane w literaturze potwierdzają możliwość otrzymywania materiałów budowlanych z wykorzystaniem różnego typu odpadów. Liczne publikacje powstałe na ten temat skłaniają jednak do postawienia pytania o możliwość realizacji takich działań w warunkach rzeczywistych. W ramach niniejszego artykułu opisano wyniki ankiety przeprowadzonej wśród firm produkujących materiały budowlane z terenu całej Polski. Ankieta ta przyjęła postać aplikacji internetowej udostępnionej na podstawie licencji opensource. Zawierała ona 10 pytań dotyczących realnego wykorzystywania odpadów w produkcji materiałów budowlanych oraz ponownego wykorzystania materiałów budowlanych i elementów konstrukcyjnych. Na ankietę odpowiedziały 22 firmy, z których połowa potwierdziła fakt wykorzystywania odpadów w produkcji materiałów budowlanych. Wśród najczęściej wymienianych odpadów znalazł się gruz betonowy i odpady powstałe w elektrowniach, co jest zgodne ze stanem przedstawionym w literaturze.

**Słowa kluczowe:** zagospodarowanie odpadów, materiały budowlane, ankieta, recykling, reusing

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Bernardeta Dębska, Politechnika Rzeszowska, Zakład Budownictwa Ogólnego, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651323; bdebska@prz.edu.pl

[2] Karolina Górska, studentka Politechniki Rzeszowskiej

## 1. Wprowadzenie

Budownictwo powoduje duże zużycie zasobów naturalnych i energii, co stawia nowe wyzwania przed producentami materiałów budowlanych. Zasadniczą potrzebą stała się ochrona środowiska naturalnego i ograniczenie ilości odpadów. Jest to możliwe dzięki racjonalnej gospodarce odpadami, która sprowadza się głównie do takich procesów, jak:

- recykling - wykorzystanie odpadów jako surowca do produkcji nowych materiałów,
- reusing - ponowne wykorzystanie materiałów bądź elementów, które nadają się do powtórnego użycia.

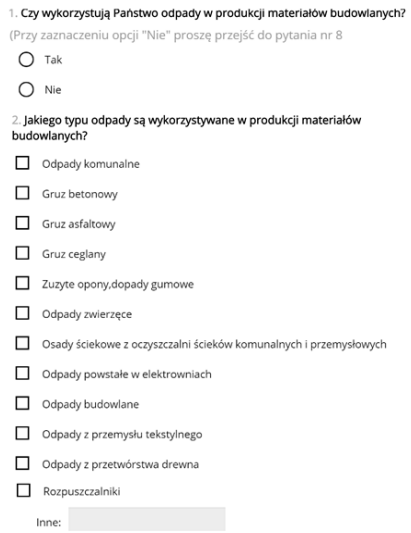
Naprzeciw tym problemom wychodzi idea budownictwa zrównoważonego, które w ostatnich latach stało się powszechnie obowiązującym standardem. Zrównoważony rozwój rozpatrywany jest w trzech głównych aspektach: ekologicznym, ekonomicznym i ergonomicznym (socjalno-kulturowym). Aspekt ekologiczny realizuje się m.in. przez ograniczenie ilości odpadów i recykling materiałów budowlanych, szczególnie ważne jest również powtórne wykorzystanie elementów konstrukcyjnych, które nadają się do ponownego użytku [1]. Podczas rozbudowy, nadbudowy czy modernizacji obiektów wskazane jest zachowanie istniejących ścian, podłóg czy dachu. Ponowne wykorzystanie istniejących elementów budynku pozwala znacząco ograniczyć powstawanie odpadów. Z kolei w nowych inwestycjach pożądane są materiały, które zawierają w sobie odpady, np. beton zawierający kruszywa z recyklingu lub inne produkty odpadowe, wełna szklana czy szkło okienne, w których produkcji używana jest stłuczka szklana a także płyty gipsowo-kartonowe (gdy karton wykonano z makulatury) oraz stal zawierająca złom dodawany do surówki podczas wytopu [2].

Ośrodki naukowe prowadzą liczne badania na temat wykorzystania odpadów, o czym świadczy wiele doniesień literaturowych na ten temat i ciągłe pojawianie się nowych artykułów poświęconych temu zagadnieniu. Sektor budownictwa i produkcji materiałów budowlanych odgrywa w tej kwestii ogromną rolę. Wielu naukowców potwierdziło w swoich badaniach możliwość produkcji betonu z wykorzystaniem kruszywa z recyklingu, pochodzącego m.in. z odpadów budowlanych i rozbiórek [3], z rozdrobnionych odpadów betonowych [4], odpadów prefabrykowanych elementów konstrukcyjnych [5]. Kompozyt taki można otrzymywać także dodając popiół osadów ściekowych [6]. Betony i zaprawy odgrywają również istotną rolę w procesie recyklingu odpadów tworzyw sztucznych, m.in. poli(tereftalanu etylenu) (PET) [7-12], polietylenu (PE) i polistyrenu (PS) [13], a także polipropylenu (PP) [14]. Produkcja ceramiki też stwarza duże możliwości utylizacji odpadów. Dane literaturowe wskazują na pozytywne efekty modyfikacji tego materiału za pomocą osadów ściekowych [15], popiołów lotnych [16] i odpadów szklanych [17]. Odpadami modyfikowano także spoiwa [15], kleje [18], materiały izolacyjne [19] i bitumiczne [20] oraz otrzymywano z nich nowe materiały [21].

Przedstawione możliwości wykorzystania odpadów w produkcji materiałów budowlanych, potwierdzone w skali laboratoryjnej, zrodziły pytanie, czy i w jakim zakresie problem recyklingu jest rozwiązywany również w rzeczywistych warunkach. Wśród firm produkujących materiały budowlane i firm budowlanych z terenu całej Polski, przeprowadzono ankietę, w której pytano o wykorzystywanie odpadów w produkcji materiałów budowlanych oraz o ponowne użycie materiałów budowlanych. W niniejszym artykule przedstawiono wyniki tego badania ankietowego.

## 2. Metodyka i wyniki badań

Do badań ankietowych wykorzystano program o nazwie Interankiety [22], udostępniany jako aplikacja internetowa na podstawie licencji opensource. W przypadku korzystania z rozbudowanej postaci ankiety, program ten jest płatny. Dla podstawowych funkcji można jednak stworzyć taką ankietę bezpłatnie. Wybór tego typu aplikacji pozwolił na przeprowadzenie badań ankietowych w Internecie, co obecnie uznaje się za standardowe rozwiązanie. W kwestionariuszu pojawiają się pytania zamknięte. Zaplanowano także pytania otwarte, w ramach których ankietowani mogli wpisać odpowiedzi tekstowe. Ankieta zawierała 10 pytań, z możliwością pominięcia wybranych z nich. Wyniki ankiety mogą pomóc w ocenie rzeczywistych możliwości wykorzystania odpadów na terenie Polski. Ankieta umożliwiła porównanie stanu opisanego w literaturze z sytuacją rzeczywistą. Na rysunkach 1a-1c pokazano, w jakiej postaci wyświetlała się ankieta na komputerze osoby ankietowanej.


1. **Czy wykorzystują Państwo odpady w produkcji materiałów budowlanych?**

(Przy zaznaczeniu opcji "Nie" proszę przejść do pytania nr 8

- ○ Tak
- ○ Nie

2. **Jakiego typu odpady są wykorzystywane w produkcji materiałów budowlanych?**

- ☐ Odpady komunalne
- ☐ Gruz betonowy
- ☐ Gruz asfaltowy
- ☐ Gruz ceglany
- ☐ Zuzyte opony,dopady gumowe
- ☐ Odpady zwierzęce
- ☐ Osady ściekowe z oczyszczalni ścieków komunalnych i przemysłowych
- ☐ Odpady powstałe w elektrowniach
- ☐ Odpady budowlane
- ☐ Odpady z przemysłu tekstylnego
- ☐ Odpady z przetwórstwa drewna
- ☐ Rozpuszczalniki

Inne:

Rys. 1a. Wzór ankiety

Fig. 1a. Example of the survey

3. Czy do produkcji materiałów budowlanych wykorzystują Państwo któryś z poniższych typów odpadów z tworzyw sztucznych?

- ☐ LDPE
- ☐ HDPE
- ☐ PP
- ☐ PVC
- ☐ PS
- ☐ PET
- ☐ PUR
- ☐ Nie stosuje się

Inne:

4. W jakiej postaci wykorzystywane są odpady?

- ☐ Proszek
- ☐ Włókna
- ☐ Agregaty
- ☐ Roztwór

Inne:

5. Czy dodatek odpadu zmienia właściwości produktu?

- ☐ Tak, na korzyść
- ☐ Tak, niekorzystnie
- ☐ Nie
- ☐ Znacznie
- ☐ Nieznacznie

6. W jaki sposób dodawane są odpady?

- ☐ Substytut
- ☐ Dodatkowy składnik

Inne:

7. Na zmianę jakich parametrów materiały wpływa zastosowanie odpadów?

- ☐ Wytrzymałościowe
- ☐ Nasiąkliwość
- ☐ Izolacyjność termiczna
- ☐ Izolacyjność akustyczna
- ☐ Zmiana koloru
- ☐ Zmiana struktury
- ☐ Dynamiczne
- ☐ Nie zmienia ale możliwa jest jego bezpieczna utylizacja

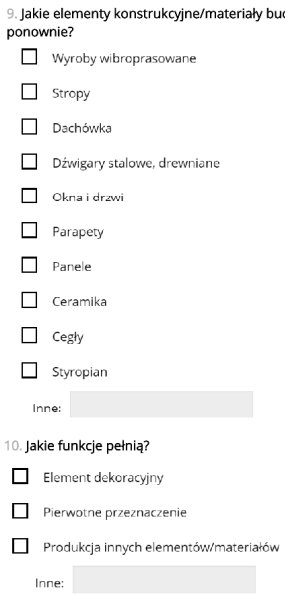
Inne:

8. Czy stosują Państwo ponownie przydatne konstrukcyjnie elementy/materiały budowlane?

- ☐ Tak
- ☐ Nie

Rys. 1b. Wzór ankiety cd

Fig. 1b. Example of the survey cont




Rys. 1c. Wzór ankiety cd

Fig. 1c. Example of the survey cont

## 3. Analiza wyników

Serwis Interankiety umożliwia w łatwy sposób stworzenie ankiety, a następnie zebranie wyników i ich analizę. Osoba tworząca ankietę ma dostęp do wyników ankiety przedstawionych w postaci wykresów oraz zestawień procentowych, które generują się automatycznie po wypełnieniu ankiety. Ankieter ma również możliwość obejrzenia odpowiedzi wybranego respondenta, a także sprawdzenia liczby osób ankietowanych.

W przeprowadzonej ankiecie udział wzięło dwadzieścia dwie firmy działające na terenie całej Polski. Firmy te zajmują się m.in. produkcją: ceramiki, kruszyw, materiałów bitumicznych, betonu i materiałów izolacyjnych. Na podstawie wyników ankiety można stwierdzić, że badania na temat możliwości recyklingu odpadów, prowadzone przez różne ośrodki naukowe, znajdują zastosowanie w praktyce. Dokładnie połowa ankietowanych firm potwierdziła fakt użycia odpadów w produkcji materiałów budowlanych i ich wykorzystania jako substytut lub dodatkowy składnik (po 6 odpowiedzi). Jedna z ankietowanych firm wykorzystuje odpady jako materiał energetyczny wprowadzany do instalacji.

12 firm podało jakiego typu odpady wykorzystuje w produkcji materiałów budowlanych. Najwięcej (5 głosów) dotyczyło gruzu betonowego, natomiast 4 respondentów wymieniło odpady powstałe w elektrowniach. Spośród wy-

szczególnionych w pytaniu ankietowym typów odpadów nie wymieniono jedynie odpadów zwierzęcych. Dodatkowo przedstawiciele firm zdeklarowali wykorzystanie takich odpadów jak: żużle i odpady z produkcji kruszyw, styropian, opakowania po klejach epoksydowych i kilkadziesiąt innych rodzajów odpadów zgodnie z pozwoleniem zintegrowanym.

10 firm deklarowało stosowanie odpadów tworzyw sztucznych, głównie polietylenu, PVC i PUR. Odpady wykorzystywane są głównie w postaci proszku (5 odpowiedzi), włókien (2 głosy) i agregatów (2 głosy). Wymieniono również: granulat i kruszywo oraz płyny.

Wśród 10 ankietowanych, którzy udzielili odpowiedzi na pytanie, czy dodatek odpadu zmienia właściwości produktu, połowa potwierdziła, że ten wpływ jest korzystny. Firmy potwierdzają, że modyfikacja odpadami powoduje poprawę głównie właściwości wytrzymałościowych i izolacyjnych, a także możliwa jest ich bezpieczna utylizacja, przy jednoczesnym zachowaniu pierwotnych właściwości materiału.

Przedsiębiorstwa budowlane potwierdzają również możliwość ponownego użycia materiałów i elementów konstrukcyjnych (11 pozytywnych odpowiedzi). Elementami o największym stopniu wykorzystania okazały się cegły oraz stolarka okienna i drzwiowa. Są one wykorzystywane zarówno w pierwotnej formie, jak i do produkcji nowych elementów. Pełnią także funkcję dekoracyjną lub stanowią podbudowę dróg.

## 4. Podsumowanie

Opisane w artykule przykłady badań oraz wyniki przeprowadzonej ankiety potwierdzają możliwość zagospodarowania odpadów w sektorze budowlanym. Materiały budowlane stają się coraz droższe, wzrastają również koszty transportu. Dodatkowo wiele obiektów wymaga rewaloryzacji, co pociąga za sobą dodatkowe koszty zagospodarowania lub utylizacji materiałów rozbiórkowych. Ogromna ilość odpadów zalegająca na wysypiskach zmusza do podjęcia dalszych badań prowadzących do zminimalizowania ich ilości w sposób ekologiczny, a zarazem ekonomiczny. Przeprowadzenie badań ankietowych pozwoliło na ustalenie listy zakładów produkujących materiały budowlane z wykorzystaniem materiałów odpadowych. Pozyskana w ten sposób wiedza może zostać wykorzystana podczas przygotowywania wspólnych projektów dofinansowanych ze środków Unii Europejskiej, o które może się ubiegać uczelnia i przedsiębiorcy.

## Literatura

[1] http://www.inteligentnybudynek.eu/artykul/article/budownictwo-zrownowazone-powszechnie-obowiazujacy-standard/ {dostęp 16.05.2016 r.}.

[2] http://www.muratorplus.pl/technika/zrownowazony-rozwoj/materialy-budowlane-w-zgodzie-z-idea-zrownowazonego-rozwoju_69787.html {dostęp 16.05.2016 r.}.

[3] Özalp F., Dilşad Yılmaz H., Kara M., Kaya Ö., Şahin A.: Effects of recycled aggregates from construction and demolition wastes on mechanical and permeability properties of paving stone, kerb and concrete pipes, Construction and Building Materials, vol. 110, 2016, pp. 17–23.

[4] Fan Ch-Ch., Huang R., Hwang H., Chao S-J.: Properties of concrete incorporating fine recycled aggregates from crushed concrete wastes, Construction and Building Materials, vol. 112, 2016, pp. 708–715.

[5] Thomas C., Setién J., Polanco J.A.: Structural recycled aggregate concrete made with precast wastes, Construction and Building Materials, vol. 114, 2016, pp. 536–546.

[6] Paris J.M., Roessler J.G., Ferraro Ch.C., DeFord H.D., Townsend T.G.: A review of waste products utilized as supplements to Portland cement in concrete, Journal of Cleaner Production, vol. 121, 2016, pp. 1-18.

[7] Jo B.W., Park S.K., Kim C.H.: Mechanical properties of polyester polymer concrete using recycled polyethylene terephthalate, ACI Structural Journal, vol. 103, 2006, pp. 219–225.

[8] Marzouk O.Y., Dheilly R.M., Queneudec M.: Valorization of post-consumer waste plastic in cementitious concrete composites, Waste Management, vol. 27, 2007, pp. 310–318.

[9] Dębska, B., Lichołai, L.: The selected mechanical properties of epoxy mortar containing PET waste, Construction and Building Materials, vol. 94, 2015, pp. 579–588.

[10] Lichołai, L., Dębska, B.: A study of the effect of corrosive solutions on selected physical properties of modified epoxy mortars, Construction and Building Materials, vol. 65, 2014, pp. 604–611.

[11] Dębska, B., Lichołai, L.: Resin Composites with High Chemical Resistance for Application in Civil Engineering, Periodica Polytechnica civil Engineering, DOI: 10.3311/PPci.7744.

[12] Dębska, B.: Modification of Polymer Composites by Polyethylene Terephthalate Waste, Poly(ethylene Terephthalate) Based Blends, Composites and Nanocomposites (Book), Visakh P.M., Liang M. red., Elsevier, Inc., 2015, pp.195–212.

[13] Ismail Z.Z., Al-Hashmi E.A.: Use of waste plastic in concrete mixture as aggregate replacement, Waste Management, vol. 28, 2008, pp. 2041–2047.

[14] Langier B., Werner K., Baranowski W.: Modyfikacje betonu dodatkiem rozdrobnionego polipropylenu, Przetwórstwo tworzyw, nr 4, 2014, s. 299-304.

[15] Latosińska J., Żygadło M.: Gospodarka odpadami a produkcja materiałów budowlanych, Materiały z VII Międzynarodowego Forum Gospodarki Odpadami – Efektywne zarządzanie gospodarką odpadami, Kalisz-Poznań 2007, s. 563–572.

[16] Monteiro R.C.C., Lima M.M.R.A., Aloes S.: Mechanical characteristics of clay structural ceramics containing coal fly ash, International Journal of Mechanics and Materials in Design, vol. 4, 2008, pp. 213–220.

[17] Leshina V.A., Pivnev A.L.: Ceramic wall materials using glass waste, Glass and Ceramics, vol. 59, 2002, pp. 356–358.

[18] Dębska B., Lichołai L.: Badania nad wykorzystaniem modyfikowanych żywic epoksydowych jako głównego składnika klejów stosowanych w budownictwie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowi-

ska i Architektury - Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture. JCEEA", t. XXXI, z. 61 (3/II/14) 2014, s. 113-120, DOI: 10.7862/rb.2014.79.

[19] Thormark C.: Conservation of energy and natural resources by recycling building waste, Resources, Conservation & Recycling, vol. 33, 2001, pp. 113–130.

[20] García-Morales M., Partal P., Nawarro F.J., Martínez-Boza F., Gallegos C., González N., González O., Munoz M.E.: Viscous properties and microstructure of recycled EVA modified bitumen, Fuel, vol. 83, 2004, pp. 31–38.

[21] Turgut P.: Limestone dust and glass powder wastes as new brick material, Materials and Structures, vol. 41, 2008, pp. 805–813.

[22] https://www.interankiety.pl/ {dostęp 16.05.2016 r.}.

## ASSESSMENT OF THE POSSIBILITY OF WASTE MANAGEMENT IN THE CONSTRUCTION INDUSTRY

**S u m m a r y**

A huge amount of generated waste have become one of the most important environmental problems. Increased activity in the construction sector makes a large part of solid waste are a construction and demolition waste. The need for sustainable use of natural resources and the negative effects of improper waste disposal, make the possibility of waste management is a subject of growing interest to many research centers in the world. The preferred and more often proposed solutions suggest the need for the use of waste materials in the production of building products for the construction of houses, roads and other infrastructure. This practice allows you to reduce the volume of waste deposited in landfills, while reducing the use of naturally extracted materials, and thus contributes to the reduction of emissions of greenhouse gases and the impact of the construction industry on the environment. The experiments described in the literature confirm the possibility of obtaining building materials using different types of waste. Numerous publications produced on the subject tend, however, to the question about the possibility of implementing such measures in real conditions. In the present article describes the results of a survey of companies producing construction materials from the whole Polish. This survey took the form of a web application made available under open source license. It contained 10 questions about the real use of waste in the production of building materials and re-use of building materials and components. Submissions were 22 companies, half of which confirmed that the use of waste in the production of building materials. Among the most frequently mentioned waste was concrete rubble and waste generated in power plants, which is consistent with the state in the literature.

**Keywords:** waste management, building materials, polling, recycling, reusing

DOI:10.7862/rb.2016.187

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 75-84

**Jolanta FIEDUCIK**[1]

# SAMOWYSTARCZALNE ENERGETYCZNIE GOSPODARSTWO AGROTURYSTYCZNE

W artykule przedstawiono analizę zaspokojenia potrzeb energetycznych dla energooszczędnego gospodarstwa agroturystycznego. W analizie uwzględniono zapotrzebowanie na energię cieplną do celów grzewczych w ciągu całego roku, ciepłą wodę użytkową oraz energię elektryczną. Analiza oparta jest o energię wytworzoną w gospodarstwie agroturystycznym zapewniającą samowystarczalność pod względem energetycznym. Obliczono zapotrzebowanie w energię grzewczą na podstawie stopniodni w poszczególnych miesiącach roku przyjmując za parametr zużycie energii 40 kWh/m$^2$/rok. W celu pozyskania energii do ogrzewania gospodarstwa zaproponowano uprawę wierzby energetycznej na własny użytek na odpowiednim areale, a dla ogrzania ciepłej wody użytkowej c.w.u. zaproponowano słoneczne kolektory powietrzne, które oprócz ogrzewania c.w.u. mogą wspomagać ogrzewanie budynku. Analizę zapotrzebowania ciepła na ogrzewanie budynku energooszczędnego przez kolektory powietrzne przeprowadzono przy pomocy programu GetSolar, który służy do symulacji instalacji kolektorów słonecznych w różnych warunkach klimatycznych. Rozważania przeprowadzono dla warunków klimatycznych miasta Olsztyna, uwzględniając napromieniowanie w warunkach północnej Polski. Przedstawiono bilans energii uwzględniając wartość energii napromieniowania słonecznego dla kolejnych miesięcy w roku oraz energii potrzebnej na ogrzanie energooszczędnego domu jednorodzinnego i c.w.u. Do rozważań wykorzystano komercyjne zestawy słonecznych kolektorów powietrznych SolarVenti Hybryd. Na podstawie analizy wyników stwierdzono, że przy zastosowaniu odpowiedniej powierzchni słonecznych kolektorów powietrznych w warunkach północnej Polski, jest możliwe ogrzanie budynku i zaspokojenia potrzeb na ciepłą wodę dla mieszkańców poza miesiącami zimowymi. W tym okresie należy zastosować alternatywne źródła ogrzewania. Przeanalizowano wytworzenie energii elektrycznej na potrzeby gospodarstwa przy wykorzystaniu ogniw fotowoltaicznych. Z przeprowadzonej analizy wynika, że możliwe jest stworzenie samowystarczalnego energetycznie gospodarstwa agroturystycznego w warunkach klimatycznych Olsztyna.

**Słowa kluczowe:** samowystarczalne energetycznie gospodarstwo, wierzba energetyczna, ogniwa fotowoltaiczne, słoneczne kolektory powietrzne

[1] Jolanta Fieducik, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych, Katedra Elektrotechniki, Energetyki, Elektroniki i Automatyki. Oczapowskiego 11, 10-900 Olsztyn; tel. 512 205 527; jolanta.fieducik@uwm.edu.pl

# 1. Wprowadzenie

Celem artykułu jest przedstawienie możliwości zapewnienia samowystarczalności energetycznej gospodarstwa agroturystycznego na bazie odnawialnych źródeł energii. Koszty ogrzewania gospodarstwa agroturystycznego wraz z podgrzewaniem ciepłej wody użytkowej stanowią przeciętnie od 70 do 80% rocznych kosztów eksploatacji budynku. Tak więc od zastosowanego rozwiązania grzewczego zależeć będzie większość stałych wydatków ponoszonych na utrzymanie domu. Koszty ogrzewania domu zależą od wielu czynników, w pierwszym rzędzie od jego wielkości i standardu izolacyjności cieplnej, a następnie od rodzaju paliwa i sprawności systemu grzewczego. W zależności od wyboru paliwa czy nośnika energii, można porównać z dużym przybliżeniem koszty wytworzenia 1 kWh ciepła i tym samym ogrzewania budynku.

## 1.1. Definicja gospodarstwa agroturystycznego

Pod pojęciem gospodarstwa agroturystycznego rozumiemy różne formy wypoczynku organizowanego na terenach wiejskich o charakterze rolniczym, przez rodzinę rolniczą bezpośrednio we własnym gospodarstwie wiejskim (rolniczym, rybackim czy ogrodniczym), oparte o bazę noclegową i aktywności rekreacyjne związane z gospodarstwem rolnym lub równoważnym i jego otoczeniem przyrodniczym, produkcyjnym i usługowym.

Ofertą agroturystyczną jest zakwaterowanie w gospodarstwie, które może być połączone z całodziennym wyżywieniem lub możliwością zakupu świeżych produktów z gospodarstwa do samodzielnego przyrządzania posiłków. Prowadzić je może tylko rolnik mający powyżej 1ha gruntów, ubezpieczony w Kasie Rolniczego Ubezpieczenia Społecznego KRUS, wynajmować może 5 pokoi w domu na wsi wspólnie zamieszkałym z wczasowiczami bez konieczności zgłaszania działalności gospodarczej. Ma to spowodować:
– możliwości uzyskania dodatkowych dochodów dla rolników;
– poprawę życia na wsi;
– stworzenie dla mieszkańców miast korzystnych warunków wypoczynku przez bezpośredni dostęp do naturalnych warunków środowiska, w kameralnych warunkach.

## 1.2 Założone parametry energooszczędnego gospodarstwa agroturystycznego

Aby zapewnić niezbędną energię do ogrzewania dla domu energooszczędnego w standardzie NF 40 (Narodowy Fundusz) potrzebne jest 40 kWh/m$^2$·rok [1,2]. Do analizy w artykule założono:
– budynek o podstawie: 10m × 10m;
– powierzchnia użytkowa: 150m$^2$;
– dach dwuspadowy o kącie nachylenia: 45$^o$;
– powierzchnia dachu od strony południowej: 70m$^2$;
– dom w warunkach klimatycznych Olsztyna, (IV strefa klimatyczna);

– zużycie ciepłej wody na 10 osób wg normy;
– zastosowanie wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła - rekuperacja;
– możliwość wykorzystywania ciepła z energii słonecznej (montaż instalacji kolektorów).

## 2. Propozycja ogrzewania gospodarstwa agroturystycznego przy wykorzystaniu zrębków wierzby energetycznej

Na ogrzewanie gospodarstwa domowego na wsi wg danych Głównego Urzędu Statystycznego GUS [3] w 2015 roku wykorzystywano drewno opałowe – 89%, inne paliwa z biomasy – 8%, pozostałe paliwa kopalniane – 3%.
Struktura urządzeń do ogrzewania pomieszczeń była następująca:
– kotły dwufunkcyjne 50,9%;
– kotły jednofunkcyjne 33,5%;
– piece i kominki 16,2%.

### 2.1. Zapotrzebowanie na energię do ogrzania budynku gospodarstwa agroturystycznego i c.w.u.

Na ogrzanie w ciągu roku domu energooszczędnego wg standardu NF 40 o powierzchni 150 $m^2$ potrzebna jest energia 6000 kWh (150$m^2$ × 40 kWh/$m^2$·rok). Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania budynku i na przygotowanie ciepłej wody użytkowej c.w.u. dla 10 osób w poszczególnych miesiącach przedstawiono poniżej w tabeli 1 [4].

Jak wynika z analizy danych w tabeli 1, energia *Q*o na ogrzewanie domu i energia *Q*cwu na przygotowanie c.w.u. daje w sumie łączną energię około *E*c=16160 kWh w ciągu roku. Przy wykorzystaniu kotła dwufunkcyjnego i przy średniej sprawności $\eta$ = 80%, zapotrzebowanie roczne *Q* na energię z biomasy wynosi:

$$Q = Ec / \eta, \tag{1}$$

$$Q = 16160 \text{ kWh} / 0{,}80 = 20200 \text{ kWh}.$$

Przeliczając kWh na MJ, gdzie 1kWh = 3,6MJ otrzymujemy zapotrzebowanie roczne w MJ:

$$Q = 20200 \text{ kWh} * 3{,}6 \text{ MJ/kWh} = 72\,720 \text{ MJ}.$$

Zakładając, że wartość energetyczna *W*e zrębków z wierzby energetycznej przy zawartości 20% wilgoci wynosi *W*e = 12 000 MJ/Mg, to *Mz* masa rocznego zapotrzebowania na zrębki wyniesie [5]:

$$Mz = \text{Q} / We, \tag{2}$$

$$Mz = 72\,720\text{MJ} / 12\,000\text{MJ/Mg} = 6{,}06 \text{ Mg}$$

Zatem do ogrzania gospodarstwa agroturystycznego i na przygotowanie c.w.u. dla średnio10 osób potrzeba teoretycznie około 6 Mg zrębków wierzby energetycznej, które uzyskać można z 0,5 hektara plantacji [5]. Co prawda 0,5 ha uprawy wystarczy na jeden rok ogrzewania, ale wierzba energetyczna w praktyce zbierana jest w cyklu 3 letnim, dlatego areał uprawy powinien wynosić 1,5 ha. Przy tym rozwiązaniu uwzględniono niezbędny okres suszenia wierzby. W gospodarstwie agroturystycznym kocioł centralnego ogrzewania może być używany na inną biomasę, np. drewno, brykiety, pelety, trociny, natomiast popiół ze spalania biomasy można używać jako nawóz.

Tabela 1. Zapotrzebowanie roczne na energię do ogrzewania i przygotowania c.w.u.

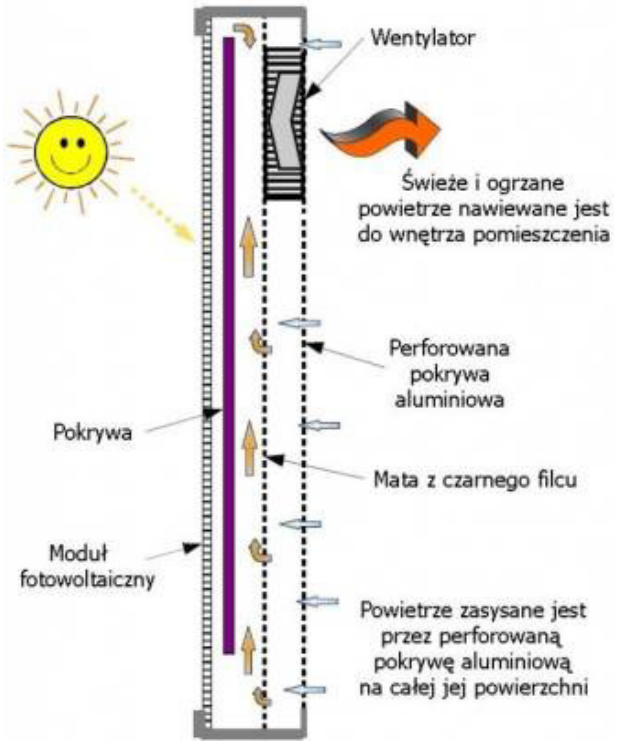
Table 1. Annual demand for energy for heating and hot tap water

| Miesiąc | Energia potrzebna na ogrzewanie domu 150m$^2$ standard NF 40 | Energia na c.w.u. dla 10 osób |
|---|---|---|
| | [kWh] | [kWh] |
| I | 1310 | 862 |
| II | 886 | 779 |
| III | 700 | 862 |
| IV | 379 | 836 |
| V | 184 | 862 |
| VI | 45 | 836 |
| VII | 0 | 862 |
| VIII | 13 | 862 |
| IX | 160 | 836 |
| X | 532 | 862 |
| XI | 575 | 836 |
| XII | 1217 | 862 |
| **Razem** | **6001** | **10157** |

## 3. Analiza ogrzewania budynku i ciepłej wody użytkowej w gospodarstwie agroturystycznym przy wykorzystaniu powietrznych kolektorów słonecznych

Budowę i zasadę działania kolektora słonecznego przedstawiono na rysunku 1. Powietrze z zewnątrz przez tylną perforowaną ściankę zasysane jest do wnętrza kolektora, gdzie ogrzewa się. Ogrzane powietrze przez wentylator kie-

rowane jest do wnętrza ogrzewanego pomieszczenia [6]. Wentylator zasilany jest energią elektryczną uzyskiwaną z modułu fotowoltaicznego wbudowanego w kolektor. Kolektory powietrzne można montować pionowo lub poziomo na południowej stronie budynku. Szczególną uwagę należy zwrócić na drzewa, budynki czy inne wysokie przedmioty, które w okresie zimowym, gdy Słońce jest zbyt nisko, mogą rzucać cień na kolektor. Kolektor słoneczny można montować bezpośrednio na ścianie, słupkach drewnianych tuż obok budynku lub stelażu przeznaczonym do montażu na dachu. Ogrzane powietrze przekazywane zostaje do budynku za pomocą kanału elastycznego, łączącego kolektor z anemostatem nawiewnym w pomieszczeniu.

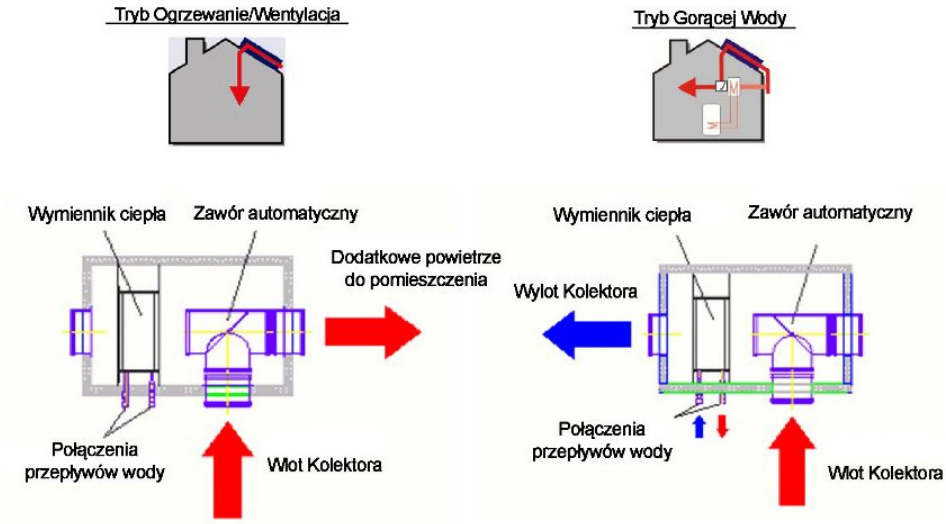



Rys.1. Schemat kolektora powietrznego [6]

Fig. 1. Diagram of the air collector [6]

Powietrzne kolektory słoneczne połączone z wymiennikiem ciepła można wykorzystać w gospodarstwie agroturystycznym do ogrzewania budynków i do przygotowania ciepłej wody użytkowej.

Schemat takiej instalacji i zasadę działania przedstawiono na rysunku 2.




Rys.2. Schemat instalacji kolektora powietrznego z wymiennikiem ciepła [7]

Fig. 2. Installation diagram collector air heat exchanger [7]

Przy trybie pracy ogrzewanie /wentylacja ogrzane w kolektorze powietrze poprzez zawór automatyczny kierowane jest do pomieszczeń budynku. W trybie pracy gorącej wody powietrze z kolektora poprzez zawór automatyczny kierowane jest do wymiennika ciepła podgrzewając wodę.

W tabeli 2 przedstawiono dane w skali roku z napromieniowania i bilans energii dla instalacji powietrznych kolektorów słonecznych o powierzchni 60 $m^2$ wykorzystanej do ogrzewania budynku w standardzie NF 40 i powierzchni 150 $m^2$ oraz ciepłej wody użytkowej dla 10 osób.

Z napromieniowania 1 $m^2$ słonecznego kolektora powietrznego w ciągu roku można uzyskać średnią energię napromieniowania $En$ = 1092 kWh/$m^2$. Dla instalacji kolektorów o powierzchni $Sk$ = 60 $m^2$ i sprawności kolektorów $\eta k$ = 70% w ciągu roku możemy uzyskać energię całkowitą $Qc$ na ogrzewanie i ciepłą wodę użytkową [8]:

$$Qc = En * Sk * \eta k, \tag{3}$$

$$Qc = 1092 \text{ kWh/m}^2 * 60\text{m}^2 * 70\% = 45868 \text{ kWh}.$$

Jeżeli wartość energii całkowitej $Qc$ pomniejszymy o energię $Qogrz$ = 6000 kWh na ogrzewanie domu i $Qcwu$ = 10169 kWh na ogrzewanie c.w.u. to w skali roku otrzymamy nadwyżkę energii z kolektorów $Q$n:

$$Qn = Qc - Qogrz - Qcwu, \tag{4}$$

$Qn = 45868 – 6000 – 10169 = 29699$ [kWh],

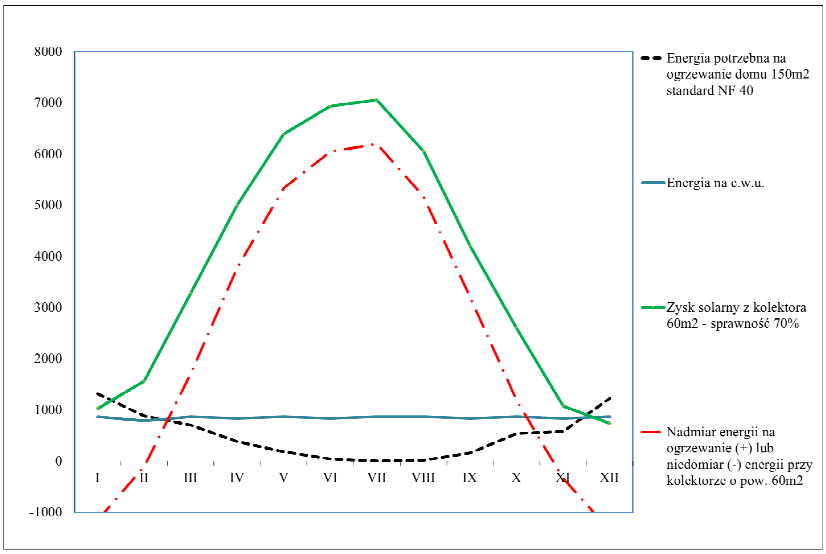
gdzie $Qn$ - nadwyżka energii cieplnej ze słonecznych kolektorów powietrznych.

Tabela 2. Bilans energii z kolektorów do ogrzewania i przygotowanie c.w.u. w roku [8,9]
Table 2. Balance energy collectors for heating and preparing hot tap water in year [8,9]

| Miesiąc | Napromieniowanie na 1m$^2$ kolektora | Napromieniowanie całkowite kolektora powietrznego o pow. 60m$^2$ | Energia potrzebna na ogrzewanie domu 150m$^2$ standard NF 40 | Energia na c.w.u. | Zysk solarny z kolektora 60m$^2$ - sprawność 70% | Nadmiar energii na ogrzewanie (+) lub niedomiar (-) energii przy kolektorze o pow. 60m2 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | kWh | kWh | kWh | kWh | kWh | kWh |
| I | 24,4 | 1464 | 1310 | 863 | 1025 | -1148 |
| II | 37,2 | 2232 | 886 | 780 | 1562 | -104 |
| III | 77,9 | 4674 | 700 | 863 | 3272 | 1709 |
| IV | 119 | 7140 | 379 | 837 | 4998 | 3782 |
| V | 152 | 9120 | 184 | 863 | 6384 | 5337 |
| VI | 165 | 9900 | 45 | 837 | 6930 | 6048 |
| VII | 168 | 10080 | 0 | 863 | 7056 | 6193 |
| VIII | 144 | 8640 | 13 | 863 | 6048 | 5172 |
| IX | 100 | 6000 | 160 | 837 | 4200 | 3203 |
| X | 61,6 | 3696 | 532 | 863 | 2587 | 1192 |
| XI | 25,6 | 1536 | 575 | 837 | 1075 | -337 |
| XII | 17,4 | 1044 | 1217 | 863 | 731 | -1349 |
| **Razem** | **1092** | **65520** | **6000** | **10169** | **45868** | **29699** |

Analizując bilans uzyskiwanej z kolektorów nadwyżki wynika, że jej wartość jest największa w miesiącach letnich. W miesiącach listopad, grudzień, styczeń i luty energia z kolektorów nie pokrywa w pełni zapotrzebowania na ogrzewanie budynku oraz ciepłej wody użytkowej i niezbędne jest dodatkowe źródło ciepła do wyrównania bilansu. Możliwe jest również budowa instalacji do magazynowania energii cieplnej z miesięcy o dużej nadwyżce i wykorzystania jej w okresie niedoboru.

Poniżej dane z tabeli zobrazowano na rys.3.




Rys. 3. Bilans energii cieplnej w [kWh] z powietrznych kolektorów słonecznych do ogrzewania i przygotowanie c.w.u. w ciągu roku [8]

Fig. 3. The balance of heat Energy [kWh] from the air solar collectors for heating and preparation of hot tap water during the year [8]

## 4. Konwersja energii słonecznej przy pomocy ogniw fotowoltaicznych na energię elektryczną wykorzystywaną w gospodarstwie agroturystycznym

Według danych z Głównego Urzędu Statystycznego w 2014 roku na obszarze wiejskim 84,2% wszystkich mieszkań stanowiły domy jednorodzinne, a średnia liczba osób w gospodarstwie domowym wynosiła 3,6. Średnia powierzchnia użytkowa domu jednorodzinnego w gospodarstwie na wsi posiada 103,7 $m^2$. Na wsi średnie zużycie energii elektrycznej na jedno gospodarstwo domowe wyniosło rocznie 2544 kWh [3]. Założono, że na 10 osób w gospodarstwie agroturystycznym zużycie wynosi 10000 kWh na rok. Możliwe jest zapewnienie zasilania gospodarstwa agroturystycznego w energię elektryczną przy wykorzystaniu paneli fotowoltaicznych. Bardzo dobrym rozwiązaniem jest montaż dostępnych na rynku gotowych zestawów fotowoltaicznych w systemie on-grid. Energia elektryczna prądu stałego z ogniw fotowoltaicznych przetwarzana jest przez inwerter na energię elektryczną prądu przemiennego o napięciu fazowym 230V dostosowanym do domowej instalacji elektrycznej [10,11]. Domowa instalacja elektryczna połączona jest z energetyczną siecią publiczną przez układ sterowania z inwerterem i dwufunkcyjnym licznikiem energii elektrycznej. Licznik ten może zliczać energię elektryczną pobraną z sieci publicznej przez gospodarstwo agroturystyczne lub energię elektryczną przekazywaną z instalacji fotowoltaicznej do sieci publicznej. W tym układzie przy op-

tymalnych warunkach nasłonecznienia energia elektryczna wytworzona z ogniw fotowoltaicznych zasila urządzenia elektryczne w gospodarstwie agroturystycznym. Gdy zapotrzebowanie przez gospodarstwo na energię jest niższe niż energia wytwarzana przez ogniwa fotowoltaiczne wówczas nadmiar energii z instalacji fotowoltaicznej jest przesyłany do publicznej sieci energetycznej. Natomiast gdy energia wytwarzana przez ogniwa fotowoltaiczne nie pokrywa potrzeb gospodarstwa wówczas z publicznej sieci energetycznej pobierana jest energia na wyrównanie potrzeb. Cały proces przekazywania energii elektrycznej do sieci publicznej i pobierania energii z sieci do gospodarstwa jest automatyczny i kontrolowany przez układ sterowania, a dwufunkcyjny licznik energii elektrycznej rejestruje ilości energii przekazanej do sieci publicznej i pobranej z sieci. Dla przykładu zestaw złożony z 38 sztuk modułów ogniw fotowoltaicznych SV60P.4-260 o łącznej powierzchni 64,2 $m^2$ i mocy nominalnej 9,88 kWp współpracujący z inwerterem KACO BLUEPLANET 9.0 TL3 jest w stanie wytworzyć szacunkowo około 9590 kWh/rok energii elektrycznej [12]. Z analizy wynika, że to rozwiązanie zapewni gospodarstwu agroturystycznemu pokrycie zapotrzebowania na energię elektryczną.

## 5. Podsumowanie

Z powyższej analizy wynika, że uprawa 3 × 0,5 ha wierzby energetycznej zapewnia paliwo na ogrzewanie i przygotowanie c.w.u. w domu energooszczędnym. Poza tym w warunkach klimatycznych Olsztyna możliwe jest wykorzystanie 60 $m^2$ powietrznych kolektorów słonecznych do ogrzewania budynku gospodarstwa agroturystycznego i podgrzewania c.w.u.. Natomiast instalacja ogniw fotowoltaicznych o powierzchni około 64,2 $m^2$ skierowana do strony południowej pokrywa zapotrzebowanie na energię elektryczną gospodarstwa agroturystycznego. W takim budynku wymagane jest odzyskiwanie ciepła z wentylacji czyli stosowanie rekuperacji. Dopłata do budynku energooszczędnego spełniającego wymagania standard NF 40 wynosi obecnie w Polsce 30 000 zł.

Ze względu na specyfikę przyrody i klimatu Warmii i Mazur największe zainteresowanie agroturystyką notuje się w okresie od kwietnia do września. Większe w tym okresie zapotrzebowanie na energię cieplną i elektryczną w gospodarstwie agroturystycznym znakomicie zaspokajają instalacje kolektorów słonecznych i ogniw fotowoltaicznych.

Zatem z powyższej analizy wynika, że przy założonych parametrach w warunkach klimatycznych Olsztyna możliwe jest zapewnienie samowystarczalności energetycznej gospodarstwa agroturystycznego.

## Literatura

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

[2] Schlagowski G., Rozwój budownictwa energooszczędnego, pasywnego i zero energetycznego w Europie i w Polsce. Przepisy europejskie i polskie. Polski Instytut Budownictwa Pasywnego Sp. z o.o. Gdańsk 2011.

[3] Rocznik Głównego Urzędu Statystycznego, 2015.
[4] Fieducik J., Godlewski J., Storing thermal energy from solar collectors for the needs of a detached house, Polish Journal of Environment Studies, vol.23. no.4, 2014.
[5] Stolarski J., Szczukowski S., Tworkowski J., Wierzba energetyczna. Plant Pres, Kraków 2006.
[6] http://www.galileaenergy.com/kolektory-powietrzne-systemy-solar-venti.php, {dostęp 23.05.2016 r.}.
[7] http://www.solarventi.com, {dostęp 23.05.2016 r.}.
[8] Fieducik J., Godlewski J., The low energy house using an air solar collector- a case study, Czasopismo techniczne, 3-B(8), 2014, str. 99-105.
[9] GetSolar software Autor: Dipl.-ing Markus Maier. wersja 10.1.1. 21.12.2009 r.
[10] Smolec W., Fototermiczna konwersja energii słonecznej, PWN, Warszawa, 2000.
[11] Lewandowski W. Proekologiczne odnawialne źródła energii, Warszawa, 4, 2012.
[12] www.selfa-pv.com/pl/produkty/moduly-fotowoltaiczne/sv60{dostęp 23.05.2016 r.}.

## AN ENERGY SELF-SUFFICIENT AGRO TOURISTIC FARM

**S u m m a r y**

The article analyses the energetic needs of a low-energy agro touristic farm. The current parameters of a low-energy house have been presented in detail. In the analysis, the thermal energy needed for heating purposes for duration of a year, hot water for utilities, and necessary electrical energy have been taken into account.

The analysis is based on energy produced in the agro touristic farm, providing energetic self-sufficiency. The demand for thermal energy has been estimated based on the average temperature/days in the particular months of the year, assuming the energy consumption to be 40 kWh/m2/year. To obtain the thermal energy for the farm, the cultivation of energetic willow on a suitable area has been proposed. Alternatively, for heating water an analysis of obtaining it through the use of solar collectors has been provided and the optimal type of collectors chosen.

From this analysis it follows that it is possible to create an energetically self sufficient agro touristic farm in the climatic conditions of Olsztyn.

**Keywords:** energy self-sufficient farm, willow, photovoltaic cells, solar air collectors

DOI:10.7862/rb.2016.188

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 85-93

**Tomasz GACZOŁ**[1]

# PODCIŚNIENIOWY I NADCIŚNIENIOWY SYSTEM WENTYLACJI GRAWITACYJNEJ

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. Najczęstszym popełnianym przez projektantów błędem jest zły dobór przekroju poprzecznego pola powierzchni wywiewnego kanału wentylacyjnego w stosunku do jego wysokości, a zatem do występującego w nim ciągu. Wielokrotnie pomijane są wymogi normowe dotyczące konieczności zapewnienia, odpowiedniej krotności wymiany powietrza lub strumienia przepływu powietrza mierzonego w $m^3/s$. Na skutek tych zaniedbań dochodzi do zróżnicowanych efektów wentylacji pomieszczeń występujących na różnych kondygnacjach. Przedstawiony artykuł ma na celu omówienie i spopularyzowanie opracowanej przez autora metody, która umożliwia uzyskanie na każdej kondygnacji tych samych wyników poprawnego działania wymiany powietrza. Rodzaj systemu; podciśnieniowy lub nadciśnieniowy zależy jedynie od kondygnacji, na której został zastosowany. Przedstawione rozwiązanie jest bardzo prostym pomysłem na modernizację istniejących i projektowanie nowych budynków. Nie wymaga dużych nakładów finansowych i działa samoczynnie, ponieważ jest to system wentylacji grawitacyjnej bez żadnych elementów wspomagania. Poprawnie działająca wentylacja grawitacyjna odpowiada za zdrowie i dobre samopoczucie ludzi przebywających w budynku, a także za uzyskanie dobrych parametrów mikroklimatycznych np. wilgotność, temperatura czy prawidłowa, ujemna jonizacja powietrza. Odpowiedni stan techniczny przegród budowlanych i innych elementów obiektu, bez występujących zawilgoceń, zagrzybień to także efekt dobrze działającej wentylacji grawitacyjnej.

**Słowa kluczowe**: nadciśnienie, podciśnienie, nawiew, wywiew, krotność wymiany, strumień powietrza

## 1. Wybór tematu

Wzmożone prace budowlane w zakresie termomodernizacji obiektów budowlanych oraz ograniczenie napływu odpowiedniego strumienia powietrza do

[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

pomieszczeń, sprawia coraz częściej spotykane problemy związane z nieprawidłowo działającą wentylacją grawitacyjną działającą okresowo oraz ze zmienną wydajnością. W Polsce istniejące budynki mieszkalne to w większości przypadków, obiekty powstałe w oparciu o system wentylacji grawitacyjnej. Według wymagań PN-83/B-03430, również nowe obiekty o wysokości do 9 kondygnacji mogą być wyposażone w system wentylacji grawitacyjnej. W obu przypadkach proponowane przeze mnie rozwiązanie może mieć szerokie zastosowanie w naszym kraju. Nie wymaga ono stosowania dużych nakładów finansowych oraz użycia skomplikowanych, drogich urządzeń wentylacyjnych. Wzorem wielu światowych znanych realizacji, które powstały w oparciu o wybrany system wentylacji naturalnej, może przynieść zadawalające efekty, przede wszystkim związane z ludzkim zdrowiem i dobrym stanem technicznym obiektów.

## 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 [1],[2]. System działa bez zakłóceń pod warunkiem, że do wentylowanych pomieszczeń istnieje stały napływ powietrza zewnętrznego. Na skutek zamontowania nowej szczelnej stolarki okiennej i drzwiowej, modernizacji termicznej budynków dochodzi do uszczelnienia budynków oraz zakłócenia poprawnego działania systemu wentylacji grawitacyjnej. Może to doprowadzić do pojawienia się ciągu wstecznego w kanałach wentylacyjnych, a co za tym idzie do wielu przykrych konsekwencji z zagrożeniem zdrowia i życia ludzkiego włącznie [3]. Dbając o to, by do tego nie doszło należy zaprojektować urządzenia lub rozwiązania umożliwiające swobodny napływ powietrza do pomieszczeń. Jednym z takich rozwiązań projektowych jest czerpnia powietrza i nawiewny kanał wentylacji grawitacyjnej.

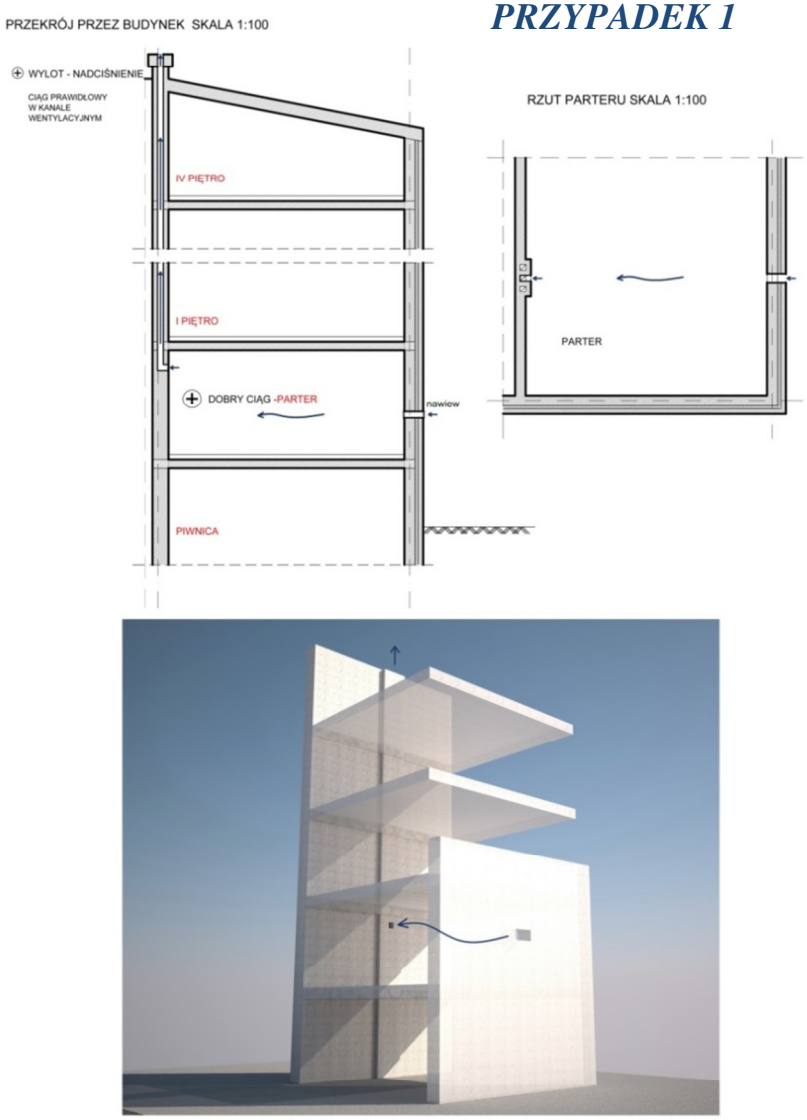
## 3. Czerpnia powietrza

Projektując system podciśnieniowej lub nadciśnieniowej wentylacji grawitacyjnej należy w pierwszej kolejności zapewnić prawidłowy dopływ powietrza do budynku. Do tego celu służyć będzie czerpnia powietrza, która może być usytuowana od strony północnej, wschodniej lub północno - wschodniej, np. w części podpiwniczenia lub przyziemia obiektu. Czerpnię należy zaprojektować w bezpośrednim sąsiedztwie pionowych kanałów wentylacji grawitacyjnej. Pomieszczenie na nią przeznaczone, powinno być ogrzewane (zalecana temperatura powietrza, w zakresie od 16°C do 18°C, wilgotność względna od 40% do 60%), okresowo czyszczone i posiadać wszystkie ściany i podłogę wykonane z materiałów zmy-

walnych. Jego powierzchnia to nie mniej niż 2.0 $m^2$, a wysokość przynajmniej 2.2 m (te wartości wynikają ze zwykłych potrzeb użytkowych). Kratka nawiewna czerpni, musi być zamontowana na wysokości minimum 100 centymetrów od powierzchni terenu i wyposażona w filtr, co zabezpieczy przed przedostaniem się do niej drobin kurzu , pyłu i innych zanieczyszczeń. Pole przekroju poprzecznego kanału wlotu powietrza do czerpni, musi być przynajmniej dwa razy większe od sumy pól powierzchni przekrojów poprzecznych kanałów nawiewnych dostarczających powietrze z czerpni do poszczególnych pomieszczeń użytkowych. Wynika to z oporów występujących podczas przepływu mas powietrza przez filtr 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) [4],[5]. Czerpnia może być również połączona z gruntowym zasobnikiem powietrza, umieszczonym pod ziemią, poniżej poziomu zamarzania gruntu. W zasobniku, powietrze służące do wentylacji wstępnie się ogrzewa, dzięki czemu uzyskuje się oszczędności wynikające ze znikomych strat ciepła na skutek wymiany powietrza w pomieszczeniach [6]. Szczegółowe przepisy dotyczące wymogów stawianych czerpni oraz wyrzutni powietrza, znajdują się w: Dzienniku Ustaw 2013 poz. 926: „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" [7].

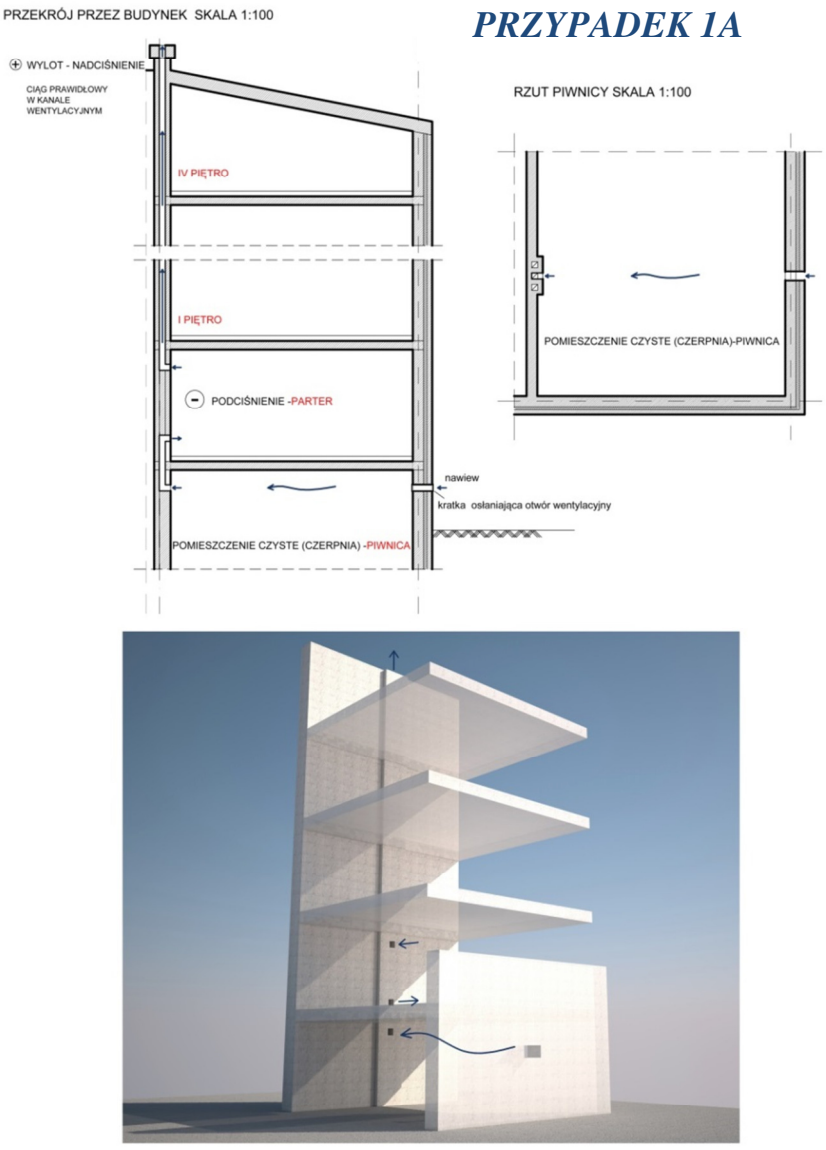
## 4. Sposób działania

W pierwszym przypadku rozważaniom zostanie poddane pomieszczenie, położone na niskiej kondygnacji budynku. Jest ono zazwyczaj wyposażone w długi, biegnący pionowo przez całą wysokość budynku, kanał wentylacji grawitacyjnej. W pomieszczeniu dochodzi do powstania podciśnienia, a zjawisko to ulega wzmożeniu w momencie kiedy napływ powietrza jest ograniczony. Dzieje się tak ponieważ powietrze wypełniające kubaturę pomieszczenia jest cały czas zasysane i odprowadzane na zewnątrz, poprzez wysoki kanał wentylacji grawitacyjnej wywiewnej. Zakładając, że tym samym przemurowanym kanałem (jeżeli schodzi do poziomu czerpni powietrza) lub nowo projektowanym, doprowadzimy z czerpni do wentylowanego pomieszczenia zewnętrzne masy powietrza, to dojdzie do wyrównania różnicy ciśnień. Napływ i odpływ, będzie się odbywał tym samym strumieniem powietrza bez względu na to, że w pomieszczeniu są szczelnie zamknięte okna, a budynek jest poddany termomodernizacji. Warunkiem koniecznym do spełnienia takiej wymiany, jest rozdzielenie od siebie kanałów: nawiewnego i wywiewnego. Jeżeli system będzie działał w oparciu o istniejący przewód wentylacji grawitacyjnej, to pomiędzy wlotem i wylotem kanału należy je rozdzielić (zamurować). Jeżeli jednak istniejący kanał wentylacji grawitacyjnej zaczyna się dopiero na poziomie wentylowanej kondygnacji, to należy do niej doprowadzić nowy kanał nawiewny (rys. 1, rys. 2).



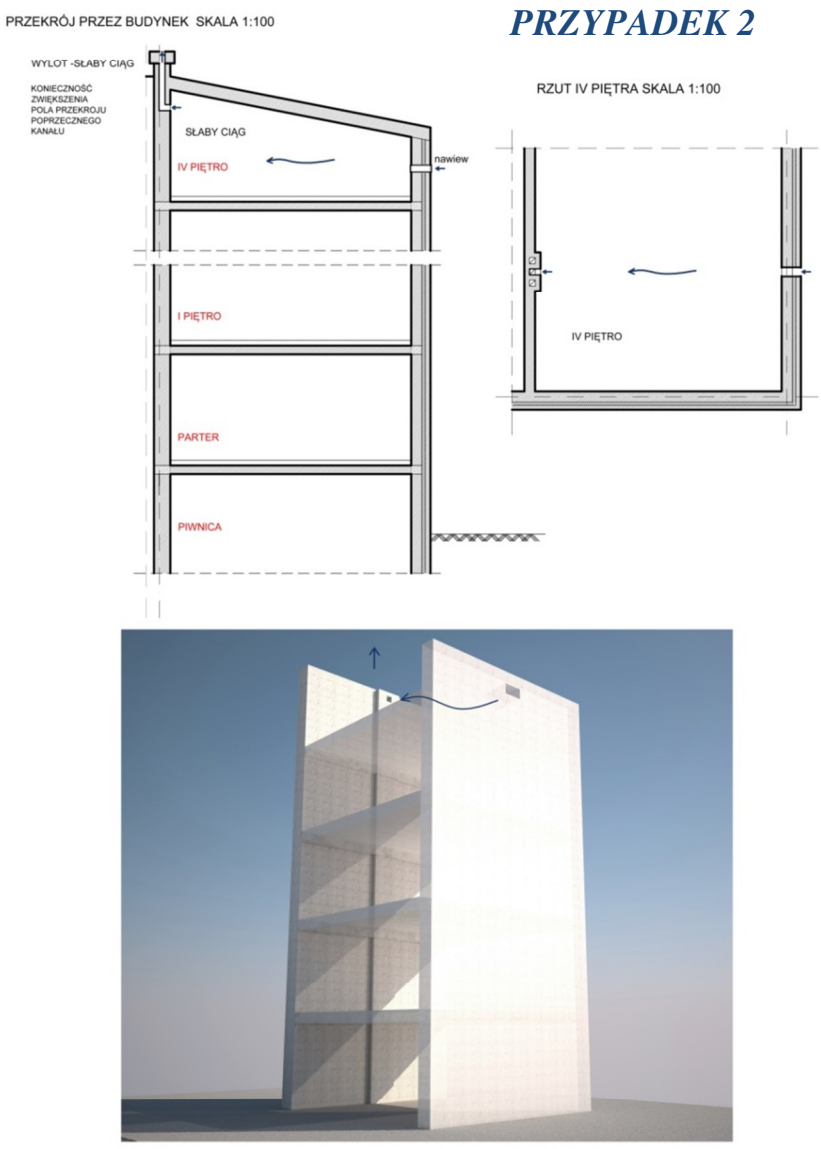

Rys. 1. Wentylacja grawitacyjna. Rozkład ciśnienia w budynku z kanałem wywiewnym. Różnica ciśnień - rysunek autora

Fig. 1. Gravitational ventilation. Pressure distribution in building with the exhaust duct. Pressure differential - figure of the author



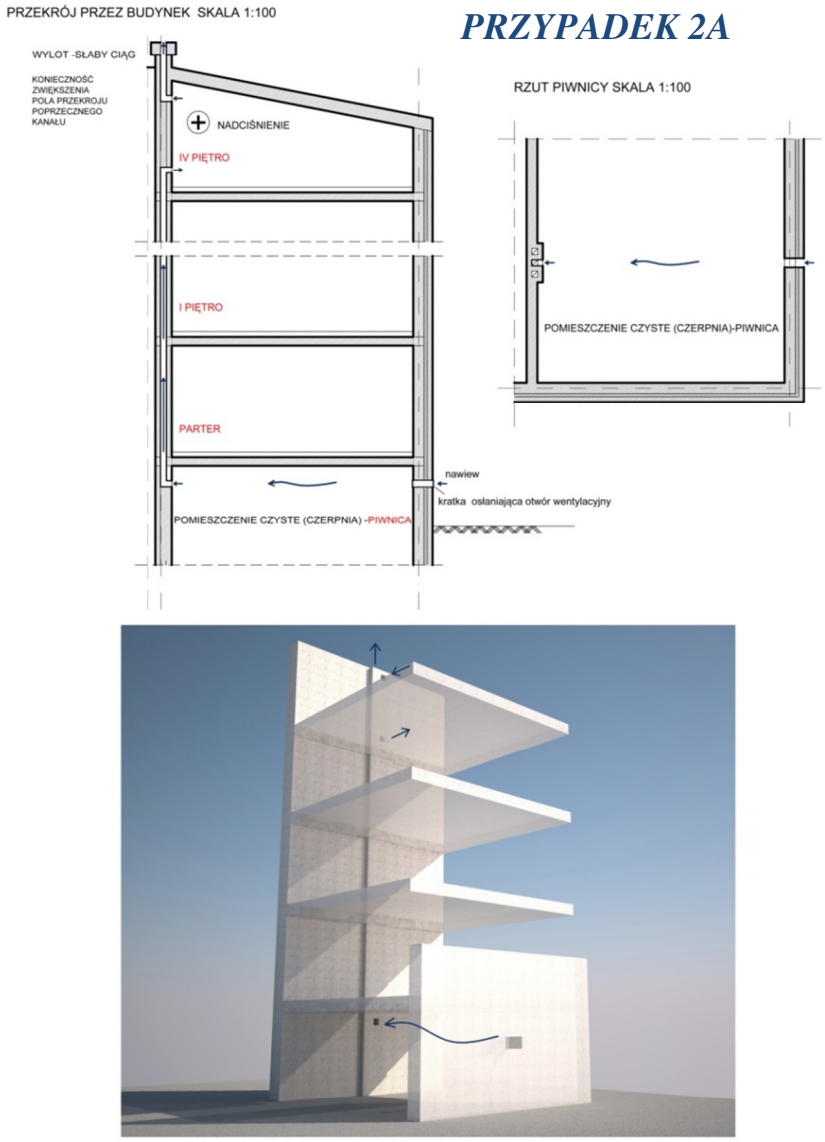

Rys. 2. Wentylacja grawitacyjna. Rozkład ciśnienia w budynku z kanałem nawiewnym i wywiewnym. Różnica ciśnień - rysunek autora

Fig. 2. Gravitational ventilation. Pressure distribution in building with the inhaust and exhaust duct. Pressure differential - figure of the author




Rys. 3. Wentylacja grawitacyjna. Rozkład ciśnienia w budynku z kanałem wywiewnym. Różnica ciśnień - rysunek autora

Fig. 3. Gravitational ventilation. Pressure distribution in building with the exhaust duct. Pressure differential - figure of the author




Rys. 4. Wentylacja grawitacyjna. Rozkład ciśnienia w budynku z kanałem nawiewnym i wywiewnym. Różnica ciśnień - rysunek autora

Fig. 4. Gravitational ventilation. Pressure distribution in building with the inhaust and exhaust duct. Pressure differential - figure of the author

W drugim przypadku rozważaniom zostanie poddane pomieszczenie, na wysoko położonej kondygnacji budynku. Jest ono zazwyczaj wyposażone w krótki, biegnący pionowo, kanał wentylacji grawitacyjnej. W pomieszczeniu dochodzi do powstania podciśnienia, a zjawisko to ulega wzmożeniu w momencie kiedy napływ powietrza jest ograniczony. Dzieje się tak ponieważ powietrze wypełniające kubaturę pomieszczenia jest cały czas zasysane i powinno zostać odprowadzone na zewnątrz. Zakładając, że tym samym przemurowanym kanałem (jeżeli schodzi do poziomu czerpni powietrza) lub nowo projektowanym, doprowadzimy z czerpni do wentylowanego pomieszczenia zewnętrzne masy powietrza, to dojdzie do wzmożonego, grawitacyjnego napływu powietrza do pomieszczenia. Napływ i odpływ, będzie się odbywał tym samym strumieniem powietrza. W ten sposób pomieszczenia położone na różnych kondygnacjach są w równym stopniu wentylowane bez względu na różnicę wysokości kanału wywiewnego, zakładając przy tym ten sam wymiar jego przekroju poprzecznego (rys. 3, rys. 4).

## 5. 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:

– poprawa wydajności systemu wentylacji grawitacyjnej w nowych budynkach oraz w obiektach istniejących, poddanych termomodernizacji (docieplenie ścian zewnętrznych, montaż nowych szczelnych okien i drzwi),
– przestarzałe, normowe wytyczne projektowe (stare normy i przepisy) dotyczące wentylacji grawitacyjnej,
– zła jakość powietrza, znajdującego się w pomieszczeniach i chorobowe zagrożenia z tym związane,
– oszczędności energetyczne uzyskane zazwyczaj, poprzez ograniczenie przepływu powietrza przez budynek,
– dbałość o dobry stan techniczny elementów budowlanych i wyposażenia budynku (brak zawilgoceń i zagrzybień).

## Literatura:

[1] Ferencowicz J.: „Wentylacja i klimatyzacja”. Warszawa, Arkady 1964. Wydanie 2, s.: 641.
[2] Polski Związek Inżynierów i Techników Budownictwa: ”Poradnik inżyniera i technika budowlanego”. Warszawa, Arkady 1968, tom 2 część III, s. 373 oraz 385.
[3] Kusionowicz T.: „Problemy projektowania budynków mieszkalnych, a zdrowie człowieka”. Monografia, Kraków 2008. Politechnika Krakowska, seria architektura, s. 43, 51, 52.

[4] 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.

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

[6] Gaczoł T. „Wentylacja naturalna. Systemy nawiewu – wybrane przykłady". Kraków 2007. Czasopismo Techniczne Politechniki Krakowskiej. Architektura z. 4-A/2007, s. 63-70.

[7] Dzienniku Ustaw 2013 poz. 926: „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".

## VACUUM AND PRESURE RELIEF SYSTEM OF NATURAL VENTILATION

**S u m m a r y**

This paper aims the discuss and popularizing described by the author method, which allows the same results for on each floors of proper air exchange operation. Type of system; vacuum or overpressure depends only on floor, at which was applied. The proposed solution is a very simple idea to modernize both the existing and new designed buildings. It does not require large financial outlays and it operates automatically, as this is the natural ventilation system without any support compounds. A properly functioning natural ventilation is responsible for the health and well-being of people living in the building, as well as gain good parameters of the microenvironment as humidity, temperature and proper, negative air ionization. Suitable condition of building partitions and other elements of the object, without appearing of moisture, molds is also the important effect of a well working natural gravity ventilation.

**Keywords:** natural ventilation, hypertension, hypotension, ventilation, exhaust, times of exchange, the air stream

DOI:10.7862/rb.2016.189

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 95-104

**Halina GARBALIŃSKA**[1]
**Jarosław STRZAŁKOWSKI**[2]

# KRUSZYWO JAKO CZYNNIK KSZTAŁTUJĄCY PARAMETRY CIEPLNE BETONÓW O NIEMODYFIKOWANEJ MATRYCY CEMENTOWEJ

W niniejszej pracy poddano analizie wpływ użytego kruszywa na właściwości termiczne kompozytów betonowych o niemodyfikowanej matrycy cementowej. Przetestowano trzy rodzaje kruszyw: kruszywo kamienne o dużej szczelności oraz dwa kruszywa lekkie: keramzytowe oraz popiołoporytowe. Przeprowadzono rtęciowe badania porozymetryczne samych kruszyw, jak również betonów na ich bazie. Wykonane mieszanki betonowe charakteryzowały się niemodyfikowaną matrycą cementową, dzięki czemu możliwe było porównanie zróżnicowanych właściwości betonów wynikających z wariantowo dobranego kruszywa gruboziarnistego.
W pracy przygotowano dwa rodzaje próbek: płytkowe do badań cieplnych oraz sześcienne potrzebne do przeprowadzenia testów wytrzymałości betonu na ściskanie. Próbki przez pierwsze 28 dni przechowywano w komorze klimatycznej w wysokiej wilgotności, następnie próbki umieszczono w powietrzno-suchych warunkach laboratoryjnych. Parametry termiczne betonów testowano przez pierwszy rok dojrzewania w zadanych przedziałach czasu. Podobnie wykonywano badania wytrzymałości na ściskanie po 7, 14, 28 dniach oraz po 3, 6 i 12 miesiącach dojrzewania betonu.
W publikacji wykazano wyraźną korelację między porowatością kruszywa a przewodnością cieplną i ciepłem właściwym betonów. Struktura kruszywa miała również niebagatelny wpływ na tempo wysychania betonów. Przedstawiono także zależność między porowatością kruszyw a wytrzymałością betonu na ściskanie. W pracy pokazano także zdjęcia SEM przekrojów przez badane betony.

**Słowa kluczowe:** keramzyt, kruszywo popiołoporytowe, kruszywo kamienne przewodność cieplna, pojemność cieplna, porozymetria rtęciowa, badania SEM

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Halina Garbalińska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 42 91; Halina.Garbalinska@zut.edu.pl

[2] Jarosław Strzałkowski, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 43 41; jstrzalkowski@zut.edu.pl

## 1. Wprowadzenie

Udział kruszywa w objętości betonu przekracza często 50 %, dlatego też jest jednym z najważniejszych czynników kształtujących jego właściwości. Ma ono dominujący wpływ na podstawowe parametry betonu takie jak wytrzymałość na ściskanie i rozciąganie, nasiąkliwość, jak również jego właściwości cieplne. Poprzez dobór odpowiedniego kruszywa możliwe jest zatem bezpośrednie oddziaływanie na wynikowe właściwości betonu. Obecnie dysponujemy szeroką gamą kruszyw [2], [3]: począwszy od zwykłego kruszywa kamiennego, przez lekkie kruszywa takie jak keramzyt czy popiołoporyt nadające betonowi właściwości izolacyjne, aż po ciężkie kruszywa bazaltowe i magnetytowe istotnie wpływające na wytrzymałość i odporność betonu na promieniowanie.

Kształtowanie właściwości betonu za pośrednictwem różnego rodzaju kruszyw jest tematem często podejmowanym w literaturze przedmiotu. Na przykład w [6] Ślosarczyk i in. przeanalizowali wpływ dodania tlenku glinu na właściwości mechaniczne betonu na bazie kruszywa lekkiego. Wykazali, że dodatek elektrokorundu poprawia zagęszczenie struktury zaczynu, zwiększając tym samym wytrzymałość na ściskanie i odporność na ścieranie. Również użycie dodatku żużla paleniskowego, traktowanego jako zamiennik grubego kruszywa kamiennego wpływa na właściwości mechaniczne i mikrostrukturalne betonu [5].

Porowata struktura kruszyw popiołoporytowych może być m.in. wykorzystana w konstrukcjach wymagających podwyższonej mrozoodporności. W [1] omówiono zagadnienie mrozoodporności konstrukcyjnych betonów lekkich ze szczególnym uwzględnieniem wpływu jego wstępnej wilgotności. Uzyskane rezultaty wskazują, że podwyższoną mrozoodporność można zapewnić stosując lekkie kruszywo o niskim zawilgoceniu wstępnym (patrz [1]).

Kruszywo wywiera również duży wpływ na właściwości zapraw. Badania przedstawione w [4] wykazały wyraźne zróżnicowanie właściwości zarówno mechanicznych jak i termoizolacyjnych w zależności od użytego kruszywa drobnoziarnistego.

W niniejszym artykule podjęto próbę oceny wpływu specyficznej struktury porowatości różnych rodzajów kruszyw na właściwości stwardniałego betonu, ze szczególnym uwzględnieniem parametrów termicznych oraz wytrzymałości na ściskanie.

## 2. Testowane materiały

W pracy przetestowano trzy rodzaje kruszyw: zwykłe kruszywo kamienne – bazowe (B) o niskiej nasiąkliwości oraz dwa kruszywa lekkie – keramzyt (K) i popiołoporyt (P).

Podstawowe właściwości testowanych kruszyw przedstawiono w tabeli nr 1. Otrzymane wartości testowano dla tego samego zakresu frakcji z przedziału od 4 do 8 mm.

Tabela 1. Właściwości fizyczne badanych kruszyw

Table 1. Physical properties of the tested aggregates

| Rodzaj kruszywa | Nasiąkliwość [%] | Gęstość objętościowa [g/cm$^3$] | | Gęstość właściwa (porozymetryczna) [g/cm$^3$] | Porowatość (w zakresie 3 nm – 300 µm) [%] |
|---|---|---|---|---|---|
| | | hydrostatyczna | porozymetryczna | | |
| Kamienne – B | 1,64 | 2,50 | 2,55 | 2,61 | 2,20 |
| Keramzyt – K | 28,29 | 0,56 | 0,55 | 2,27 | 75,94 |
| Popiołoporyt – P | 22,49 | 1,31 | 1,37 | 2,55 | 46,30 |

Na bazie tych kruszyw wykonano trzy mieszanki betonowe, których skład recepturowy podano w tabeli nr 2. Z uwagi na wysoką nasiąkliwość kruszyw lekkich postanowiono testować receptury wprowadzając je w stanie pełnego nasycenia wodą – tak, aby możliwe było porównanie otrzymanych wyników z betonem referencyjnym na bazie kruszywa kamiennego.

Tabela 2. Receptury testowanych betonów w przeliczeniu na 1 m$^3$ oraz ich podst. właściwości

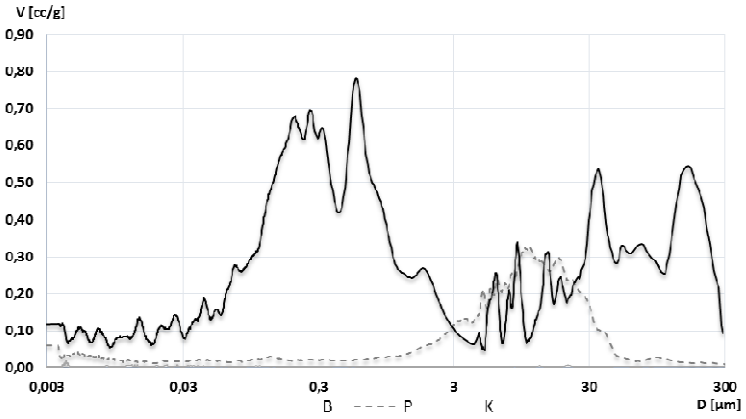
Table 2. The recipes of the tested concretes calculated for 1 m$^3$ and their basic properties

| Typ: | Kruszywo [kg/m$^3$] | Piasek [kg/m$^3$] | Cement [kg/m$^3$] | Woda [kg/m$^3$] | Gęstość objętościowa [g/cm$^3$] | | Porowatość [%] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | bezpośrednia | porozymetryczna | |
| B/B | 1312,73 | 469,53 | 391,27 | 215,20 | 2,27 | 2,31 | 10,90 |
| B/K | 338,38 | 486,87 | 405,73 | 223,15 | 1,18 | 1,20 | 47,80 |
| B/P | 844,55 | 471,10 | 392,58 | 215,92 | 1,52 | 1,61 | 35,43 |

W mieszankach wykorzystano kruszywa grube frakcji 4-8 mm. Wszystkie receptury charakteryzowały się stałym współczynnikiem w/c równym 0,55. Przyjęto także stałą proporcję ilości piasku do cementu wynoszącą 1,2. W żadnej mieszance nie zastosowano jakichkolwiek domieszek. Niewielkie rozbieżności w ilości poszczególnych składników zaprawy wynikają z przeliczenia składników do rzeczywistej uzyskanej objętości projektowanego betonu. W przypadku każdego z testowanych betonów wykonano po sześć próbek płytkowych o wymiarach 14 x 16 x 4 cm, niezbędnych do badania parametrów cieplnych oraz po 30 próbek sześciennych 10 x 10 x 10 cm do testów wytrzymałościowych. Próbki przez pierwsze 28 dni dojrzewania przechowywano w komorze klimatycznej o wilgotności powyżej 90 %, następnie składowano je w laboratoryjnych warunkach powietrzno-suchych.

## 3. Wyniki badań

W pierwszej kolejności wykonano badania porozymetryczne ziaren testowanych kruszyw. Dobór próbki badawczej polegał na wyselekcjonowaniu po cztery ziarna kruszywa o średnicach odpowiednio 4, 5, 6 oraz 8 mm. Wykresy logarytmiczno-różniczkowe rozkładu porów dla poszczególnych kruszyw przedstawiono na rys. 1. W celu weryfikacji otrzymanych wyników doświadczenie przeprowadzono dwukrotnie dla wszystkich rodzajów kruszyw.




Rys. 1. Wykres logarytmiczno-różniczkowy rozkładu porów w testowanych kruszywach

Fig. 1. Log-differential graph distribution of air voids in the tested aggregates

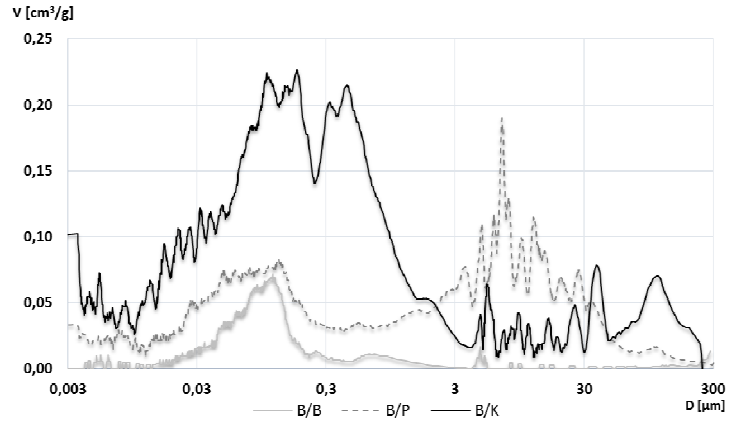
Najwyższe rozkłady porów w strukturze kruszyw zaobserwowano dla keramzytu. Wyraźne są tutaj dwa dominujące obszary makroporów: od 0,05 do 3 µm (z ekstremami przy średnicach 0,27 oraz 0,60 µm) oraz od 30 do 270 µm (z ekstremami przy średnicach 36 oraz 168 µm). Kruszywo popiołoporytowe z kolei posiada jeden dominujący obszar porów z przedziału od ok. 3 do 30 µm. Badanie użytego kruszywa kamiennego nie wykazało w cały ocenianym zakresie wyraźnych obszarów porowatej struktury, dzięki czemu doskonale nadaje się ono do wykorzystania jako kruszywo referencyjne o wysokiej szczelności. Tabela 3 zawiera podstawową charakterystykę porowatości trzech analizowanych kruszyw.

Tabela 3. Charakterystyka porowatości badanych kruszyw

Table 3. The porosity characteristics of the tested aggregates

| Charakterystyka | Keramzyt K | Popiołoporyt P | Kamienne B |
|---|---|---|---|
| Całkowita powierzchnia właściwa [$m^2/g$] | 54,253 | 13,234 | 0,902 |
| Krętność porów [-] | 1,350 | 1,731 | 2,217 |
| Przenikliwość [$nm^2$] | 0,026 | 0,014 | 0,001 |
| Średnia objętość porów [cc/g] | 1,202 | 0,307 | 0,007 |
| Średnia powierzchnia właściwa [$m^2/g$] | 8,471 | 0,493 | 0,085 |

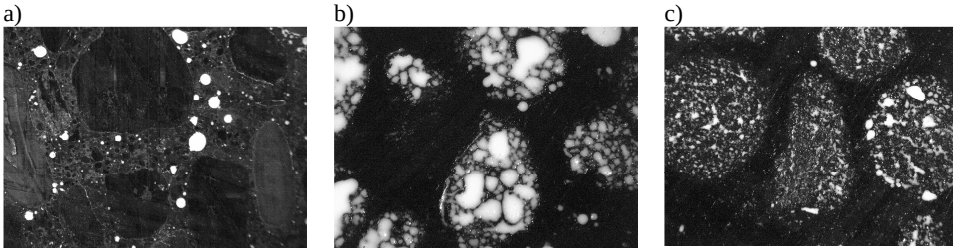
Rys. 2 przedstawia rozkład porów powietrznych dla betonów wykonanych ma bazie testowanych kruszyw. Z uwagi na wysoką szczelność kruszywa kamiennego zarejestrowane w próbkach B/B pory z przedziału 0,03 do 0,3 μm związane są z matrycą cementową. Podobny rozkład w tym samym obszarze zaobserwowano w przypadku próbek B/P, w których dodatkowo stwierdza się duży udział porów, lokujących się w przedziale od 3 do 30 μm, co dokładnie pokrywa się z wykresem rozkładu porów dla samego popiołoporytu. Jednoznacznie najbardziej rozbudowanym rozkładem porów charakteryzuje się beton B/K. Także w nim dominują pory z tych samych zakresów, jak w przypadku czystego keramzytu. Natomiast sama matryca cementowa wyraźnie zwiększa porowatość w zakresie najdrobniejszych porów, poniżej 30 nm.




Rys. 2. Wykres logarytmiczno-różniczkowy rozkładu porów w testowanych betonach

Fig. 2. Log-differential graph distribution of air voids in the tested concretes

Na rysunku 3 przedstawiono przekroje przez próbki poszczególnych betonów z porami wypełnionymi pastą cynkową.

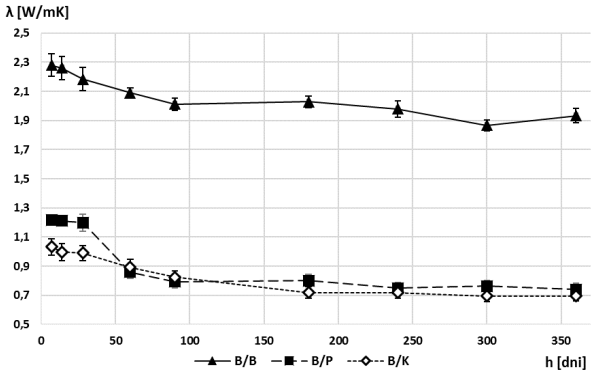



Rys. 3. Przekroje przez próbki betonów na bazie: a) kruszywa kamiennego b) keramzytu c) popiołoporytu (3-krotne powiększenie)

Fig. 3. Cross-sections of concrete samples based on: a) normal aggregate b) leca c) lytag (3-fold magnification)

W zastosowanym powiększeniu na rysunku a) widoczne są wyłącznie pory znajdujące się w matrycy cementowej, kruszywo jest szczelne. Próbka b) na bazie karamzytu cechuje się wyraźną obecnością dużych porów otoczonych licznymi małymi porami. Natomiast próbka c) charakteryzuje się licznie występującymi niewielkimi porami o zbliżonej średnicy.

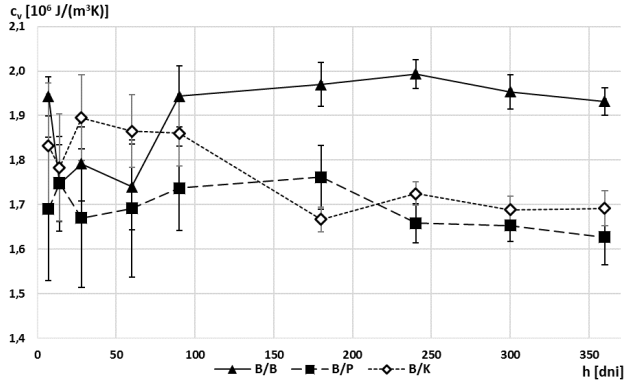
Na rysunku 4 przedstawiono wyniki badań współczynnika przewodzenia ciepła $\lambda$ testowanych próbek.




Rys. 4. Współczynniki przewodzenia $\lambda$ zarejestrowane w trakcie rocznego dojrzewania betonów

Fig. 4. Thermal conductivity coefficient $\lambda$ recorded during the first year of concretes curing

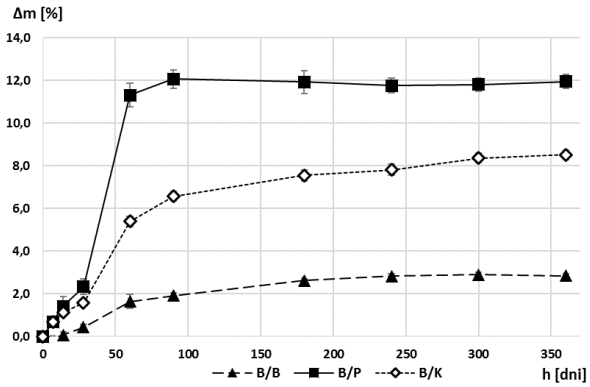
Wyraźnie widoczny jest wpływ porowatej struktury kruszywa na współczynnik $\lambda$. Betony na bazie kruszyw lekkich charakteryzowały się 2-krotnie niższą wartością tego parametru. Równocześnie różnice między ich współczynnikami $\lambda$ były niewielkie. Wynikałoby z tego, że na przewodzenie ciepła w bardziej znaczącym stopniu wpływają pory z przedziału 3 do 30 μm, aniżeli pory mniejsze od 3 μm, występujące w dużej ilości w keramzytobetonie.




Rys. 5. Objętościowe ciepło właściwe $c_v$ rejestrowane w trakcie rocznego dojrzewania betonów

Fig. 5. Volumetric specific heat $c_v$ recorded during the first year of concretes curing

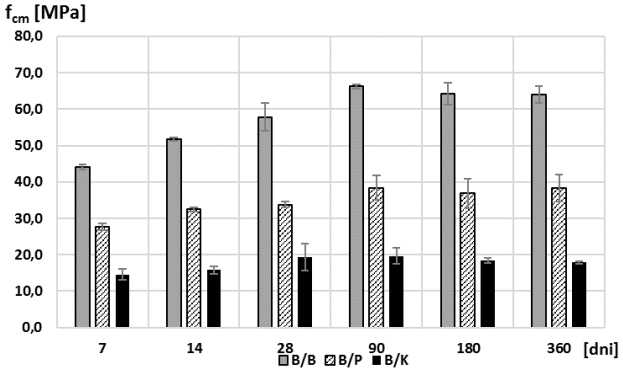
Porowatość kruszywa wywiera także wpływ na ciepło właściwe badanych betonów, co ilustruje rysunek 5. Oddziaływanie jest bezdyskusyjne, ale bardzo zróżnicowane, w zależności od etapu, na jakim znajdują się dojrzewające i wysychające próbki. Po okresie roku ciepło właściwe zostało obniżone w stosunku do betonu zwykłego odpowiednio o 14,2 % dla keramzytobetonu oraz o 18,8 % dla popiołoporytobetonu. Należy także zwrócić uwagę, że największe wahania ciepła właściwego $c_v$ w okresie pierwszych 28 dni dojrzewania betonów występowały w próbkach betonu zwykłego i betonu na bazie keramzytu. Z kolei beton na bazie popiołoporytu charakteryzował się najbardziej równomiernym przebiegiem czasowej zmienności parametru $c_v$. Ma to związek przede wszystkim ze zróżnicowanym tempem procesu wysychania poszczególnych betonów (rys. 6).




Rys. 6. Względny ubytek masy *Δm* rejestrowany w trakcie pierwszego roku dojrzewania betonów

Fig. 6. Relative mass loss *Δm* recorded during the first year of concretes curing

Porowatość kruszywa zróżnicowała istotnie wytrzymałość betonów na ściskanie (rys. 7). Po 28 dniach dojrzewania beton na bazie popiołoporytu miał o 42 % niższą wytrzymałość średnią, a beton na bazie keramzytu o 66 %.

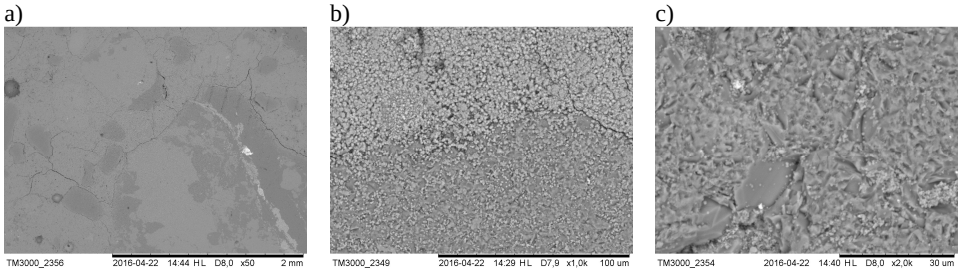



Rys. 7. Wytrzymałości na ściskanie $f_{cm}$ w trakcie pierwszego roku dojrzewania betonu

Fig. 7. Compressive strength $f_{cm}$ recorded during the first year of concretes curing

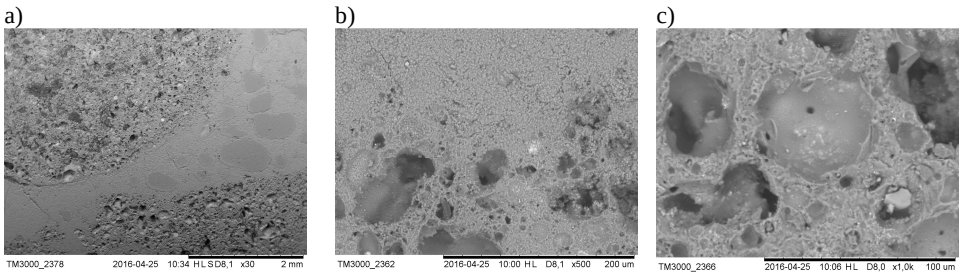
Na rysunkach 8-10 przedstawiono zdjęcia SEM przekrojów przez badane próbki betonów.

Pokazano po trzy zdjęcia ilustrujące wygląd przekroju próbek (rysunki a), strefę kontaktową między badanym kruszywem a matrycą cementową (rysunki b) oraz powiększenie struktury samego kruszywa (rysunki c). Próbki na bazie kruszywa kamiennego charakteryzują się jednorodną strukturą, bez wyraźnych porów powietrznych. Uwidacznia się natomiast strefa kontaktu między ziarnem



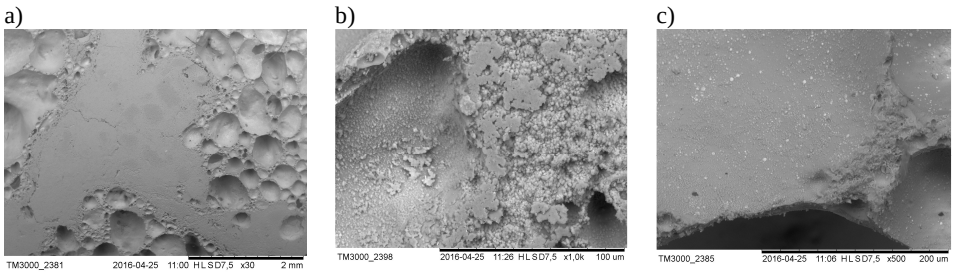

Rys. 8. Zdjęcia SEM betonu B\B: a) przekrój x50 b) strefa kontaktowa x1,0k c) kruszywo x2,0k

Fig. 8. SEM photos of B\B concrete: a) cross-section x50 b) contact zone x1,0k c) aggregate x2,0k




Rys. 9. Zdjęcia SEM betonu B\P: a) przekrój x30 b) strefa kontaktowa x500 c) kruszywo x1,0k

Fig. 9. SEM photos of B\P concrete: a) cross-section x30 b) contact zone x500 c) aggregate x1,0k




Rys. 10. Zdjęcia SEM betonu B\K: a) przekrój x30 b) strefa kontaktowa x1,0k c) kruszywo x500

Fig. 10. SEM photos of B\K concrete: a) cross-section x30 b) contact zone x1,0k c) aggregate x500

a matrycą cementową. W próbkach B\P oraz B\K strefa kontaktu jest trudniejsza do dostrzeżenia. Zaczyn cementowy wyraźnie spenetrował otwarte pory w strukturze kruszyw lekkich, przez co trudniej odróżnić ziarno kruszywa od zaczynu.

Analizując samą strukturę kruszywa warto zwrócić uwagę na bardzo zwartą budowę kruszywa kamiennego, w którym nie obserwuje się występowania porów powietrznych, nawet przy dużym powiększeniu. W popiołoporycie natomiast wyraźnie widoczne są pory wielkości od 5 do 50 μm, co potwierdza wyniki z badań porozymetrii rtęciowej. Kruszywo keramzytowe natomiast zbudowane jest z bardzo dużych porów o średnicy przekraczającej znacznie 50 μ, ale sam spiek charakteryzuje się bardzo zwartą strukturą.

## 4. Wnioski

Analizowane kruszywa oraz wykonane na ich bazie betony charakteryzowały się bardzo dużą różnorodnością rozkładów porów powietrznych otrzymanych w rtęciowych badaniach porozymetrycznych. Odmienna struktura porowatości w odmienny sposób przełożyła się na podstawowe właściwości trzech grup testowanych betonów.

Wykazano, że użycie lekkich kruszyw może przyczynić się do znaczącego, bo ponad dwukrotnego obniżenia współczynnika przewodzenia ciepła $\lambda$ w stosunku do betonów zwykłych. Wzajemne relacje uwidoczniono na rys. 4. Przykładowo po 360 dniach $\lambda_{B/B}/\lambda_{B/P}$ = 2,61; $\lambda_{B/B}/\lambda_{B/K}$ = 2,78. Wprawdzie także ciepło właściwe betonów lekkich zostało obniżone o 14÷18 %, ale należy podkreślić, że i tak otrzymane wartości $c_v$ były mimo wszystko dość wysokie, co pozwala zagwarantować przegrodom nie tylko dobrą izolacyjność cieplną, ale także stosunkowo dobrą akumulacyjność cieplną.

Jak należało się spodziewać kruszywa porowate znacznie osłabiły strukturę otrzymanych betonów (patrz rys. 7). Wytrzymałość na ściskanie po 28 dniach była zredukowana odpowiednio o 42 % w przypadku betonu na bazie popiołoporytu i o 66 % w przypadku betonu z keramzytem.

Porowatość kruszyw miała także wyraźny wpływ na zróżnicowane tempo wysychania poszczególnych betonów. Najszybciej proces przebiegał w betonie popiołoporytowym, a intensywne zmiany masy zachodziły w okresie około 3 miesięcy. Natomiast beton na bazie kruszywa kamiennego potrzebował pół roku do względnego ustabilizowania się masy badanych próbek, a w przypadku keramzytobetonu proces wysychania wygasał po upływie niemal rocznego okresu przechowywania próbek.

Badania lekkich kompozytów cementowych zrealizowano w ramach projektu badawczego nr 2014/13/N/ST8/00091 finansowanego przez Narodowe Centrum Nauki.

## Literatura

[1] L. Domagała, „Wpływ poziomu wstępnego nawilżenia kruszywa popiołoporytowego na mrozoodporność konstrukcyjnych betonów lekkich", Przegląd Budowlany, tom 85, nr 5, pp. 18-21, 2014.

[2] W. Kozioł, A. Ciepliński, Ł. Machniak i A. Borcz, „Kruszywa w budownictwie. Cz. 1. Kruszywa naturalne", Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, tom 4, pp. 98-100, 2015.

[3] W. Kozioł, A. Ciepliński, Ł. Machniak i A. Borcz, „Kruszywa w budownictwie. Cz. 2. Kruszywa alternatywne", Nowoczesne Budownictwo Inżynieryjne, tom 5, pp. 35-40, 2015.

[4] T. Rucińska, O. Chańko i A. Nowicka, „Wpływ rodzaju cementu i kruszywa drobnoziarnistego na właściwości zapraw", Materiały Budowlane, tom 12, pp. 80-82, 2015.

[5] P. Smarzewski i D. Barnat-Hunek, „Mechaniczne i mikrostrukturalne właściwości betonu wysokowartościowego z dodatkiem żużla paleniskowego", Izolacje, tom 20, nr 10, pp. 26-32, 2015.

[6] A. Ślosarczyk, T. Kantel, M. Walaszkowski i P. Zasada, „Physical and mechanical characterization of structural lightweight concrete with synthetic aloxite additive", Composites Theory and Practice, tom 15, nr 4, pp. 209-213, 2015.

## AGGREGATES AS THE SCHAPING FACTOR OF THERMAL PARAMETERS OF UNMODIFIED CEMENT MATRIX

**S u m m a r y**

The paper presents the impact of aggregate on the thermal properties of concrete composites with non-modified cement matrix. Three types of aggregates were tested: normal aggregate of high tightness and two lightweight aggregates: leca and lytag. Mercury porosimetry tests were conducted on aggregates, as well as on the concretes made on their basis. Concrete mixes were characterized by an unmodified cement matrix which enabled to compare the diverse properties of concretes made with different aggregates.

Two types of samples were prepared in this study: plates samples for the thermal tests and cubic samples necessary for the examination of the compressive strength. The samples were kept in climate chamber for the first 28 days in high humidity atmosphere, subsequently were put in laboratory air-dry conditions. Thermal parameters of the concretes were tested during the first year of curing at specified time intervals. Likewise compressive strength tests were conducted after 7, 14, 28 days and 3, 6 and 12 months of concrete curing.

In the manuscript a high correlation was observed between the porosity of aggregates and the thermal conductivity and specific heat. The structure of the aggregate had a considerable impact on the pace of concretes drying. The association between the porosity and compressive strength was also presented. The paper also shows the SEM images of the cross-sections of the tested concretes.

**Keywords:** leca, lytag, normal aggregate, thermal conductivity, heat capacity, mercury porosimetry, SEM tests

DOI:10.7862/rb.2016.190

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 105-112

**Magdalena GRUDZIŃSKA**[1]

# DOBÓR OSZKLENIA W PASYWNYCH SYSTEMACH SZKLARNIOWYCH NA PRZYKŁADZIE OSZKLONEGO BALKONU

Artykuł przedstawia wpływ rodzaju oszkleń zastosowanych do obudowy zewnętrznego balkonu na bilans energetyczny przykładowego mieszkania w budynku wielorodzinnym. Analizy obejmują całoroczny cykl użytkowania obiektu, a wyniki pozwalają na ocenę skuteczności proponowanych rozwiązań w sezonie grzewczym i okresie letnim. Badania przeprowadzono przy pomocy dynamicznych symulacji w programie komputerowym opartym na metodzie objętości kontrolnych, wykorzystując dane klimatyczne zawarte w Typowym Roku Meteorologicznym dla Warszawy. Zapotrzebowanie na energię wyznaczono dla różnych zestawów oszkleń balkonu i porównano z bazową wersją mieszkania z balkonem otwartym. W przedstawionym przykładzie system szklarniowy pozwolił zmniejszyć zapotrzebowanie na ciepło średnio o 31%, a najlepszym rozwiązaniem okazało się oszklenie o największym stosunku przepuszczalności promieniowania słonecznego do współczynnika przenikania ciepła. Pasywne pozyskiwanie energii słonecznej może powodować przegrzewanie pomieszczeń w ciągu lata. Mimo wzrostu zapotrzebowania na energię chłodniczą, całkowite potrzeby energetyczne w mieszkaniu były mniejsze niż przed wprowadzeniem systemu szklarniowego średnio o 7%. Dzięki naturalnemu wietrzeniu i stosowaniu zasłon można było ograniczyć temperaturę wewnętrzną do akceptowalnego poziomu bez konieczności aktywnego chłodzenia. Przedstawione wyniki świadczą o pozytywnym potencjale przedstawionych rozwiązań, ale wskazują też na konieczność świadomego projektowania systemów pasywnych z uwzględnieniem całorocznego cyklu użytkowania budynków.

**Słowa kluczowe:** zapotrzebowanie na energię, efektywność systemów pasywnych, promieniowanie słoneczne, dynamiczne symulacje komputerowe

## 1. Wprowadzenie

Systemy szklarniowe należą do pasywnych systemów wykorzystania odnawialnej energii promieniowania słonecznego. Badania nad możliwością wykorzystania oszklonych przestrzeni w celu zmniejszenia zapotrzebowania na energię rozpoczęto w latach 80. i 90. ubiegłego wieku, na fali zainteresowania archi-

[1] Magdalena Grudzińska, Politechnika Lubelska, Katedra Budownictwa Ogólnego, ul. Nadbystrzycka 40, 20-618 Lublin; tel. 815384448; m.grudzinska@pollub.pl

tekturą słoneczną i możliwościami zmniejszenia energochłonności budynków [1, 2]. Prace badawcze koncentrowały się głównie na opracowaniu modeli matematycznych wymiany ciepła oraz analizie czynników wpływających na efektywność energetyczną systemu.

Skuteczność pozyskiwania energii w systemach szklarniowych zależy przede wszystkim od zdolności pochłaniania promieniowania słonecznego przez ich obudowę, geometrii szklarni i powierzchni oszklenia. Według danych zaczerpniętych z literatury, systemy szklarniowe pozwalają ograniczyć zapotrzebowanie na ciepło w przyległym pomieszczeniu w zakresie od 10% do 50% [3 – 6]. Duże zróżnicowanie wyników jest skutkiem różnorodnych założeń badawczych dotyczących lokalizacji, kształtu czy właściwości izolacyjnych i optycznych obudowy obiektów.

Systemy szklarniowe zyskują coraz większą popularność również w Polsce, przede wszystkim ze względu na prostotę wykonania, niski koszt i atrakcyjność architektoniczną. Projektowanie przestrzeni słonecznych rzadko jest jednak poprzedzone szczegółową analizą energetyczną potencjalnych korzyści i problemów, jakie może powodować to rozwiązanie. Brakuje również zaleceń dotyczących doboru elementów składowych systemu na wstępnym etapie projektowania, pozwalających w sposób uproszczony porównać różnorodne komponenty dostępne na rynku.

Niniejszy artykuł przedstawia wpływ rodzaju oszkleń zastosowanych do obudowy zewnętrznego balkonu na bilans energetyczny przykładowego mieszkania w budynku wielorodzinnym. Analizy obejmują całoroczny cykl użytkowania obiektu, a wyniki pozwalają na ocenę efektywności proponowanych rozwiązań w sezonie grzewczym i okresie letnim.

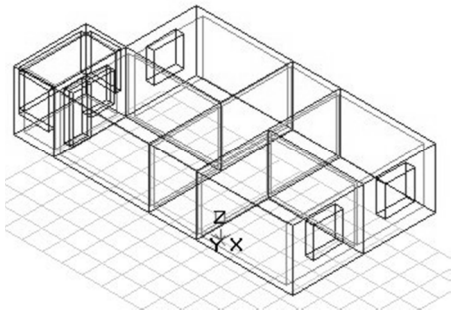
## 2. Metodyka analiz

Ocenę efektywności energetycznej mieszkania z oszklonym balkonem przeprowadzono przy pomocy dynamicznych symulacji w programie komputerowym BSim opartym na metodzie objętości kontrolnych [7]. Jako dane klimatyczne wykorzystano dane reprezentujące Typowy Rok Meteorologiczny dla Warszawy, opracowany na potrzeby certyfikacji energetycznej budynków [8].

Przykładowe mieszkanie ma powierzchnię około 74 m² i zlokalizowane jest w środkowej części budynku. Jedno z pomieszczeń sąsiaduje z balkonem o powierzchni około 5,4 $m^2$, skierowanym na południe. W ścianie pomiędzy pokojem a balkonem umieszczono okno o wymiarach 1,20 x 1,50 m i drzwi balkonowe 0,9 x 2,35 m (rys. 1). Powierzchnię okien w ścianach zewnętrznych (1,50 x 1,50 m) dobrano ze względu na wymagania dotyczące minimalnego oświetlenia pomieszczeń światłem dziennym.

Współczynnik przenikania ciepła ścian zewnętrznych wynosi 0,24 W/m²K, a współczynnik przenikania ciepła okien – 1,20 W/m²K. Wartości te spełniają wymagania obowiązujące w Polsce dla budynków nowoprojektowanych powsta-

jących w latach 2013 – 2016. W mieszkaniu założono bytowe zyski wewnętrzne na poziomie 7,1 W/m² oraz wymianę powietrza wynoszącą 0,5 1/h, co wg krajowych danych można przyjąć jako typowe warunki w tradycyjnych budynkach mieszkalnych [9].




Rys. 1. Schemat mieszkania w programie symulacyjnym BSim

Fig. 1. The outline of the apartment in BSim simulation program

Balkon ma obudowę pełną do wysokości 1,0 m o współczynniku przenikania ciepła 0,30 W/m$^2$K, powyżej jest on oszklony na trzech ścianach zestawami szybowymi o dość wysokiej izolacyjności termicznej. Badania własne wykazały, że taka konfiguracja obudowy jest korzystna ze względu na ograniczenie przegrzewania pomieszczenia sąsiedniego w ciągu lata [10]. W analizach przyjęto oszklenia dwuszybowe, ze szkła zwykłego lub z naniesionymi powłokami spektralnie selektywnymi, dzięki czemu uzyskano zestawy szyb o zróżnicowanych cechach cieplnych i optycznych (tabela 1). Zwiększeniu izolacyjności termicznej zestawów szyb towarzyszy spadek przepuszczalności promieniowania słonecznego, będący efektem zastosowania powłok ograniczających transmisyjność w określonym zakresie widmowym. Proporcje obu parametrów nie są jednakowe – największy stosunek przepuszczalności do izolacyjności charakteryzuje zestaw nr 2.

Tabela 1. Właściwości zestawów oszkleń, na podstawie [11]

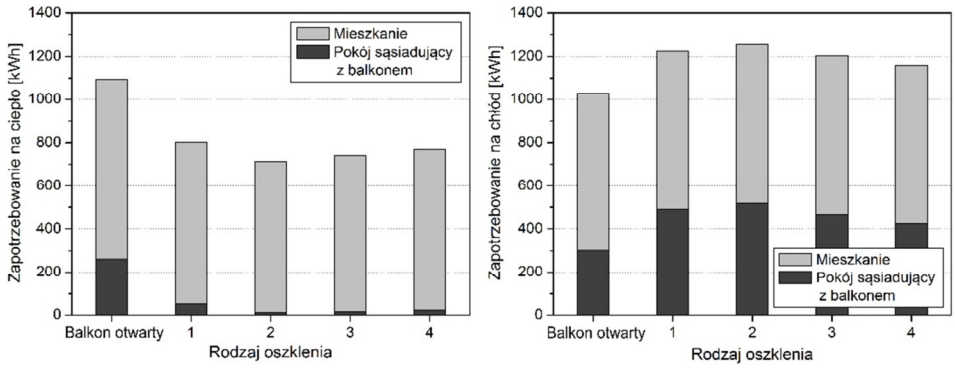
Table 1. Glazing properties, based on [11]

| **Nr zestawu** | **Liczba szyb** | **Powłoka spektralnie selektywna na szybie wewnętrznej** | **Współczynnik przenikania ciepła oszklenia $U_g$ [W/m$^2$K]** | **Całkowita przepuszczalność energii słonecznej g [-]** | **g/$U_g$ [m$^2$K/W]** |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | – | 2,7 | 0,80 | 0,30 |
| 2 | 2 | + | 1,4 | 0,74 | 0,53 |
| 3 | 2 | + | 1,3 | 0,63 | 0,48 |
| 4 | 2 | + | 1,2 | 0,53 | 0,44 |

Zabudowany balkon jest strefą nieogrzewaną, a pomieszczenia mieszkalne podczas sezonu grzewczego są ogrzewane do temperatury +20°C. W okresie letnim do oceny funkcjonowania systemu przyjęto zapotrzebowanie na energię chłodniczą konieczną do utrzymania w pomieszczeniach mieszkalnych temperatury nie wyższej niż +26°C. Mimo że mieszkania w Polsce rzadko są klimatyzowane, taki sposób oceny jest stosowany w różnych pracach badawczych [12, 13] i pozwala na przejrzyste porównanie efektywności systemów pasywnych. Aby sprawdzić warunki panujące w mieszkaniu w ciągu lata bliższe rzeczywistemu sposobowi użytkowania, przyjęto że nadmiar ciepła może być usuwany alternatywnie poprzez wietrzenie pomieszczeń. W obu wersjach założono, że okna mieszkania i balkonu mogą być zasłaniane zasłonami o przepuszczalności promieniowania wynoszącej 50%, jeżeli temperatura wewnętrzna przekroczy 24ºC lub natężenie promieniowania słonecznego transmitowanego przez oszklenie będzie większe niż 150 W/m$^2$.

## 3. Wyniki symulacji

Zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu wyznaczono dla kolejnych zestawów oszkleń balkonu przedstawionych w tabeli 1, a wyniki porównano z bazową wersją mieszkania z balkonem otwartym (rys. 2).




Rys. 2. Zapotrzebowanie na energię w mieszkaniu

Fig. 2. Energy demand in the apartment

### 3.1. Zapotrzebowanie na ciepło

Zabudowa balkonu pozwoliła zmniejszyć zapotrzebowanie na ciepło w całym mieszkaniu od 27% do 35% (rys. 2). Zmiana zapotrzebowania na energię jest związana zarówno z izolacyjnością termiczną jak i transmisyjnością zestawu szyb. Najmniejsze zapotrzebowanie na ciepło uzyskano dla zestawu oszkleń nr 2, o największej proporcji przepuszczalności promieniowania słonecznego do współczynnika przenikania ciepła oszklenia.

W pomieszczeniu sąsiadującym z balkonem zyski energetyczne są znacznie większe, i sięgają od 80% do 96%. Tak wysoka efektywność systemu szklarniowego wynika z przyjętych założeń badawczych – przede wszystkim z faktu, że przegroda między pokojem a balkonem jest jedyną przegrodą zewnętrzną przez którą występują straty ciepła. Przyczyniają się do niej również wysoka izolacyjność termiczna przegród balkonu i samego budynku.

### 3.2. Zapotrzebowanie na chłód

Niekorzystnym efektem pasywnego pozyskiwania energii słonecznej jest wzrost temperatury w pomieszczeniach w okresie letnim, kiedy podaż promieniowania rośnie. Przekłada się to na wzrost zapotrzebowania na chłód, wynoszący od 13% do 22% w porównaniu z mieszkaniem z balkonem otwartym. Największy wzrost potrzeb chłodniczych zaobserwowano w pomieszczeniu przyległym do balkonu, gdzie wyniósł on od 40% do 72% (rys. 2). Tym razem większy stosunek $g/U_g$ jest czynnikiem niekorzystnym, powodującym wzrost temperatury wewnętrznej przy jednoczesnym ograniczeniu możliwości odprowadzenia ciepła przez obudowę. Należy też zauważyć, że w pokoju sąsiadującym z balkonem zapotrzebowanie na chłód przewyższa zapotrzebowanie na ciepło, co nie zdarza się w pozostałych pomieszczeniach ani w mieszkaniu z balkonem otwartym.

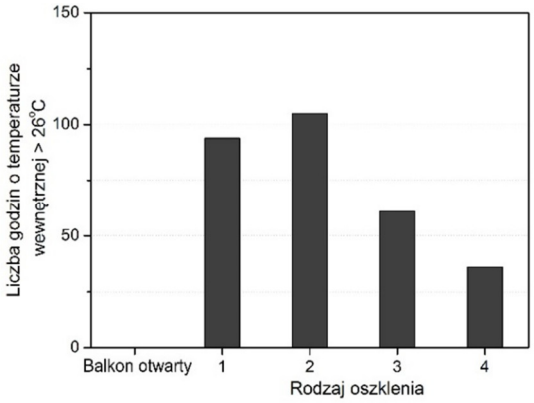
Mimo niekorzystnego wzrostu zapotrzebowania na energię chłodniczą, całkowite potrzeby energetyczne w mieszkaniu były mniejsze niż przed wprowadzeniem systemu szklarniowego (od 4% do 9%), co wynika z większego znaczenia redukcji zapotrzebowania na energię w sezonie grzewczym.

### 3.3. Możliwość pasywnego chłodzenia

Aktywne chłodzenie mechaniczne powoduje wzrost kosztów eksploatacji budynku, a także ma niekorzystny wpływ na środowisko naturalne przyczyniając się do zwiększenia emisji $CO_2$. Z tych względów sprawdzono możliwość obniżenia temperatury wewnętrznej innymi sposobami, określanymi w literaturze jako „pasywne" ze względu na to, że nie wiążą się ze zużyciem energii elektrycznej. Zalicza się do nich między innymi wietrzenie pomieszczeń oraz ograniczenie zysków słonecznych poprzez różnego rodzaju zasłony zewnętrzne lub wewnętrzne.

Wietrzenie rozpoczyna się jeżeli temperatura wewnętrzna przekracza 24ºC (otwarte może być 50% powierzchni okien i 100% powierzchni drzwi balkonowych). Założenia dotyczące zasłaniania okien, jako wspólne dla obu wersji obliczeń, opisano w punkcie 2. Jako miarę przegrzewania przyjęto ilość godzin o temperaturze wyższej niż 26ºC, która jest zalecana jako temperatura graniczna w budynkach bez wentylacji mechanicznej i chłodzenia [14]. Rozkład wyników i występowanie wartości maksymalnych jest podobne do zapotrzebowania na chłód, a średnia liczba godzin o temperaturze przewyższającej 26ºC w pokoju sąsiadującym z balkonem wynosi 74 (rys. 3). Stanowi to około 5% godzin

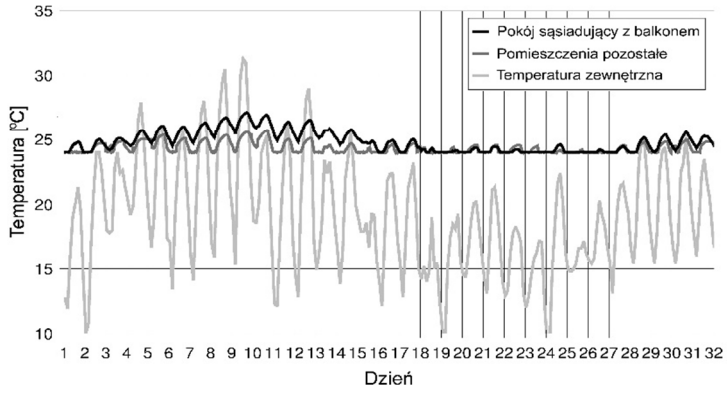
w lipcu i sierpniu. Najbardziej niekorzystne warunki występują w lipcu, i w tym miesiącu udział godzin o zbyt wysokiej temperaturze wynosi średnio 9%. Przepisy polskie nie podają dopuszczalnej długości okresu przegrzewania, jednak taki wynik należy uznać za wysoki (np. zalecenia brytyjskiej Chartered Institution of Building Services Engineers, CIBSE, mówią o 1% użytkowanych godzin jako poziomie akceptowalnym w budynkach nieklimatyzowanych [15]).




Rys. 3 Liczba godzin o temperaturze wewnętrznej powyżej 26ºC, pokój sąsiadujący z balkonem

Fig. 3. Number of hours with internal temperature above 26ºC, room adjacent to the balcony

Na korzyść analizowanego systemu przemawia fakt, że maksymalna temperatura operatywna w pokoju sąsiadującym z balkonem nie przekracza 28ºC. Ta temperatura jest podawana w literaturze jako graniczna w pokojach dziennych, ze względu na większe możliwości adaptacyjne użytkowników niż np. w sypialniach [15]. Należy też podkreślić że w pozostałych pomieszczeniach przegrzewanie nie występuje, a temperatura operatywna nie przekracza 25ºC (rys. 4).




Rys. 4. Temperatura operatywna w mieszkaniu, oszklenie 2, lipiec

Fig. 4. Operative temperature in the apartment, glazing 2, July

## 4. Podsumowanie

Zastosowane oszklenie znacząco wpływa na funkcjonowanie prezentowanego systemu szklarniowego i efektywność pozyskiwania energii słonecznej. Przy doborze oszklenia nie wystarczy kierować się jedynie izolacyjnością termiczną zestawu szyb, konieczne jest również uwzględnienie przepuszczalności promieniowania słonecznego. Jeżeli system szklarniowy ma zapewnić jak największe oszczędności energii w sezonie grzewczym, zalecanym rozwiązaniem będzie wybór oszklenia o największym stosunku $g/U_g$.

Pasywne pozyskiwanie energii słonecznej na ogół wiąże się ze zwiększonym ryzykiem przegrzewania pomieszczeń. W analizowanym przypadku, dzięki naturalnemu wietrzeniu i stosowaniu zasłon można było ograniczyć temperaturę wewnętrzną do akceptowalnego poziomu bez konieczności aktywnego chłodzenia. Należy jednak mieć na uwadze, że dane klimatyczne ujęte w Typowym Roku Meteorologicznym nie uwzględniają wzrostu temperatury zewnętrznej i nasłonecznienia, odczuwalnych w ciągu kilkunastu ostatnich lat [16]. Problem ten wymaga dalszych analiz, a przedstawione wyniki podkreślają konieczność projektowania systemów pasywnych z uwzględnieniem całorocznego cyklu użytkowania budynków.

### Literatura

[1] Balcomb J. D., Jones R. W., McFarland R. D., Wray W. O.: Passive Solar Heating Analysis. A Design Manual, ASHRAE, Atlanta 1984.

[2] Jones R. W., McFarland R. D.: The Sunspace Primer. A Guide for Passive Solar Heating, Van Nostrand Reinhold Company, New York 1984.

[3] Bataineh K.M., Fayez N.: Analysis of thermal performance of building attached sunspace. Energy and Buildings, vol. 43, 2011, pp. 1863-1868.

[4] Hilliaho K., Eerik Mäkitalo E., Lahdensivu J.: Energy saving potential of glazed space: sensitivity analysis, Energy and Buildings, vol. 99, 2015, pp. 87-97.

[5] Asdrubali F., Cotana F., Messineo A.: On the evaluation of solar greenhouse efficiency in building simulation during the heating period, Energies, vol. 5, 2012, pp. 1864-1880.

[6] Dawdo Cz., Sarosiek W., Rudczyk-Malijewska E.: Badania nad zmniejszeniem energochłonności eksploatacyjnej budynku poprzez zabudowę i termorenowację loggii, Wydawnictwa Politechniki Białostockiej, Białystok 1991.

[7] Wittchen K. B., Johnsen K., Grau K.: BSim user's guide, Danish Building Research Institute, Hørsholm 2004.

[8] Narowski P.: Dane klimatyczne do obliczeń energetycznych w budownictwie, Ciepłownictwo, Ogrzewnictwo, Wentylacja, vol. 11, 2006, pp: 22-27.

[9] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 3 czerwca 2014 roku w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku i lokalu mieszkalnego, Dz. U. z 2014, poz. 888.

[10] Grudzińska M.: Oszklone balkony jako systemy szklarniowe – wpływ powierzchni oszklenia na zyski energetyczne, Izolacje, nr 9, 2014, pp. 50-55.

[11] Calumen II v. 1.3.1., Saint Gobain Glass.

[12] Kisilewicz T.: Wpływ izolacyjnych, dynamicznych i spektralnych właściwości przegród na bilans cieplny budynków energooszczędnych, Monografia nr 364, Seria Inżynieria Lądowa, Wydawnictwo PK, Kraków 2008.

[13] Persson M. L., Roos A., Wall M.: Influence of window size on the energy balance of low energy houses, Energy and Buildings, vol. 38, 2006, pp: 181-188.

[14] PN EN 15251:2012: Parametry wejściowe środowiska wewnętrznego dotyczące projektowania i oceny charakterystyki energetycznej budynków, obejmujące jakość powietrza wewnętrznego, środowisko cieplne, oświetlenie i akustykę.

[15] CIBSE Guide A: Environmental design, The Chartered Institution of Building Services Engineers, London 2015.

[16] Grudzińska M., Jakusik E.: The efficiency of a typical meteorological year and actual climatic data in the analysis of energy demand in buildings, Building Services Engineering Research and Technology, vol. 36, 2015, pp. 658-669. DOI: 10.1177/0143624415573454.

## CHOICE OF GLAZING IN PASSIVE GREENHOUSE SYSTEMS SUCH AS GLAZED BALCONIES

**S u m m a r y**

The paper examines the influence of glazing type used in enclosed balconies on the energy balance of a typical apartment in a multi-family building. Analyses include the whole-year functioning of the building, allowing to compare the effectivity of suggested solutions both during the heating and cooling season. Dynamic simulations were performed with the use of a computer program based on a control volume method for the climatic data included in the Typical Meteorological Year for Warsaw. Energy demand was calculated for different glazing types, and compared with the base case of an apartment with an open balcony. Taking into account heating demand, glazing with the highest proportion of total solar energy transmittance and thermal transmittance coefficient turned out to be the most beneficial. In the presented case, the glazed balcony helped to diminish heating demand on average by 31%. The adverse effect of a passive solar system may be overheating of rooms. Despite the increase of cooling demand, total energy needs in the apartment diminished by approximately 7%. Thanks to natural airing and solar shading, it was possible to lower internal temperature to the acceptable level without active cooling. The presented results show potential benefits connected with solar spaces, but also prove the necessity of thorough design of passive systems, taking into account the whole-year functioning.

**Keywords:** energy demand, efficiency of passive systems, solar radiation, dynamic computer simulations

DOI:10.7862/rb.2016.191

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 113-122

**Marian HOLUB**[1]
**Magdalena BALINTOVA**[2]
**Stefan DEMCAK**[3]
**Maria HURAKOVA**[4]

# CHARACTERIZATION OF NATURAL ZEOLITE AND DETERMINATION ITS ADSORPTION PROPERTIES

Pollution of water by toxic substances is one of the major reason concerning human health as well as the environmental quality. In terms of pollution, mining activities represent a serious threat. Countries of the middle Europe, where extraction of mineral resources takes place a long period, have to solve the problems of wastewater containing whole spectra of heavy metals, which are dangerous to the environment. Finding of the new and cheap ways of wastewater contaminated by heavy metals treatment can increase the quality of the environment in the affected localities and thus prevent adverse effects on fauna, flora or human beings. Sorption techniques belong to a cost effective methods that are able to effectively remove heavy metals. For the overall understanding of the sorption process, it is necessary to characterize and determine the properties of the used adsorbents. The paper deals with characterization of natural zeolite before and after sorption process under acidic conditions. The zeolite was characterized using Fourier transform infrared spectroscopy, X – ray diffraction, scanning electron microscopy and $N_2$ adsorption/desorption isotherms.

**Keywords:** zeolite, sorption, XRF, XRD, SEM, specific surface area

## 1. Introduction

The development of human society after 18$^{th}$ century is associated with metals. Technology of extraction and processing of heavy metals is essential for

[1] Marian Holub, Technical University of Kosice, Faculty of Civil Engineering, Institute of Environmental Engineering, Vysokoskolska 4, 04200 Kosice, Slovakia, +421556024154, marian.holub@tuke.sk

[2] Magdalena Balintova, Technical University of Kosice, Faculty of Civil Engineering, Institute of Environmental Engineering, Vysokoskolska 4, 04200 Kosice, Slovakia, magdalena.balintova@tuke.sk

[3] Stefan Demcak, Technical University of Kosice, Faculty of Civil Engineering, Institute of Environmental Engineering, Vysokoskolska 4, 04200 Kosice, Slovakia, stefan.demcak@tuke.sk

[4] Maria Hurakova, Slovak Academy of Science, Institute of Experimental Physics, Watsonova 47, 04001 Kosice, Slovakia, hurakova@saske.sk

many areas of industry. Naturally, the extraction, processing and cleaning of impurities give the metals not only a new form, but also cause their intensive distribution in the environment, which represents a huge threat.

Ion-exchange sorption is one of the basic process technologies of liquid waste, in which the fixing of metal cations in the suitable form for deposition in the storage site is ensured [1]. Finding of cheap and efficient materials from natural resources is therefore necessary.

Natural zeolites are hydrated aluminosilicate minerals of a porous structure with valuable physicochemical properties, such as cation exchange, molecular sieving, catalysis and sorption [2]. The sorption properties of the zeolites had been known for the decades. After the large – scale application of x-ray powder diffraction in the second half of $20^{th}$ century a huge reserves of zeolites began to appear and subsequently have been studied and utilized as adsorbents for the removal of heavy metals in many countries [3], [4] and [5].

The aim of this study was to investigate possibilities of application of Slovak natural zeolite for removal of heavy metal ions from aqueous solutions. In specific, Cu(II) was selected as a model ion due to common presence of this cation in the acid mine drainage. Zeolite was also characterized using different methods in order to determine the changes caused by adsorption/ion – exchange process.

## 2. Materials and methods

### 2.1. Zeolite samples preparation

In this study a natural non – modified zeolite from locality of Nizny Hrabovec (Slovakia) was used. The different fractions were prepared by milling of commercial product with granularity of 2.5 to 5 mm (Zeocem, a.s.; Bystre, Slovakia) by planetary mill (Desk – top planetary ball Miller SFM-1) at 290 rpm (tray rotating) and 580 rpm (grinding jars rotating) for 18 min. After that sieve analysis for the purpose of separation of different fractions was performed. Sieves were shaken in a mechanical shaker for 10 minutes to provide complete separation. The separated fraction of zeolite was washed in deionized water in order to eliminate eventually present dust. Samples were dried at 105 °C for 17 h and then allowed to cool in the desiccators before their using in experiments.

### 2.2. Apparatus and instrumentation

- A Colorimeter DR890 (HACH LANGE, Germany) with appropriate reagent was used to determine amount of dissolved Cu(II).
- The basic chemical composition of zeolite was investigated by X-ray fluorescence analysis (XRF) using SPECTRO iQ II (Ametek, Germany) with SDD silicon drift detector with resolution of 145 eV at 10 000 pulses.

- IR spectra were measured by Alpha FT-IR Spectrometer with ALPHA's Platinum ATR single reflection diamond ATR module (Bruker, Germany).
- Mineralogical analysis of the natural zeolite samples was carried out by X-Ray Diffraction (XRD) using diffractometer Bruker D2 Phaser (Bruker AXS, GmbH, Germany) in Bragg-Brentano geometry (configuration Theta-2Theta), using the 1.54060 Å CuKα radiation, Ni Kβ filters and scintillation detector at a voltage of 30 kV and 10 mA current. Scan conditions: recording time about 4.5 hours, a step size of 0.02° (2Θ) and step time of 5 s. The XRD patterns were processed using the software Diffrac.EVA v. 2.1. The ICDD PDF database (ICDD PDF – 2 Release 2009) was utilized for the phase identification.
- SEM (Tescan – VEGA3 LMU) with EDX analysis (Bruker, Germany) was used for determination of composition and structure of the zeolite surface.
- Specific surface area was estimated by low temperature gas adsorption using nitrogen gas (Quantachrome NOVA 1000e, USA).

### 2.3. Adsorbate solution preparation

Synthetic solutions of Cu(II) were prepared from $CuSO_4.5H_2O$ (A.R.). Working solutions were prepared by further dilution to the desired initial concentration (50 mg/L). The initial pH of each solution was adjusted to the required value (pH≈4) by adding 0.001M $H_2SO_4$. It should be noted that sulphate anions are not forming precipitates or complexes with copper cations at the test conditions and are considered to be inert.

### 2.4. Batch adsorption experiment

For the purpose of removal efficiency investigation and also preparation of zeolite sample with adsorbed cations, batch adsorption experiment was carried out. Zeolite (fraction below 0.063 mm) was mixed with single-component solutions containing 50 mg/L of Cu(II). Batch experiments were carried out at room temperature (23±0.2°C) in beakers, batch rate: 1 g of zeolite per 100 mL of solution. After 24 hours reaction time, sorbents were removed by filtration through a laboratory filter paper for qualitative analysis and residual concentration of copper was determined by colorimetric method. Used zeolite was separated and dried at 105 °C for 17 h and then allowed to cool in the desiccators before their further characterization.

### 2.5. Fixed – bed adsorption experiment

Fixed – bed column used in this study was made of Pyrex glass tube with the inner and outer diameters of 4.0 and 4.5 cm, respectively ended by coarse porosity fritted glass disc. A known quantity (50 g) of the zeolite (1 – 2 mm and 2 – 4 mm, respectively) was packed in the column to yield a bed height of 4 cm.

Solution containing copper of 50 mg/L flowed by gravity downward through the column at a filtration velocities of 0.3 and 1.3 mL/sec (for 1 – 2 mm and 2 – 4 mm fraction, respectively), controlled by a couple of valves. The effluents at the outlet of the column were collected at regular time intervals and the Cu(II) concentrations were measured using colorimetric method. All experiments were performed at room temperature (23±0.2°C).

## 3. Results

### 3.1. Characterization of natural zeolite

In order to determine the basic characteristics of natural zeolite and changes after the sorption process several measurements were carried out. The results from X-ray fluorescence (XRF) analysis, X-Ray Diffraction (XRD), Infrared spectroscopy (FTIR), scanning electron microscopy (SEM) and specific surface area (SSA) measurements are presented.

#### 3.1.1. XRF

XRF analysis was used to determine of chemical composition of zaolite samples. The chemical composition of the zeolite declared by the manufacturer (Zeocem, a.s.) and results from X-ray fluorescence analysis are listed in Table 1.

Table 1. Chemical composition of zeolite (declared data by manufacturer and results of XRF analysis)

Tabela 1. Skład chemiczny zeolitu (podawany przez producenta oraz wyniki analizy XRF)

| Constituent | $SiO_2$ | $Al_2O_3$ | CaO | $K_2O$ | $Fe_2O_3$ | MgO | $Na_2O$ | $TiO_2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Declared content (mass %) | 65.00 – 73.00 | 11.50 – 13.10 | 2.70 – 5.20 | 2.20 – 3.40 | 0.70 – 1.90 | 0.60 – 1.20 | 0.20 – 1.30 | 0.10 – 0.30 |
| XRF analysis (mass %) | 64.10 | 9.89 | 2.99 | 2.71 | 1.34 | 0.73 | - | 0.15 |

#### 3.1.2. XRD

Mineralogical analysis of the natural zeolite samples (before and after sorption) was carried out using X-Ray Diffraction. The results showed that the natural zeolite contained clinoptilolite in the majority, and small quantities of silicon oxides (cristobalite and quartz), feldspar and illite (see Fig. 1). From the pattern is also evident that the sorption does not affect the mineralogical structure; patterns are identical.

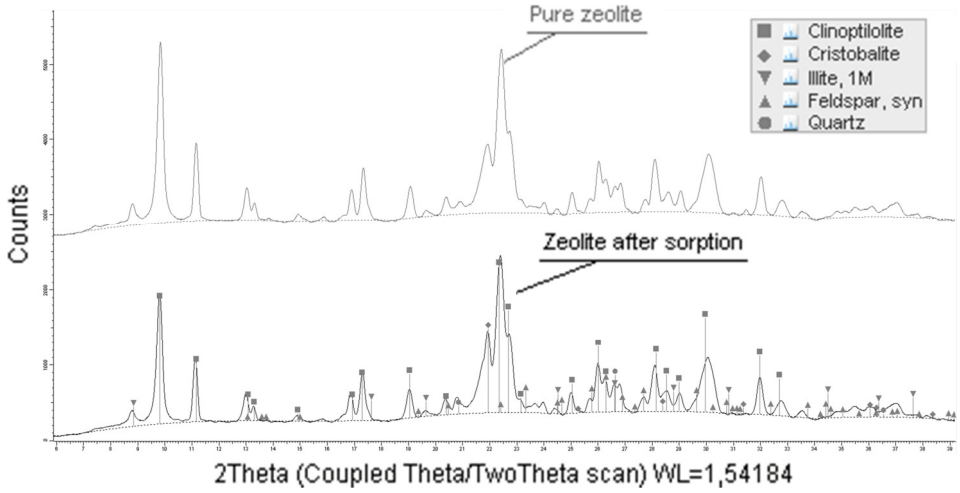



Fig. 1. X-ray diffraction analysis of zeolite

Rys. 1. Rentgenowska dyfrakcyjna analiza zeolitu

### 3.1.3. FTIR

The characterization of zeolites by FTIR technique is based on the presence of bands in three regions. A higher one corresponds to the OH stretching modes (3650 – 3450 $cm^{-1}$) with an additional band at 1620 – 1640 $cm^{-1}$ (Lewis sites).

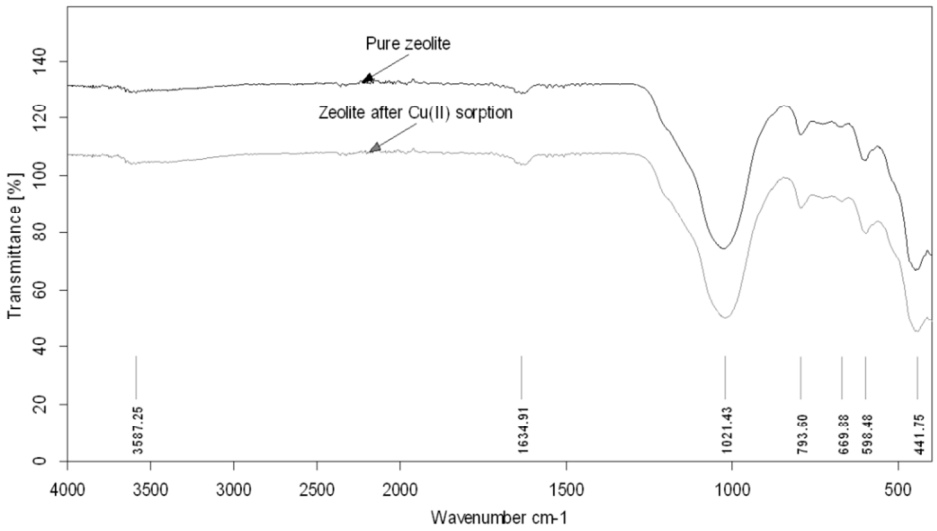



Fig. 2. Infrared spectra

Rys. 2. Spektrum podczerwieni

This region is assigned H-O-H bending of the water molecules (zeolitic water) in channels of the samples [6]. The middle zone (1200 – 900 $cm^{-1}$) is characterized by strong bands attributed basically to the $TO_4$ (T = Al, Si) stretching modes whereas the corresponding bending modes of the 3D covalent arrangement are observed below 700 $cm^{-1}$ [7].

As it is seen in Fig. 2, there is no difference between IR spectrum of pure zeolite and after sorption of copper thus there are not changes in chemical structure and also the precipitate is not present.

### 3.1.4. SEM

Characterization of structure and morphology of zeolite was observed by SEM with EDX. Fig. 3 represents the morphology of particulate substances of zeolite (left: pure zeolite; right: zeolite after sorption). As is shown in this figure, the structure is almost identical in both samples.

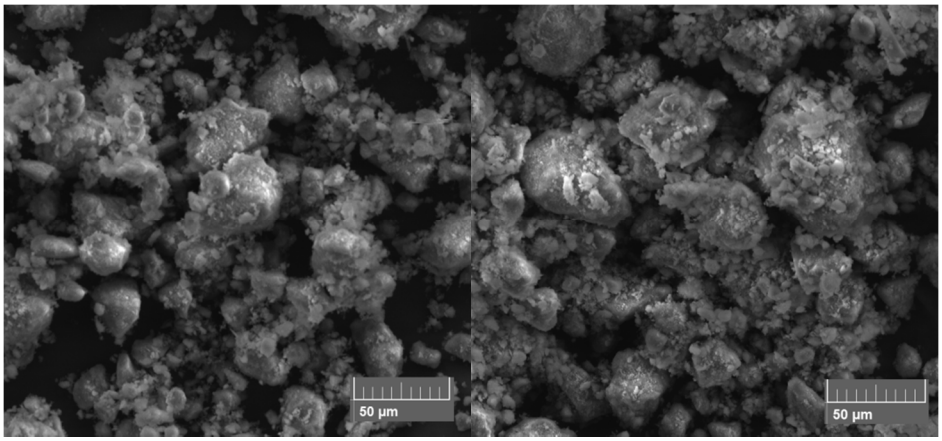



Fig. 3. Structure of zeolite (left: before sorption; right: after sorption)

Rys. 3. Struktura zeolitu (z lewej: przed sorpcją; po prawej: po sorpcji)

The presence of Cu(II) on the surface of zeolite after the sorption has been proved by energy dispersive microanalysis (see results in Table 2.) According to ion – exchange background of the process, it can be observed a little decrease in concentration of exchangeable cations (K, Mg, Ca) after the sorption process.

Table 2. Chemical composition of zeolite by SEM/EDX

Tabela 2. Skład chemiczny zeolitu - SEM/EDX

| Average ratio of elements in samples [%] | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| **Element** | **O** | **Si** | **K** | **Al** | **Mg** | **Fe** | **Ca** | **Cu** |
| Pure zeolite | 38.8 | 38.2 | 5.2 | 7.7 | 0.3 | 5.2 | 4.6 | - |
| Zeolite after sorption | 38.1 | 40.0 | 4.7 | 7.9 | 0.2 | 4.4 | 3.2 | 1.07 |

### 3.1.5. Specific surface area

One of the many properties used to characterize adsorbents is the specific surface area (SSA). SSA plays important role in adsorption process; however there are other mechanisms that can influence the progress of adsorption (e.g. ion-exchange abilities, complexation, chelation, etc.).

In order to evaluate the influence of grinding estimation of SSA of different zeolite fractions by physisorption of nitrogen gas at 77 K according to the BET method was carried out. Degassing of zeolite was carried out with respect of their thermal stability determined by thermal analyzer (Netzsch STA 449 F3, Germany). The results are presented in Table 3.

Table 3. Specific surface areas of different zeolite fractions

Tabela 3. Powierzchnia właściwa różnych frakcjach zeolitu

| | **2 – 4 mm** | **1 – 2 mm** | **below 0.063 mm** |
|---|---|---|---|
| **SSA ($m^2/g$)** | 24.97 | 27.61 | 28.35 |

As can be seen, the differences between fractions are minimal, in addition another measurement of the zeolite sample after the sorption process was also carried out. Despite after the 90 % efficiency of copper removal, the change in specific surface area was not observed. This facts show us an indication of the ion – exchange background of the process. From the shape of adsorption/desorption curves (Fig. 4) it can be said, that the zeolite exhibit microporous structure with the pore size predominantly under 1 nm.

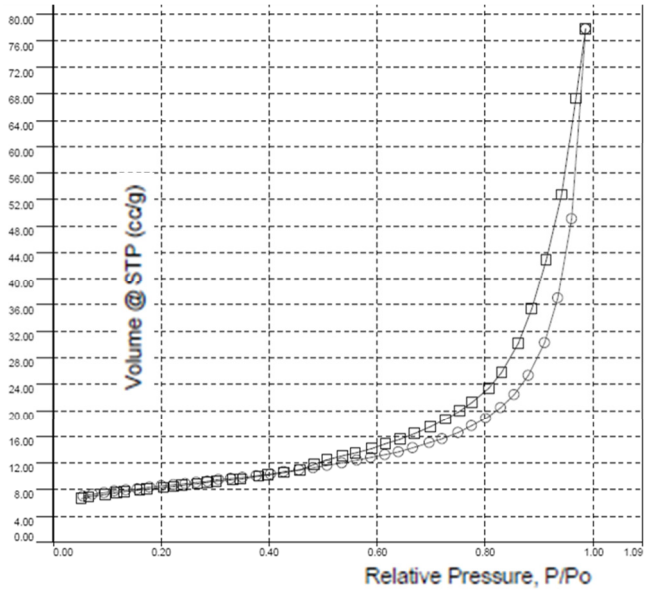



Fig. 4. Adsorption/desorption curves of zeolite (fraction under 0.063 mm)

Rys. 4. Adsorpcja/desorpcja zeolitu (frakcja poniżej 0,063 mm)

### 3.2. Batch experiment

Batch adsorption experiment was performed in order to evaluate sorption efficiency of zeolite in static conditions. The percentage adsorption (%) was calculated using the following equation:

$$\%\ Adsorption \quad = \frac{(C_0 - C_e)}{C_0}\ x\,100\,\% \tag{1}$$

where, $C_0$ is the initial concentration of copper ions (mg/L) and $C_e$, equilibrium concentration of copper ions (mg/L). Zeolite exhibit efficiency around 90 % after 24 h contact time with batch rate of 1g / 100 mL.

### 3.3. Fixed – bed column experiments

Adsorption of copper by zeolite is presented in the form of breakthrough curves (Figure 5). According to the results of previous experiments with 2 – 4 mm fraction, flow rate of 1.3 mL/sec is too high, since breakthrough occurs faster and with less sharpened boundaries. It was necessary to reduce the flow rate using the smaller fraction of zeolite which has proved as a successful approach (see Fig. 5).

Lower flow rate results in high residence times in the column. It is well known that, because of the relatively slow loading kinetics of zeolites, relatively

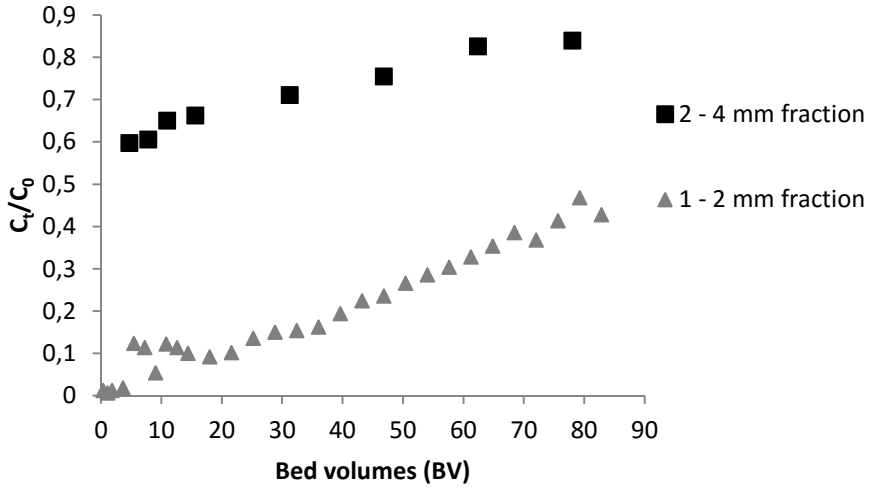



Fig. 5. Breakthrough curves of column experiments for Cu(II) at initial concentration of 50 mg/L

Rys. 5. Krzywe przebicia dla Cu (II) przy początkowym stężeniu 50 mg/l

long residence times are needed [8]. In addition it is well known that decreasing in particle size improves the performance of adsorption and ion exchange [9]. This improvement is due to the extension of surface area (see Table 3) and better access to easily removable exchangeable cations in the zeolite structure.

## 4. Conclusions

Natural zeolites are important low cost and wide available materials for water and wastewater treatment. Due to the nature of cation exchange, zeolites exhibit high performance in adsorption of different cations in aqueous solution.

In this study, the natural zeolite (clinoptilolite) from Slovakia (Nizny Hrabovec) was characterized using different methods. A batch and fixed – bed systems were used to describe the adsorption properties. The efficiency of Cu(II) sorption was at satisfactory level (90 % for the batch system and 60 % after 80 batch volumes in the dynamic conditions), in addition the competitive adsorption in the process of ion - exchange between copper and hydrogen cations was observed.

Overall, from the results of this study imply that the adsorption under acidic condition does not affect the structure of zeolite. As a result of ion – exchange only one change in chemical composition using by SEM/EDX was observed.

**Acknowledgement**

This work has been supported by the Slovak Grant Agency for Science (Grant No. 1/0563/15) and the project No. 26210120012 provided by the European Social Fund.

## Bibliography

[1] Foldesová M., Hudec P. Štúdium povrchových vlastností slovenského prírodného zeolitu – klinoptilolitu fyzikálnou adsorpciou dusíka. Petroleum & Coal , vol. 49, no 1, pp. 34-40, 2007.
[2] El-Kamash A.M. Evaluation of zeolite A for the sorptive removal of Cs+ and Sr2+ ions from aqueous solutions using batch and fixed bed column operations. Journal of. Hazardous Materials, vol. 151, issues 2 – 3, pp. 432–445, 2008.
[3] Baker H.M., Massadeh A.M., Younes H.A. Natural Jordanian zeolite: removal of heavy metal ions from water samples using column and batch method. Environmental Monitoring and Assessment. vol. 157, issues 1 – 4, pp. 319–330, 2009.
[4] Hamidpour M., Kalbasi M., Afyuni M., Shariatmadari H., Holm P.E., Hansen H.C.B. Sorption hysteresis of Cd(II) and Pb(II) on natural zeolite and bentonite. Journal of Hazardous Materials, vol. 181, issues 1 – 3, pp. 686–691, 2010.
[5] Wang S., Peng Y. Natural zeolites as effective adsorbents in water and wastewater treatment. Chemical Engineering Journal, vol. 156, issue 1, pp. 11–24, 2010.
[6] Zhao D., Zhou J., Liu N. Preparation and characterization of Mingguang palygorskite supported with silver and copper for antibacterial behavior. Applied Clay Science, vol. 33, pp. 161 – 170, 2006.
[7] Van der Marel H.W., Beutelspacher H. Atlas of Infrared Spectroscopy of Clay Minerals and their admixtures. Elsevier, USA, 1976.
[8] Burn P. Design and testing of natural/blended zeolite ion exchange columns at West Valley. AlChE Symp. Ser., vol. 83, pp. 66 – 72, 1987.
[9] Helfferich F. Ion Exchange. Dover Publications Inc., New York, 1995.

## CHARAKTERYSTYKA NATURALNYCH ZEOLITÓW ORAZ OKREŚLENIE ICH WŁAŚCIWOŚCI ADSORPCYJNYCH

**S t r e s z c z e n i e**

Zanieczyszczenie wód substancjami toksycznymi znacząco wpływa na zdrowie ludzkiego, a także jakość środowiska. Pod względem zanieczyszczenia, działalność górnicza stanowi poważne zagrożenie. Kraje środkowej Europy, gdzie wydobycie zasobów mineralnych występuje przez długi okres czasu, narasta problem ścieków zawierających całe spektrum metali ciężkich, które są niebezpieczne dla środowiska. Znalezienie nowych i tanich sposobów oczyszczania ścieków zanieczyszczonych metalami ciężkimi, może wpłynąć na poprawę jakości środowiska w dotkniętych zanieczyszczeniem miejscowościach, a tym samym zapobiec niekorzystnemu oddziaływaniu na faunę, florą oraz człowieka. Techniki sorpcyjne należą do efektywnych pod względem kosztów metod, które są w stanie skutecznie usunąć metale ciężkie. Dla ogólnego zrozumienia procesu sorpcji, konieczne jest scharakteryzowanie i określenia właściwości stosowanych adsorbentów. W pracy przedstawiono charakterystykę naturalnych zeolitów, przed i po procesie sorpcji w warunkach kwaśnych. Zeolit scharakteryzowano za pomocą spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera, X - ray dyfrakcji elektronowej mikroskopii skaningowej i izoterm $N_2$ adsorpcji/desorpcji.

**Słowa kluczowe:** zeolit, sorpcja, XRF, XRD, SEM, powierzchnia właściwa

DOI:10.7862/rb.2016.192

*Przesłano do redakcji: 15.09.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 123-130

**Marek JABŁOŃSKI**[1]
**Katarzyna KLEMM**[2]

# WYKORZYSTANIE SYMULACJI NUMERYCZNEJ DO WYZNACZANIA PARAMETRÓW PRZEPŁYWU POWIETRZA

W pracy przedstawiono procedurę wyznaczania podstawowych parametrów wpływających na profil prędkości wiatru tj. współczynnika szorstkości i prędkości tarciowej w oparciu o dane uzyskane z analiz symulacyjnych. W celu uchwycenia wpływu zabudowy na zmianę parametrów kształtujących profil prędkości wiatru przeprowadzono symulację numeryczną w oparciu o turbulencyjny model realizable k - ε. Analizę przeprowadzono dla prostego przypadku obiektu w kształcie walca o wymiarach ϕ=10 m i $h$=10 m zlokalizowanego w terenie otwartym o szorstkości podłoża $z_o$=0,02 m. Korzystając z uzyskanych danych określono średnie wielkości prędkości u i dyssypacji energii ε, na trzech analizowanych wysokościach (2, 12, 16 m), w odległości 0, 21, 42 i 63 m od wlotu. W pierwszym wariancie współczynnik szorstkości i prędkość tarciową wyznaczono korzystając z profilu logarytmicznego prędkości wiatru, przyjmując przemieszczenie płaszczyzny zerowej $z_d$ zgodnie ze wzorem zaproponowanym w pracy [1]. W drugim wariancie wielkości $u_x$ i $z_o$ określono przyjmując założenie, że wystąpił pomijalnie mały efekt turbulencji termicznej $Q_H$ = 4,7 W/m$^2$. Główną bazą rozważań były równania wynikające z podobieństwa Monina Obukhova i bezwymiarowej funkcji $\Phi_\varepsilon(\zeta)$. Wielkości uzyskane w ramach wariantu pierwszego są możliwe do zaakceptowania. Natomiast wyniki otrzymane w wariancie drugim w odległości do 40m od wlotu wielokrotnie przewyższają poziom realny.

**Słowa kluczowe:** współczynnik szorstkości, prędkość tarciowa, CFD

## 1. Wprowadzenie

Obszary miejskie charakteryzują się znacznym osłabieniem przepływu powietrza dochodzącym do 30% w stosunku do terenów niezabudowanych [2]. Zasadniczym czynnikiem wpływającym na zaburzenie przepływu jest szorstkość

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Marek Jabłoński, Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, al. Politechniki 6, 90-924 Łódź; tel. 426313560; marek.jablonski@p.lodz.pl

[2] Katarzyna Klemm, Politechnika Łódzka, Zakład Gospodarki Przestrzennej i Geomatyki, al. Politechniki 6, 90-924 Łódź; tel. 426313512; katarzyna.klemm@p.lodz.pl

podłoża, wywołana obecnością zabudowy. Z punktu widzenia kształtowania korzystnych warunków aerosanitarnych w mieście istotną rolę odgrywają korytarze przewietrzające. Coraz częściej jednak obserwujemy zjawisko zagęszczania zabudowy i zabudowywania tych cennych dla miasta stref. Wprowadzenie nawet pojedynczych budynków w obrębie korytarza może w zasadniczy sposób wpłynąć na wzrost szorstkości podłoża, a w efekcie spowodować zmiany w profilu prędkości wiatru.

Jednocześnie w zwartych strukturach miejskich coraz istotniejszym parametrem staje się temperatura powietrza i podłoża wpływająca na wzrost turbulencji termicznej. Uwzględnienie zarówno mechanicznego jak i termicznego oddziaływania wiatru ma istotne znaczenie z punktu widzenia komfortu człowieka. Aby wspomóc proces planowania musimy dysponować szczegółowymi informacjami na temat parametrów kształtujących przepływ powietrza. Narzędziem często stosowanym w analizach przepływu powietrza między budynkami jest symulacja numeryczna.

W pracy przedstawiono procedurę wyznaczania podstawowych parametrów wpływających na profil prędkości wiatru tj. szorstkości podłoża i prędkości tarciowej w oparciu o dane uzyskane z analiz symulacyjnych.

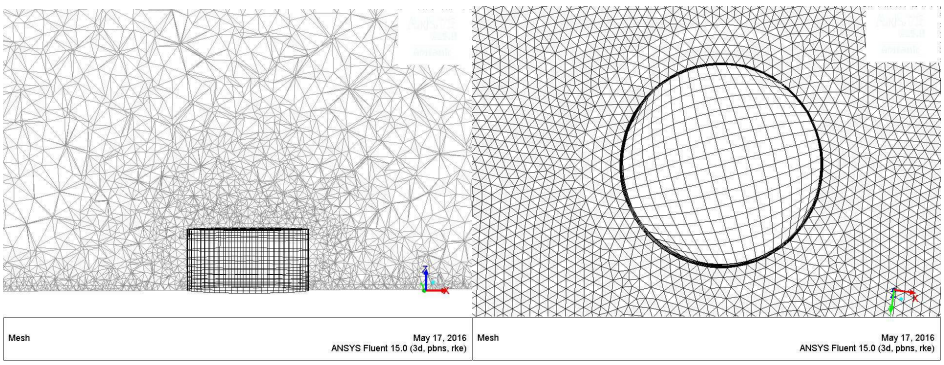
## 2. Symulacja numeryczna

W celu uchwycenia wpływu zabudowy na zmianę parametrów kształtujących profil prędkości wiatru przeprowadzono symulację numeryczną w oparciu o turbulencyjny model realizable k - ε. W celu określenia parametrów przepływu w sąsiedztwie ścian budynku zastosowano model warstwy przyściennej zaproponowany przez Laundera i Spaldinga [3]. Analizę przeprowadzono dla prostego przypadku obiektu w kształcie walca o wymiarach $\phi$=10 m i $h$=10 m zlokalizowanego w terenie otwartym o szorstkości podłoża $z_o$=0,02 m. Wielkość przyjętej domeny obliczeniowej wynosiła 250 m x 200 m x 50 m i spełniała warunki zalecane w pracy [4]. Na wlocie określono profil prędkości wiatru przyjmując założenie, że $z_o$ = 0,02 m, $z_{ref}$ = 10 m i $u_{ref}$ = 4 m/s. W płaszczyźnie wlotu zdefiniowano ponadto profil energii kinetycznej turbulencji i profil dyssypacji energii kinetycznej turbulencji. Profil dyssypacji energii kinetycznej turbulencji wyznaczono z równania:

$$\varepsilon = \frac{u_x^3}{\kappa \cdot z} \tag{1}$$

gdzie: $\kappa$ - stała Kármána 0,4,
$u_x$ – prędkość tarciowa [m/s],
$z$ – wysokość [m].

Siatka domeny obliczeniowej zawierała około 2 miliony komórek typu TETRA i HEXA (Rys. 1). Siatkę zagęszczono przy krawędziach modelu, w obszarze spodziewanego oderwania wirów oraz przy podłożu domeny. Zgodnie

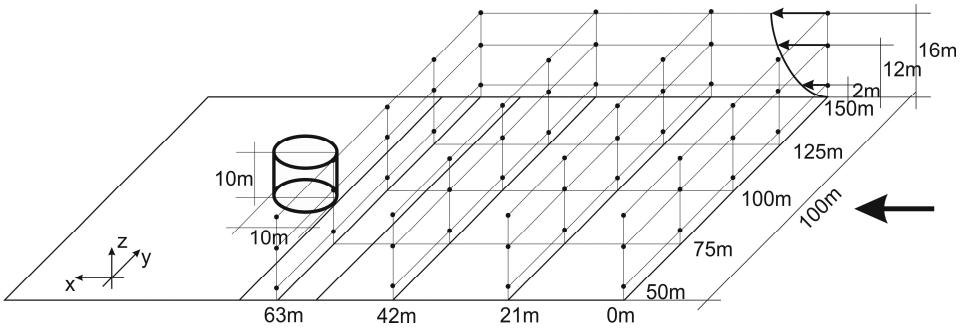



Rys. 1. Przyjęta siatka obliczeniowa

Fig. 1. Computational mesh

z zasadami tworzenia tego typu obiektów gęstość siatki była większa w rejonie większych gradientów prędkości, natomiast mniejsza w obszarach, gdzie przyrosty prędkości były niewielkie.

W wyniku przeprowadzonej analizy symulacyjnej uzyskano rozkład prędkości przepływu powietrza oraz dyssypacji energii kinetycznej turbulencji w obrębie domeny obliczeniowej. W dalszej części skupiono się na danych z 60 punktów pomiarowych zlokalizowanych na wysokości 2, 12 i 16 m, w odległości 0, 21, 42 i 63 m od wlotu. Na Rys.2. przedstawiono szczegółową lokalizację punktów oraz podstawowe dane dotyczące analizowanego przypadku.




Rys. 2. Lokalizacja punktów pomiarowych

Fig. 2. Location of measurement points

## 3. Analiza wyników

W tabelach 1 i 2 przedstawione zostały wartości prędkości przepływu powietrza oraz dyssypacji energii kinetycznej turbulencji uzyskane na drodze symulacji numerycznej przy zadanych warunkach brzegowych.

Tabela 1. Prędkości przepływu powietrza [m/s] w strefie dowietrznej analizowanego obiektu uzyskane na drodze symulacji numerycznej

Table 1. Wind speeds [m/s] in an upwind zone of the analysed object obtained by numerical simulation

| Wysokość z[m] | y[m] | Odległość od wlotu x [m] | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 21 | 42 | 63 |
| 2 | 150 | 2,93 | 2,77 | 2,78 | 2,81 |
| | 125 | 2,93 | 2,70 | 2,75 | 2,85 |
| | 100 | 2,93 | 2,71 | 2,55 | 1,02 |
| | 75 | 2,93 | 2,76 | 2,73 | 2,87 |
| | 50 | 2,93 | 2,71 | 2,79 | 2,90 |
| 12 | 150 | 4,07 | 4,07 | 4,04 | 4,12 |
| | 125 | 4,08 | 4,06 | 4,05 | 4,13 |
| | 100 | 4,08 | 4,06 | 3,99 | 3,83 |
| | 75 | 4,07 | 4,06 | 4,05 | 4,13 |
| | 50 | 4,08 | 4,05 | 4,09 | 4,08 |
| 16 | 150 | 4,25 | 4,26 | 4,27 | 4,30 |
| | 125 | 4,26 | 4,25 | 4,29 | 4,33 |
| | 100 | 4,25 | 4,27 | 4,20 | 4,32 |
| | 75 | 4,24 | 4,26 | 4,26 | 4,34 |
| | 50 | 4,25 | 4,26 | 4,28 | 4,30 |

Tabela 2. Dyssypacja energii kinetycznej turbulencji ε [$m^2/s^3$] w strefie dowietrznej analizowanego obiektu uzyskana na drodze symulacji numerycznej

Table 2. Turbulent kinetic energy dissipation ε [$m^2/s^3$] in an upwind zone of the analysed object obtained by numerical simulation

| Wysokość z [m] | y[m] | Odległość od wlotu x [m] | | | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | 0 | 21 | 42 | 63 |
| 2 | 150 | 0,349 | 0,027 | 0,016 | 0,015 |
| | 125 | 0,349 | 0,028 | 0,016 | 0,016 |
| | 100 | 0,350 | 0,027 | 0,018 | 0,060 |
| | 75 | 0,348 | 0,026 | 0,017 | 0,015 |
| | 50 | 0,349 | 0,028 | 0,016 | 0,013 |
| 12 | 150 | 0,060 | 0,030 | 0,018 | 0,012 |
| | 125 | 0,059 | 0,030 | 0,018 | 0,012 |
| | 100 | 0,059 | 0,030 | 0,018 | 0,012 |
| | 75 | 0,060 | 0,030 | 0,018 | 0,012 |
| | 50 | 0,060 | 0,030 | 0,018 | 0,012 |
| 16 | 150 | 0,046 | 0,027 | 0,018 | 0,013 |
| | 125 | 0,045 | 0,027 | 0,018 | 0,013 |
| | 100 | 0,046 | 0,026 | 0,018 | 0,015 |
| | 75 | 0,047 | 0,026 | 0,018 | 0,013 |
| | 50 | 0,045 | 0,027 | 0,018 | 0,013 |

Korzystając z przedstawionych powyżej danych określono średnie wielkości prędkości $u$ i dyssypacji energii ε, na trzech analizowanych wysokościach. Uzyskane wartości podano w tabelach 3 i 4. W pierwszym wariancie wyznaczania podstawowych parametrów przepływu, tj. współczynnika szorstkości i prędkości tarciowej oparto się na profilu logarytmicznym prędkości wiatru.

$$\overline{U}(z) = \frac{u_x}{\kappa} \ln\left(\frac{z - z_d}{z_o}\right) \tag{2}$$

Przemieszczenie płaszczyzny zerowej $z_d$ przyjęto zgodnie ze wzorem zaproponowanym w pracy [1].

$$z_d = h(\lambda_p)^{0,6} \tag{3}$$

gdzie: $h$ - średnia wysokość budynków

$\lambda_p$ – współczynnik zagęszczenia zabudowy na powierzchni $A_T$; $\lambda_p = A_p / A_T$ ,

$A_p$ – powierzchnia zabudowy.

Tabela 3. Prędkość średnia $u_z$ [m/s] w funkcji odległości x i wysokości z

Table 3. Average velocity $u_z$ [m/s] in the function of distance x and height z

| Wysokość z[m] | Prędkość średnia $u_z$ Odległość od wlotu x[m] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0 | 21 | 42 | 63 |
| 2 | 2,93 | 2,73 | 2,72 | 2,48 |
| 12 | 4,08 | 4,06 | 4,04 | 4,06 |
| 16 | 4,25 | 4,26 | 4,26 | 4,32 |

Przyjmując logarytmiczny profil prędkości wyznaczono prędkość tarciową $u_x$ oraz szorstkość podłoża dla czterech odległości od wlotu, x=0; 21; 42 i 63 m. Uzyskane wyniki przedstawiono w tabeli 5.

Tabela 4. Średnia wielkość dyssypacji energii kinetycznej turbulencji ε [$m^2/s^3$] w funkcji odległości x i wysokości z

Table 4. Average size of turbulent kinetic energy dissipation ε [$m^2/s^3$] in the function of distance x and height z

| Wysokość z(m) | Dyssypacja energii kinetycznej turbulencji ε Odległość od wlotu x[m] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0 | 21 | 42 | 63 |
| 2 | 0,441 | 0,028 | 0,017 | 0,015 |
| 12 | 0,058 | 0,030 | 0,018 | 0,013 |
| 16 | 0,043 | 0,028 | 0,018 | 0,013 |

Tabela 5. Parametry terenu $z_d$, $z_o$ i prędkość tarciowa $u_x$ (wariant I)

Table 5. Terrain parameters $z_d$, $z_o$ and friction velocity $u_x$ (variant I)

| Podstawowe parametry | Odległość od wlotu x[m] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0 | 21 | 42 | 63 |
| Przemieszczenie płaszczyzny zerowej $z_d$ [m] według [1] | 0,40 | 0,50 | 0,70 | 1,30 |
| Prędkość tarciowa $u_x$ [m/s] | 0,22 | 0,22 | 0,24 | 0,40 |
| Szorstkość podłoża $z_o$ [m] | 0,010 | 0,007 | 0,013 | 0,190 |

W drugim wariancie wielkości $u_x$ i $z_o$ określono przyjmując średnią dyssypację energii kinetycznej turbulencji ε, por. tabela 4. Przemieszczenie płaszczyzny zerowej $z_d$ określono podobnie jak w wariancie I. Podane w tabeli 6. wielkości $u_x$ i $z_o$ zostały określone przyjmując założenie, że wystąpił pomijalnie mały efekt turbulencji termicznej $Q_H$ = 4,7 W/m$^2$.

Główną bazą rozważań były równania wynikające z podobieństwa Monina - Obukhova i bezwymiarowej funkcji $\Phi_\varepsilon(\varsigma)$

$$\frac{\varepsilon\kappa(z-z_d)}{u_x^3}=\Phi_\varepsilon(\varsigma),\ \varsigma=(z-z_d)/z_L \tag{4}$$

gdzie: $\Phi_\varepsilon$ – funkcja empiryczna przyjęta według [5]

$$\Phi_\varepsilon(\varsigma)=[1-3\varsigma]^{-1}-\varsigma \tag{5}$$

oraz $z_L$ – długość Monina – Obukhova [m].

Długość Monina – Obukhova ma postać

$$z_L=\frac{u_x^2}{\kappa g}\cdot\frac{T}{T_x} \tag{6}$$

gdzie: $T$ – temperatura [K]
$T_x$ - skala temperatury [K]
$g$ – przyspieszenie ziemskie [m/s$^2$]

$$T_x=-\frac{Q_H}{\rho c_p u_x} \tag{7}$$

gdzie: $Q_H$ – ciepło jawne [W/m$^2$],

$\rho$ – gęstość powietrza [kg/m$^3$],
$c_p$ – ciepło właściwe [J/(kg K)].

Tabela 6. Parametry terenu $z_d$, $z_o$ i prędkość tarciowa $u_x$ (wariant II)

Table 6. Terrain parameters $z_d$, $z_o$ and friction velocity $u_x$ (variant II)

| Podstawowe parametry | Odległość od wlotu x[m] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 0 | 21 | 42 | 63 |
| Przemieszczenie płaszczyzny zerowej $z_d$ [m] według [1] | 0,40 | 0,50 | 0,70 | 1,30 |
| Prędkość tarciowa $u_x$ [m/s] | 0,65 | 0,56 | 0,47 | 0,38 |
| Szorstkość podłoża $z_o$ [m] | 1,090 | 0,740 | 0,407 | 0,15 |

Z przedstawionych w tabelach 5 i 6 danych wynika, że wielkości uzyskane w ramach wariantu I są możliwe do zaakceptowania. Natomiast wyniki otrzymane w drugim wariancie, w przypadku $u_x$ i $z_o$ wykazują wyraźne niezgodności w strefie zlokalizowanej w odległości do 40 m od wlotu. Prędkości tarcia $u_x$ jak i szorstkości podłoża $z_o$ uzyskane w ramach drugiego wariantu są wielkościami wielokrotnie przewyższającymi poziom realny. Należy jednocześnie zauważyć, że wynik uzyskany w odległości 63 m od wlotu jest zbieżny z wynikiem wariantu I.

## 4. Wnioski

Przedstawione w pracy dwa warianty wyznaczania podstawowych parametrów $u_x$ i $z_o$, bazujące na analizie numerycznej mogą być przydatne w ocenie bardziej złożonej struktury zabudowy.

W wariancie pierwszym pomimo uzyskania dobrego wyniku występuje problem nie uwzględnienia turbulencji termicznej. Wariant drugi stwarza pewne możliwości przybliżonej oceny wystąpienia efektów termicznych. Jednak istotne jest przyjęcie na wlocie właściwego profilu dyssypacji energii kinetycznej turbulencji. Zbyt uproszczona zasada przyjęcia danych powoduje, że z realnymi wielkościami mamy do czynienia dopiero w dalszej odległości od wlotu domeny. Powyższy fakt został potwierdzony w rozpatrywanym w pracy prostym przykładzie odnoszącym się do terenu płaskiego i zlokalizowanego na nim pojedynczego obiektu w kształcie walca.

Uzyskanie w miarę wiarygodnych wyników może nastąpić w przypadku, gdy poza rozwiązaniami numerycznymi przeprowadzone zostaną badania modelowe w celu uzyskania dodatkowych informacji o analizowanym przepływie.

## Literatura

[1] Bottema M., Mestayer P.G.: Urban roughness mapping – validation techniques and some first results, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 74-76, 1998, pp.163-173.

[2] Lewińska J.: Klimat miasta. Zasoby, zagrożenia, kształtowanie, IGPiK, Kraków 2000.

[3] Launder B. E., Spalding D.B.: The numerical computation of turbulent flows, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 3, 1974, pp.269-289.

[4] Franke J., Hirsch C., Jensen A.G, Krus H.W., Schatzmann M., Westbury P.S., Miles S.D., Wisse J.A., Wright N.G, Recomendations on the use of CFD in predicting pedestrian wind environment, Final report, 2004.

[5] Thiermann V., Grassl H.: The measurement of turbulent surface-layer fluxes by use of bichromatic scintillation, Boundary - Layer Meteorology, 58, 1992, pp. 367-389.

## APPLICATION OF NUEMRICAL SIMULATION FOR DETERMINING PARAMETERS OF AIR FLOW

**S u m m a r y**

The paper presents the procedure of determining the basic parameters affecting the wind speed profile, i.e. roughness coefficient and friction velocity based on numerical simulation. In order to show the impact of development on changes in parameters influencing wind speed profile numerical simulation has been carried out based on realizable K-ε model. The analysis was conducted for the simple case of cylindrical object with dimensions $\phi$=10 m and $h$=10 m located in the open area with the roughness coefficient $z_o$=0,02m. Based on obtained numerical results the average values of wind speed and energy dissipation were determined at three heights (2, 12, 16 m) in a distance of 0, 21, 42 and 63 m from the inlet. In a first variant roughness coefficient and friction velocity were determined using the logarithmic wind speed profile, assuming zero plane displacement in accordance with [1]. In the second variant, the size of $u_x$ and $z_o$ was determined on the assumption that there was a negligible effect of thermal turbulence $Q_H$ = 4,7W/m$^2$. The consideration were based on equation resulting from Monin Obukhov similarity and dimensionless function $\Phi_\varepsilon(\zeta)$. Results obtained in the first variant are acceptable. In contrast, the results obtained in the second variant, at the distance of 40m from the inlet are several times higher than realistic level.

**Keywords:** roughness coefficient, friction velocity, CFD

DOI:10.7862/rb.2016.193

*Przesłano do redakcji: 01.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 131-138

**Hanna JĘDRZEJUK**[1]
**Mateusz SZMIDT**[2]

# PORÓWNANIE METOD STOSOWANYCH DO OKREŚLANIA DŁUGOŚCI OKRESU OGRZEWCZEGO

W artykule porównano trzy sposoby wyznaczania długości okresu ogrzewczego: stały okres ogrzewczy (np. PN-B-02025:1999 [4]); okres ogrzewczy zależny od bilansu cieplnego w danym miesiącu (np. PN-EN 832:2001 [5]), okres ogrzewczy zależny od charakterystyki ocenianego budynku (np. PN-EN ISO 13790:2009 [6]).
Zbadano wpływ zmian wewnętrznej pojemności cieplnej oraz izolacyjności termicznej przegród zewnętrznych.
Wykonano obliczenia długości sezonu ogrzewczego dla trzech wybranych lokalizacji: Gdańsk, Rzeszów, Zakopane.
Wykazano istotne różnice w długości okresów ogrzewczych określanych za pomocą wybranych metod.

**Słowa kluczowe:** metoda bilansów miesięcznych, charakterystyka energetyczna budynków

## 1. Wprowadzenie

W celu oceny energetycznej lub termomodernizacji do określania zapotrzebowania na ciepło użyteczne do ogrzewania powszechnie jest stosowana metoda bilansów miesięcznych. W metodzie tej wymagane jest albo określenie okresu ogrzewczego, albo niezbędna jest weryfikacja przynależności danego miesiąca do sezonu ogrzewczego.

Długość okresu ogrzewczego ma również znaczenie przy określaniu zapotrzebowania na energię do napędu urządzeń pomocniczych. Zależnie od wyposażenia systemów ogrzewania, wentylacji lub chłodzenia w urządzenia pomocnicze różnice w oszacowaniu energii do napędu tych urządzeń mogą być znaczące.

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Hanna Jędrzejuk, Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Cieplnej, Zakład Chłodnictwa i Energetyki Budynku, ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa; tel. 222347257; hjedrzejuk@itc.pw.edu.pl

[2] Mateusz Szmidt, Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Cieplnej, ul. Nowowiejska 21/25, 00-665 Warszawa

# 2. Opis powszechnie stosowanych metod określania długości okresu ogrzewczego

## 2.1. Sposoby wyznaczania długości okresu ogrzewczego

W ogólnym przypadku okres ogrzewczy zależy m.in. od parametrów klimatu zewnętrznego i wewnętrznego, izolacyjności termicznej obudowy zewnętrznej i jej szczelności powietrznej, udziału powierzchni oszklonych, właściwości dynamicznych budynku oraz sposobu eksploatacji.

Wśród podstawowych sposobów określania długości okresu ogrzewczego można wyróżnić:

– stały okres ogrzewczy;

– okres ogrzewczy zależny od bilansu cieplnego w danym miesiącach;

– okres ogrzewczy zależny od charakterystyki ocenianego budynku.

## 2.2. Stały okres ogrzewczy

Po raz pierwszy kompleksowe dane niezbędne do oceny energetycznej budynków opublikowano w Polsce w normie PN-B-02025:1999 [4]. Oprócz danych meteorologicznych określono w każdym miesiącu liczbę dni należących do standardowego sezonu ogrzewczego. W tabeli 1. przedstawiono liczbę dni ogrzewania w wybranych stacjach meteorologicznych.

Tabela 1. Liczba dni ogrzewania w wybranych lokalizacjach, na podstawie [4]

Table 1. The number of heating days in selected locations, based on [4]

| | **I** | **II** | **III** | **IV** | **V** | **VI** | **VII** | **VIII** | **IX** | **X** | **XI** | **XII** | **SUMA** |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Kraków | 31 | 28 | 31 | 30 | 5 | 0 | 0 | 0 | 5 | 31 | 30 | 31 | 222 |
| Warszawa | 31 | 28 | 31 | 30 | 5 | 0 | 0 | 0 | 5 | 31 | 30 | 31 | 222 |
| Rzeszów | 31 | 28 | 31 | 30 | 5 | 0 | 0 | 0 | 5 | 31 | 30 | 31 | 222 |
| Gdańsk | 31 | 28 | 31 | 30 | 20 | 0 | 0 | 0 | 10 | 31 | 30 | 31 | 242 |
| Szczecin | 31 | 28 | 31 | 30 | 20 | 0 | 0 | 0 | 10 | 31 | 30 | 31 | 242 |
| Suwałki | 31 | 28 | 31 | 30 | 20 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 30 | 31 | 252 |
| Zakopane | 31 | 28 | 31 | 30 | 20 | 0 | 0 | 0 | 20 | 31 | 30 | 31 | 252 |

W Rozporządzeniu Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku (…) [1] do sezonu ogrzewczego należały miesiące od stycznia do maja i od września do grudnia włącznie, jeżeli w tych miesiącach zapotrzebowanie na ciepło użyteczne do ogrzewania było dodatnie. W polskich warunkach klimatycznych konsekwencją takiego warunku było określenie trwania sezonu ogrzewczego przez 9 miesięcy.

## 2.3. Okres ogrzewczy zależny od bilansu cieplnego w danym miesiącu

Według normy PN-EN 832:2001 [5], która była oficjalnym tłumaczeniem angielskiej wersji tejże normy, w celu wyznaczenia rocznego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania wyznaczano odpowiednią sumę wszystkich miesięcy, w których średnia temperatura zewnętrzna była niższa niż wewnętrzna temperatura obliczeniowa.

Norma PN-EN 832:2001 [5] dopuszczała stosowanie metody obliczeń sezonowych. Zalecano, aby pierwszy i ostatni dzień sezonu ogrzewczego oraz średnie warunki meteorologiczne ustalano na poziomie wymagań krajowych w odniesieniu do strefy geograficznej i typowego budynku. W tym przypadku sezon ogrzewczy zawierał wszystkie dni, w odniesieniu do których zysk ciepła, obliczony z użyciem umownego współczynnika wykorzystania, nie równoważył straty ciepła.

W aktualnie obowiązującym Rozporządzeniu [2] w obliczeniach zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania uwzględniane są miesiące, w których bilans cieplny jest dodatni.

## 2.4. Okres ogrzewczy zależny od charakterystyki ocenianego budynku

Obecnie do określania energetycznych właściwości użytkowych budynków stosowana jest norma PN-EN ISO 13790:2009 [6]. Przedstawiono w niej dwie metody wyznaczania długości sezonu ogrzewczego w celu określania czasu działania urządzeń w systemie ogrzewania.

Pierwsza metoda wymaga określania części miesiąca, która jest częścią sezonu ogrzewczego zależnie od zapotrzebowania na energię do ogrzewania odniesionego do sumy zapotrzebowania: na energię do ogrzewania, do chłodzenia, do podgrzania powietrza wentylacyjnego oraz do chłodzenia powietrza wentylacyjnego w rozpatrywanym miesiącu.

Druga metoda w sposób uproszczony uwzględnia właściwości dynamiczne budynku. Współczynnik efektywności wykorzystania zysków ciepła jest pewną funkcją stałej czasowej budynku oraz stosunku zysków do strat ciepła. Zależy on również od granicznej wartości stosunku zysków do strat. Wartość graniczna odpowiada stosunkowi zysków do strat ciepła przy rzeczywistym współczynniku wykorzystania, ale odczytanym dla budynku o bardzo dużej pojemności cieplnej.

Tę drugą metodę zapisano również w Rozporządzeniu z 2008 r. [1] i niejednokrotnie była ona wybierana przez audytorów energetycznych do wyznaczania długości sezonu ogrzewczego, gdy prowadziła do obniżenia zapotrzebowania na energię użyteczną do ogrzewania.

## 3. Analiza wybranych przypadków

Ze względu na odmienną długość okresu ogrzewczego według PN-B-02025:1999 [4] obliczenia długości sezonu ogrzewczego przeprowadzono wariantowo. Wybrano lokalizacje: Gdańsk, Rzeszów, Zakopane. Niezbędne do obliczeń parametry klimatu przyjęto zgodnie z zaleceniami Ministerstwa Infrastruktury i Budownictwa [7].

Podstawowe dane, które zostały uwzględnione w obliczeniach, przyjęto, jak poniżej:

– budynek ma kształt prostopadłościanu, przy czym szerokość elewacji południowej jest większy o 40% od szerokości elewacji wschodniej;
– grubość ścian zewnętrznych: 0,40 m, grubość stropu nad nieogrzewaną piwnicą: 0,40 m, grubość stropodachu: 0,50 m;
– liczba kondygnacji - 1, 2;
– powierzchnia użytkowa jednej kondygnacji 100,00 $m^2$;.
– wysokość pomieszczeń netto: 2,80 m;
– wewnętrzna pojemność cieplna wg PN-EN 13790:2009 odnosząca się do różnych konstrukcji budynków: bardzo lekka – 80 000 J/(K $m^2$), lekka – 110 000 J/(K $m^2$), średnia – 165 000 J/(K $m^2$), ciężka – 260 000 J/(K $m^2$), bardzo ciężka – 370 000 J/(K $m^2$) oraz dodatkowo super ciężka (PL) – 500 000 J/(K $m^2$);
– powierzchnia przegród oszklonych wynosi 1/8 powierzchni użytkowej, przy czym na elewację południową przypada 50%, na elewację wschodnią 20%, na elewację zachodnią 20% oraz 10% na elewację północną;
– wewnętrzne zyski ciepła: 5 W/$m^2$;
– liczba wymian powietrza: 0,5 1/h;
– izolacyjność termiczna przegród zewnętrznych zgodna z wymaganiami zapisanymi w aktualnie obowiązującym Rozporządzeniu [3] w trzech przedziałach czasowych: od 1 stycznia 2014 r., od 1 stycznia 2017 r., od 1 stycznia 2021 r.

Porównanie długości okresów ogrzewczych określonych zgodnie z PN-B-02025 [4] oraz z Rozporządzeniem Ministra Infrastruktury w sprawie metodologii określania charakterystyki energetycznej budynku (…) z 2008 r. [1] zawiera tabela 2.

Tabela 2. Długość sezonu ogrzewczego

Table 2. The length of the heating season

| | **PN-B-02025:1999** | **Rozporządzenie z 2008 r.** |
|---|---|---|
| Rzeszów | 5328 h | 6552 h |
| Gdańsk | 5808 h | |
| Zakopane | 6048 h | |

Wyniki obliczeń wykonanych za pomocą metody 2 opisanej w PN-EN ISO 13790:2009 [6] podano w tabelach 3 ÷ 5.

Tabela 3. Długość okresu ogrzewczego w Rzeszowie, Metoda 2

Table 3. The length of the heating season in Rzeszów, Method 2

| **Wariant** / **Klasa budynku** | Budynek: 1 kondygnacja | | | Budynek: 2 kondygnacje | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Izolacyjność termiczna, zgodnie z [6], w okresie od: | | | | | |
| | 1.01.2014 | 1.01.2017 | 1.01.2021 | 1.01.2014 | 1.01.2017 | 1.01.2021 |
| Bardzo lekka | 6677 h | 6610 h | 6516 h | 6435 h | 6384 h | 6281 h |
| Lekka | 6613 h | 6550 h | 6455 h | 6381 h | 6333 h | 5676 h |
| Średnia | 6538 h | 6465 h | 6379 h | 6314 h | 6200 h | 5533 h |
| Ciężka | 6440 h | 6374 h | 6304 h | 6180 h | 5555 h | 5402 h |
| Bardzo ciężka | 6369 h | 6313 h | 6238 h | 5574 h | 5461 h | 5324 h |
| Super ciężka (PL) | 6316 h | 6267 h | 6165 h | 5503 h | 5400 h | 5270 h |

Tabela 4. Długość okresu ogrzewczego w Gdańsku, Metoda 2

Table 4. The length of the heating season in Gdańsk, Method 2

| **Wariant** / **Klasa budynku** | Budynek: 1 kondygnacja | | | Budynek: 2 kondygnacje | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Izolacyjność termiczna, zgodnie z [6], w okresie od: | | | | | |
| | 1.01.2014 | 1.01.2017 | 1.01.2021 | 1.01.2014 | 1.01.2017 | 1.01.2021 |
| Bardzo lekka | 7017 h | 6914 h | 6781 h | 6667 h | 6590 h | 6493 h |
| Lekka | 6923 h | 6828 h | 6703 h | 6597 h | 6525 h | 6432 h |
| Średnia | 6812 h | 6724 h | 6612 h | 6516 h | 6444 h | 5845 h |
| Ciężka | 6703 h | 6626 h | 6526 h | 6425 h | 5844 h | 5740 h |
| Bardzo ciężka | 6635 h | 6565 h | 6473 h | 5846 h | 5772 h | 5614 h |
| Super ciężka (PL) | 6588 h | 6521 h | 6416 h | 5784 h | 5719 h | 5529 h |

Tabela 5. Długość okresu ogrzewczego w Zakopanem, Metoda 2

Table 5. The length of the heating season in Zakopane, Method 2

| **Wariant** / **Klasa budynku** | Budynek: 1 kondygnacja | | | Budynek: 2 kondygnacje | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Izolacyjność termiczna, zgodnie z [6], w okresie od: | | | | | |
| | 1.01.2014 | 1.01.2017 | 1.01.2021 | 1.01.2014 | 1.01.2017 | 1.01.2021 |
| Bardzo lekka | 7792 h | 7198 h | 6955 h | 8230 h | 8013 h | 7860 h |
| Lekka | 7220 h | 7036 h | 6810 h | 8048 h | 7890 h | 7808 h |
| Średnia | 7015 h | 6850 h | 6671 h | 7879 h | 7814 h | 7725 h |
| Ciężka | 6822 h | 6681 h | 6551 h | 7788 h | 7735 h | 7045 h |
| Bardzo ciężka | 6704 h | 6582 h | 6473 h | 7724 h | 7145 h | 6904 h |
| Super ciężka (PL) | 6618 h | 6509 h | 6419 h | 7676 h | 7029 h | 6807 h |

W Rozporządzeniu z 2015 r. [2] brak jest określenia długości sezonu ogrzewczego. W celu porównania wyznaczono jednakże długość sezonu ogrzewczego jako sumę godzin w miesiącach, w których zapotrzebowanie na ciepło użyteczne do ogrzewania ma wartość dodatnią. Wyniki obliczeń podano w tabelach 6 ÷ 8.

Tabela 6. Długość okresu ogrzewczego w Rzeszowie

Table 6. The length of the heating season in Rzeszów

| **Wariant** / **Klasa budynku** | Budynek: 1 kondygnacja | | | Budynek: 2 kondygnacje | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Izolacyjność termiczna, zgodnie z [3], w okresie od: | | | | | |
| | 1.01.2014 | 1.01.2017 | 1.01.2021 | 1.01.2014 | 1.01.2017 | 1.01.2021 |
| Bardzo lekka | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8016 h | 8760 h |
| Lekka | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 7272 h | 8760 h |
| Średnia | 8016 h | 8760 h | 7296 h | 8040 h | 7272 h | 8760 h |
| Ciężka | 7296 h | 7272 h | 7296 h | 8040 h | 7272 h | 8760 h |
| Bardzo ciężka | 6552 h | 7272 h | 7296 h | 8040 h | 7272 h | 8760 h |
| Super ciężka (PL) | 6552 h | 7272 h | 7296 h | 7320 h | 7272 h | 8016 h |

Tabela 7. Długość okresu ogrzewczego w Gdańsku

Table 7. The length of the heating season in Gdańsk

| **Wariant** / **Klasa budynku** | Budynek: 1 kondygnacja | | | Budynek: 2 kondygnacje | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Izolacyjność termiczna, zgodnie z [3], w okresie od: | | | | | |
| | 1.01.2014 | 1.01.2017 | 1.01.2021 | 1.01.2014 | 1.01.2017 | 1.01.2021 |
| Bardzo lekka | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8016 h | 8760 h | 8760 h |
| Lekka | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8016 h | 8760 h | 8760 h |
| Średnia | 8760 h | 8016 h | 8016 h | 8016 h | 8760 h | 8016 h |
| Ciężka | 8760 h | 8016 h | 8016 h | 7296 h | 8040 h | 8016 h |
| Bardzo ciężka | 8016 h | 8016 h | 8016 h | 7296 h | 8040 h | 7296 h |
| Super ciężka (PL) | 8016 h | 7296 h | 8016 h | 7296 h | 8040 h | 7296 h |

Tabela 8. Długość okresu ogrzewczego w Zakopanem

Table 8. The length of the heating season in Zakopane

| **Wariant** / **Klasa budynku** | Budynek: 1 kondygnacja | | | Budynek: 2 kondygnacje | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Izolacyjność termiczna, zgodnie z [3], w okresie od: | | | | | |
| | 1.01.2014 | 1.01.2017 | 1.01.2021 | 1.01.2014 | 1.01.2017 | 1.01.2021 |
| Bardzo lekka | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h |
| Lekka | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h |
| Średnia | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h |
| Ciężka | 8760 h | 8016 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h |
| Bardzo ciężka | 8760 h | 7296 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h | 8760 h |
| Super ciężka (PL) | 8016 h | 7296 h | 8040 h | 8016 h | 8760 h | 8760 h |

## 4. Wnioski

1. Metoda quasi-dynamiczna (metoda 2 [4]) uwzględnia wpływ właściwości dynamicznych budynku na długość okresu ogrzewczego. We wszystkich analizowanych przypadkach liczba godzin maleje wraz ze wzrostem wewnętrznej pojemności cieplnej. Również poprawa izolacyjności termicznej obudowy zewnętrznej powoduje zmniejszenie liczby godzin ogrzewania.
   Zwiększenie liczby kondygnacji, które skutkuje m.in. zwiększeniem wewnętrznej pojemności cieplnej, zmniejszeniem współczynnika kształtu budynku, obniżeniem wskaźnika rocznego zapotrzebowania na ciepło użyteczne do ogrzewania, skraca długość sezonu ogrzewczego.
2. Sztucznie wyznaczona długość okresu ogrzewczego, tj. wyłącznie na podstawie dodatniego bilansu cieplnego [2] w danym miesiącu, nie jest wiarygodna. Zauważalny jest brak zachowania kierunku zmian. W przypadku wymagań względem izolacyjności termicznej przegród obowiązujących od 1 stycznia 2017 r., na przykład w Rzeszowie, , poprawa izolacyjności termicznej budynków jednokondygnacyjnych (współczynnik kształtu: 0,96 $m^{-1}$) o konstrukcji bardzo ciężkiej i super ciężkiej (tabela 6) spowodowała wydłużenie okresu ogrzewczego. Natomiast w przypadku budynków dwukondygnacyjnych (współczynnik kształtu: 0,70 $m^{-1}$) najkrótszym okresem ogrzewczym charakteryzują się konstrukcje od lekkiej do superciężkiej.
3. Przyjęta w Rozporządzeniu z 2015 r. [2] metoda określa czas działania urządzeń pomocniczych w systemie ogrzewania w znacząco odmienny sposób od zastosowanego do wyznaczania zapotrzebowania na ciepło użyteczne do ogrzewania.
4. Długość sezonu ogrzewczego określona w PN-B-02025:1999 [4] jest stała i nie uwzględnia właściwości dynamicznych budynków.
5. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkowa oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej [1] określa dłuższe okresy ogrzewcze niż norma PN-B-02025:1999 [4].
6. W przypadku budynku jednokondygnacyjnego (współczynnik kształtu: 0,96 $m^{-1}$) w rozpatrywanych lokalizacjach najkrótszy sezon ogrzewczy określa norma PN-B-02025:1999 [4].
   Natomiast w budynku dwukondygnacyjnym (współczynnik kształtu: 0,70 $m^{1}$) analizowana zależność zmienia się zależnie od jakości izolacyjności termicznej.

## Literatura

[1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkowa oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej (Dz.U. 2008 nr 201 poz. 1240).

[2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.U. 2015 nr 0 poz. 376).

[3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. 2015 poz. 1422, tekst jednolity).

[4] PN-B-02025:1999 Obliczanie sezonowego zapotrzebowania na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego.

[5] PN-EN 832:2001 Właściwości cieplne budynków – Obliczanie zapotrzebowania na energię do ogrzewania – Budynki mieszkalne.

[6] PN-EN ISO 13790:2009 Energetyczne właściwości użytkowe budynków -- Obliczanie zużycia energii na potrzeby ogrzewania i chłodzenia.

[7] Typowe lata meteorologiczne i statystyczne dane klimatyczne do obliczeń energetycznych budynków (http://mib.gov.pl/2-Wskazniki_emisji_wartosci_opalowe_paliwa.htm#).

## RESEARCH COMPARISON OF METHODS USED TO DETERMINE THE LENGTH OF THE HEATING SEASON

**S u m m a r y**

In this article three methods of determining the length of the heating season were compared: a fixed heating season (eg. PN-B-02025: 1999 [6]); heating season depended on the heat balance in a particular month (eg. BS EN 832: 2001 [7]), a period of heating season depended on the characteristics of the assessed building (eg. PN-EN ISO 13790: 2009 [8]).

The effects of changes in the internal heat capacity and thermal insulation envelope were evaluated.

Calculations were made for three selected locations: Gdańsk, Rzeszów, Zakopane.

Significant differences in the length of periods of heating determined by the selected methods.

**Keywords:** monthly balance method, energy performance of buildings

DOI:10.7862/rb.2016.194

*Przesłano do redakcji: 01.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 139-149

**Galina KALDA**[1]
**Beata KOCZERA**[2]

# ANALIZA ZANIECZYSZCZENIA WÓD POWIERZCHNIOWYCH I PODZIEMNYCH ZAKŁADAMI PRZEMYSŁOWYMI NA PODKARPACIU

W artykule prezentowano analizę problematyki, związanej z ochroną wód powierzchniowych i podziemnych przed zanieczyszczeniami, jakie mają pochodzenie od zakładów przemysłowych na terenie województwa podkarpackiego. Największym problemem gospodarki wodnej jest zanieczyszczenie wód powierzchniowych, głównie rzecznych. Przyczyną tego są głównie zrzuty ścieków przemysłowych i komunalnych, oraz wypłukiwanie nawozów sztucznych. W województwie podkarpackim występuje kilka dużych zakładów przemysłowych, w których stosowana technologia przyczynia się do powstawania zanieczyszczeń, głównie wody powierzchniowej. Fabryki posiadają specjalną technologię oczyszczania ścieków przemysłowych, aby zniwelować do odpowiedniego stopnia zawartość metali ciężkich, siarczanów, chlorków, węglowodorów, fenoli oraz innych zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych. Zrzut ścieków do wody wiąże się ze zmianą jej właściwości oraz oddziaływaniem na faunę i florę. Następnie w procesie samooczyszczania dochodzi do rozkładu zanieczyszczeń. Województwo podkarpackie posiada zasoby wód słodkich w postaci rzek, jezior oraz wód głębinowych. Ich ilość jest zależna od sposobu jej wykorzystania, położenia geograficznego, klimatu. Na podstawie analizy stanu wód powierzchniowych i podziemnych i na przykładzie zanieczyszczenia wód wybranymi firmami pokazano, że sytuacja wód powierzchniowych jest w dość złym stanie. Wody te są nie dobrej czystości, a niekiedy nie spełniają żadnych wymogów i stanowią wody pozaklasowe. Związane jest to z rozwojem gospodarczym oraz wprowadzeniem do nich ścieków komunalnych i przemysłowych. Ścieki powstałe w fabrykach są poddawane odpowiednim procesom oczyszczania, gdyż nie wystąpiło przekroczenie dopuszczalnych norm. W celu dalszego zmniejszenia poszczególnych wartości należałoby zastanowić się nad unowocześnieniem technologii stosowanych przy oczyszczaniu danych ścieków lub np. zwiększenie czasu przebywania w osadnikach w celu zmniejszenia ilości zawiesiny ogólnej.

**Słowa kluczowe:** ochrona, wody podziemne, wody powierzchniowe, zanieczyszczenie, zakłady przemysłowe

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Galina Kalda, Politechnika Rzeszowska, 35-959 Rzeszów, ul. Powstańców Warszawy 6, tel. +48 17 8651068, kaldagal@prz.edu.pl
[2] Beata Koczera, Politechnika Rzeszowska

## 1. Wprowadzenie

Polska należy do krajów gdzie zasoby wody są zróżnicowane i zmienne w czasie oraz przestrzeni. Związane jest to nie tylko z ukształtowaniem terenu, ale również z częstotliwością występowania opadów, temperatury oraz infiltracją wód podziemnych. Głównymi konsumentami wody są energetyka cieplna, przemysł, rolnictwo, leśnictwo i gospodarka komunalna. Natomiast użytkownikami wody są żegluga, turystyka i rekreacja oraz energetyka cieplna. Największe zużycie wody powodują zakłady energetyczne, hutnictwo, przemysł spożywczy, chemiczny, papierniczy oraz metalurgiczny.

Największym problemem gospodarki wodnej jest zanieczyszczenie wód powierzchniowych, głównie rzecznych. Przyczyną tego są głównie zrzuty ścieków przemysłowych i komunalnych, oraz wypłukiwanie nawozów sztucznych. W województwie podkarpackim występuje kilka dużych zakładów przemysłowych, w których stosowana technologia przyczynia się do powstawania zanieczyszczeń, głównie wody powierzchniowej. Fabryki posiadają specjalną technologię oczyszczania ścieków przemysłowych, aby zniwelować do odpowiedniego stopnia zawartość metali ciężkich, siarczanów, chlorków, węglowodorów, fenoli oraz innych zanieczyszczeń organicznych i nieorganicznych. Zrzut ścieków do wody wiąże się ze zmianą jej właściwości oraz oddziaływaniem na faunę i florę. Następnie w procesie samooczyszczania dochodzi do rozkładu zanieczyszczeń.

Województwo podkarpackie posiada zasoby wód słodkich w postaci rzek, jezior oraz wód głębinowych. Ich ilość jest zależna od sposobu jej wykorzystania, położenia geograficznego, klimatu.

## 2. Zanieczyszczenia i zagrożenia wód na terenie województwa podkarpackiego

Powstawanie nowych gałęzi przemysłu sprzyja zanieczyszczeniom wód naturalnych. Źródła zanieczyszczeń możemy podzielić na:

- punktowe – to zasolone wody kopalniane, ścieki z systemów kanalizacyjnych i podgrzane wody chłodnicze;
- obszarowe – są to zanieczyszczenia z atmosfery, które przedostają się do wód, odpływy ze składowisk odpadów, terenów rolniczych i przemysłowych, zanieczyszczenia pasmowe wzdłuż tras komunikacyjnych [1].

Ścieki pochodzące z systemów kanalizacyjnych są głównie przyczyną zanieczyszczeń wód powierzchniowych. Wyróżniamy:

- ścieki bytowo-gospodarcze, pochodzące z gospodarstw domowych, zakładów pracy oraz użyteczności publicznej, w których woda została zużyta do celów higienicznych;
- ścieki przemysłowe – są to wody, które zostały zużyte w wyniku procesów technologicznych;

- ścieki opadowe – są to głównie wody pochodzące z roztopów oraz opadów atmosferycznych;
- ścieki filtracyjne – są to wody, które dostają się do kanalizacji z gruntu.

Ścieki bytowo-gospodarcze charakteryzują się stałym składem wynikającą z powtarzalności wykonywania zabiegów higienicznych. Ścieki przemysłowe uzależnione są od rodzaju przemysłu, technologii oraz materiałów wykorzystywanych w zakładzie. Ścieki opadowe i infiltracyjne charakteryzują się niskim stężeniem zanieczyszczeń [2].

Województwo podkarpackie w ostatnich latach rozwija się gospodarczo. Występują tam nie tylko małe lokalne zakłady przemysłowe, ale również duże fabryki mające istotne znaczenie ekonomiczne w skali kraju i świata. Wywiera to zasadniczy wpływ nie tylko na życie i rozwój społeczno-gospodarczy ale również stwarza zagrożenia dla środowiska. Głównie rozwinęły się sektory przetwórstwa rolno-spożywczego i przemysłu chemicznego w miastach Sanok, Tarnobrzeg, Jasło, Dębica i Nowa Sarzyna, oraz przemysłu elektromaszynowego w Rzeszowie, Krośnie, Mielcu, Sanoku i Stalowej Woli [3-6].

Sanockie Zakłady Przemysłu Gumowego STOMIL SANOK S. A. zlokalizowane są w Sanoku po obu stronach Sanu. Przedsiębiorstwo zajmuje się wyrobami gumowymi i gumowo-metalowymi dla potrzeb przemysłu motoryzacyjnego, farmaceutycznego, maszynowego, budownictwa oraz sprzętu AGD. Dopuszczalna wartość emisji ścieków została określona kolektorami lewobrzeżnym i prawobrzeżnym do rzeki San.

Zostały również określone miejsca zrzutu ścieków oraz monitoring odprowadzanych ścieków. Pracownicy zakładu co dwa miesiące kontrolują wskaźniki $BZT_5$, CHZT, pH, zawiesiny ogólne, azot amonowy, azot ogólny, azot azotynowy, węglowodory ropopochodne oraz substancje ekstrahujące się eterem naftowym.

Wytwórnia Sprzętu Komunikacyjnego „PZL–Rzeszów" S.A. zajmuje się produkcją różnych elementów lotniczych oraz jednostek napędowych. Zakład posiada własną oczyszczalnię ścieków. Szczególnie niebezpieczne ścieki pogalwaniczne oczyszczane są za pomocą odwróconej osmozy, wymienników jonitowych oraz destylacji próżniowej. Co najmniej dwa razy w roku muszą być przeprowadzane badania wpływu instalacji na wody podziemne, w których sprawdzone będzie pH, amoniak, azotyny, azotany, chlorki, przewodność elektryczną, fluorki, siarczany, żelazo, mangan, cyjanki, glin, ogólny węgiel organiczny, węglowodory chlorowane oraz poziom zwierciadła wód podziemnych.

Firma Oponiarska Dębica S. A. zajmuje się produkcją opon samochodowych dla wszelkich rodzajów pojazdów. Firma jest największym zakładem pracy w województwie podkarpackim.

Systematycznie powinny być przeprowadzane pomiary wskaźników z częstotliwością przynajmniej raz na dobę. Pomiar aldryny i heksachlorocykloheksanu należy przeprowadzać z równoczesnym pomiarem wody powierzchniowej [7].

ICN Polfa Rzeszów S.A. stanowi fragment międzynarodowego koncernu farmaceutycznego. Zajmują się produkcją leków oraz ochroną zdrowia ludzi na całym świecie. Cechują się wysoką jakością produktów, odpowiedzialnością oraz świadczeniem usług wedle potrzeb klienta [8].

„SANWIL" S.A. w Przemyślu zajmuje się produkcją materiałów tapicerskich dla krzeseł, foteli i sof. Przeprowadzają produkcję materiałów obiciowych typu skay, polstram, plawil, skiltex [9]. Pomiar jakości ścieków prowadzony jest w układzie miesięcznym.

## 3. Analiza i wyniki zanieczyszczeń pochodzących od zakładów przemysłowych na terenie województwa podkarpackiego

Lata 2009-2013 charakteryzuja się tendencją spadkową związaną z produkcją ścieków przemysłowych wymagającą oczyszczania.

Największa produkcja ścieków przemysłowych znajduje się w okolicach Tarnobrzegu, Rzeszowa, Dębicy, Stalowej Woli, Jasła, Mielca i Jedlicza. Zlokalizowane są tam największe i najbardziej znaczące zakłady przemysłowe w województwie. W 2013 r. jedynie w Dębicy wystąpił wzrost ścieków, w pozostałych miastach nastąpiło zmniejszenie wytworzonych ścieków. Największy spadek odnotowano w okolicach Tarnobrzegu, w porównaniu z 2009 r., gdzie produkcja ścieków była największa, róznica wynosi 7400 $m^3$ ścieków oczyszczonych. Przyczyną było zaprzestanie odprowadzania wód zasolonych przez Kopalnię Siarki „Machów" S.A.

Na terenie województwa podkarpackiego znajduje się 31 zakład przemysłowy, które są wyposażone w własną oczyszczalnię ścieków [10].

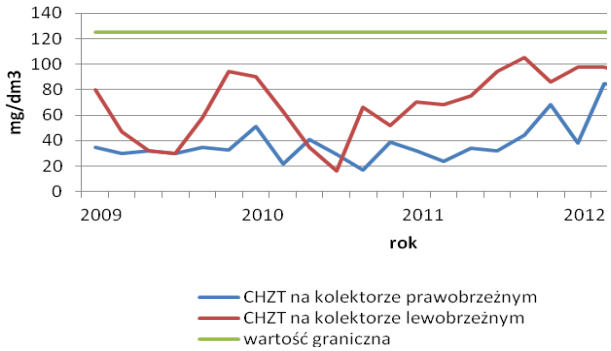
### 3.1. Analiza ścieków przemysłowych w Sanockich Zakładach Przemysłu Gumowego „STOMIL SANOK" S.A.

Na rys. 1-3 pokazane zależności ilości zanieczyszczeń w ściekach przemysłowych od wartości granicznej.

Wartość wskaźnika nie została przekroczona, co świadczy o odpowiednim oczyszczaniu ścieków przemysłowych. Wzrost odnotowany w ostatnich latach związany jest z większą produkcją materiałów gumowych.

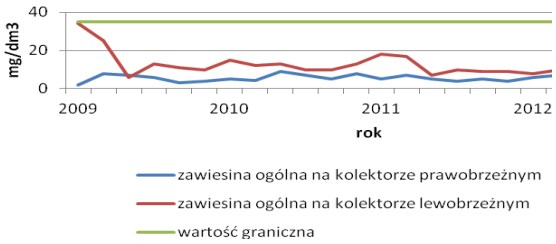
Wartości normatywne nie zostały przekroczone. Ścieki przemysłowe zawierają niski poziom danego parametru. Odpowiednio oczyszczone nie stanowią zagrożenia dla odbiornika.

Chemiczne zapotrzebowanie na tlen mieści się w wartościach dopuszczonych przez wojewodę podkarpackiego w pozwoleniu zintegrowanym.



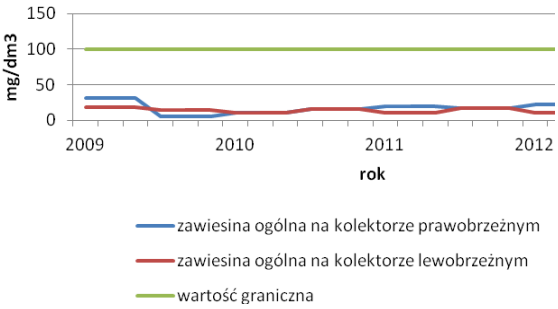

Rys. 1. Zależność wskaźnika CHZT od wartości granicznej [3-6]

Fig. 1. Dependence of rate COD from the limit value [3-6]




Rys. 2. Zależność zawiesiny ogólnej w okresie bezdeszczowym od wartości granicznej [3-6]

Fig. 2. Dependence of suspended matter in the rainless period from the limit value [3-6]

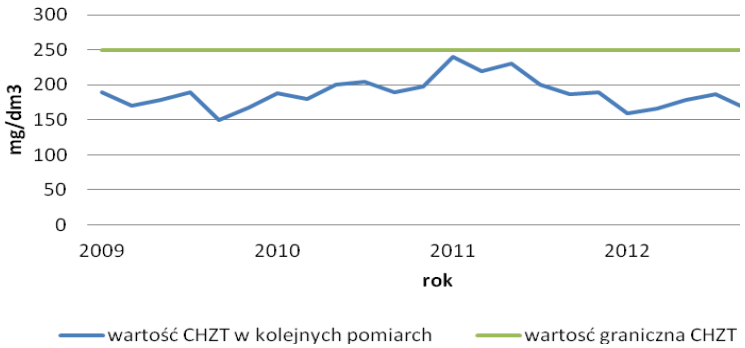



Rys. 3. Zależność zawiesiny ogólnej w okresie deszczowym od wartości granicznej [3-6]

Fig. 3. Dependence of suspended matter in the rainy period from the limit value [3-6]

### 3.2. Analiza ścieków przemysłowych w Wytwórni Sprzętu Komunikacyjnego „PZL-Rzeszów" S.A.

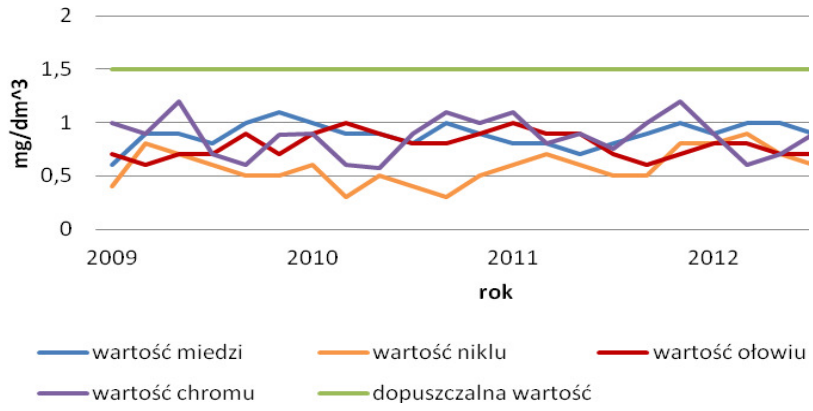
Analizując wyniki scieków cyjankowych w Wytwórni Sprzętu Komunikacyjnego „PZL-Rzeszów" S.A. nie zauważamy żadnych przekroczeń wartości dopuszczalnych. Na rys. 4-6 przedstawiono wyniki pomiarów.




Rys. 4. Zależność wskaźnika CHZT od wartości dopuszczalnej [3-6]

Fig. 4. Dependence of rate COD from the permissible value [3-6]

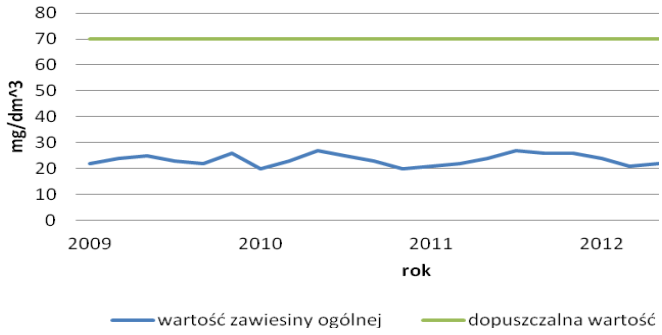
Jak widać na rys. 4, wartrość CHZT w odprowadzanych ściekach nie przekraczała wartości dopuszczalnej. Na początku 2011 r. nastąpił niewielki wzrost zaś następnie wartości malały.




Rys. 5. Zależność miedzi, niklu, ołowiu i chromu od wartości dopuszczalnej [3-6]

Fig. 5. Dependence of copper, nickel, lead and chromium from the permissible value [3-6]

Na rys. 5. zauważyć można, że wartości metali ciężkich utrzymywały się na podobnej granicy. Żadna z danych nie przekroczyła wartości dopuszczonej w pozwoleniu zintegrowanym.



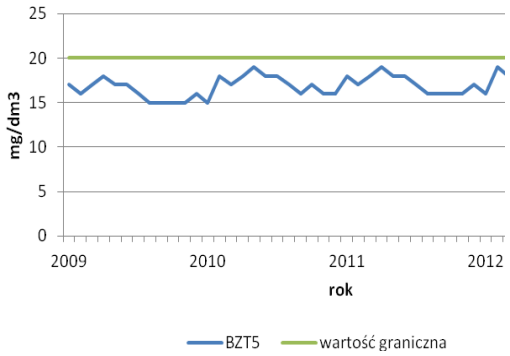

Rys. 6. Zależność zawiesiny ogólnej od wartości dopuszczalnej [3-6]

Fig. 6. Dependence of suspended matter from the permissible value [3-6]

Zawiesina ogólna utrzymywała się na stałym poziomie, dalekim od dopuszczalnego. Technologia stosowana w zakładzie pozwala na odpowiednie oczyszczenie ścieków.

### 3.3. Analiza ścieków przemysłowych w Firmie Oponiarskiej Dębica S.A.

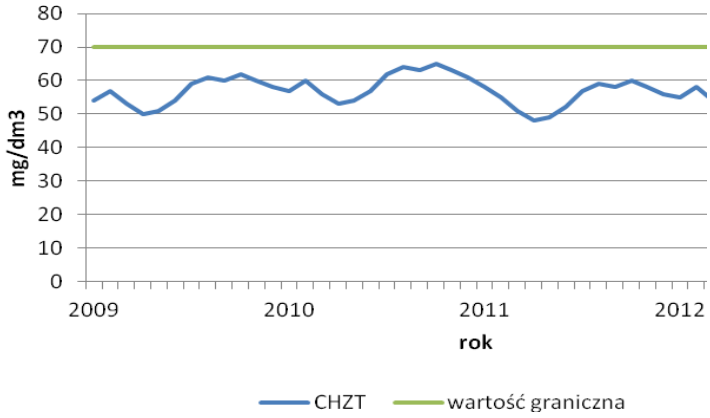
Rys. 7-9 przedstawiają dopuszczalne wartości oraz wartości otrzymywane z pomiarów uśrednione do miesiąca dla Firmy Oponiarskiej Dębica S.A.




Rys. 7. Zależność wskaźnika BZT5 od wartości dopuszczalnej [3-6]

Fig. 7. Dependence of rate BOD5 from the permissible value [3-6]

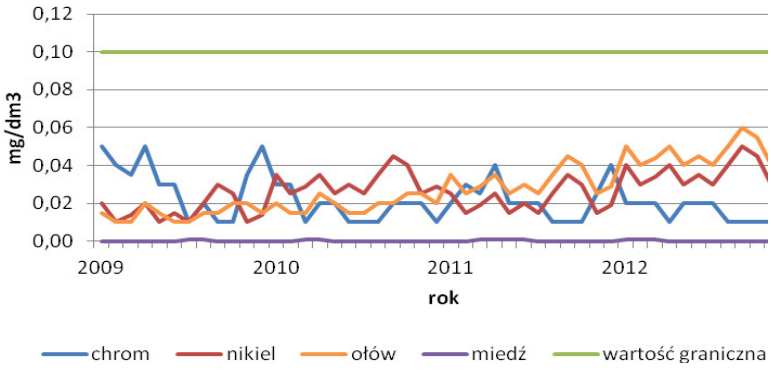
Firma Oponiarska w Dębicy nie wykazała przekroczeń dla $BZT_5$. W połowie 2012 r. wartości te były zbliżone do wartości dopuszczalnej jednak nie została ona przekroczona. Następnie w kolejnych miesiącach odnotowano spadek.




Rys. 8. Zależność CHZT od wartości dopuszczalnej [3-6]

Fig. 8. Dependence of rate COD from the permissible value [3-6]

Dla parametru jakim jest chemiczne zapotrzebowanie na tlen nie wykazano przekroczeń dopuszczalnej wartości. Ścieki przemysłowe powstałe w firmie oponiarskiej są dostatecznie oczyszczane.

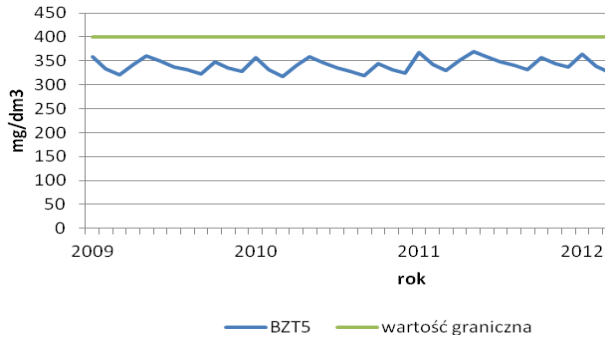



Rys. 9. Zależność chromu, niklu, ołowiu, i miedzi od wartości granicznej [3-6]

Fig. 9. Dependence of chromium, nickel, lead and copper from the permissible value [3-6]

Metale ciężkie powstające przy produkcji i obróbce gumy zostały odpowiednio zneutralizowane ze ścieków tak, że nie stanowią zagrożenia dla środowiska, a ich wartość nie przekracza 0,1 mg/dm$^3$ ścieków.

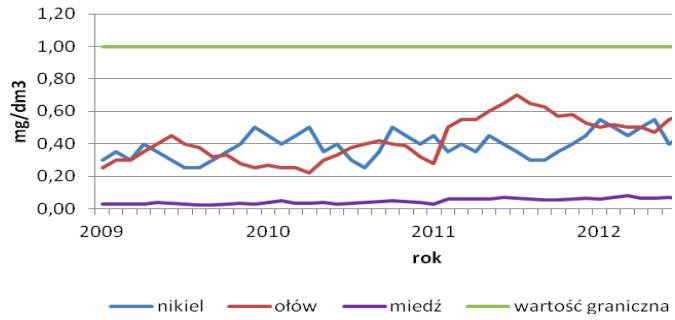
Rys. 10 obrazuje skokowe zmiany parametru $BZT_5$ w ściekach poddanych oczyszczeniu. Właściwości te wiążą się z wykonywaną technologią w zakładzie farmaceutycznym.




Rys. 10. Zależność wartości BZT5 od wartości dopuszczalnej [3-6]

Fig. 10. Dependence of rate BOD5 from the permissible value [3-6]

Wartości CHZT utrzymują się na stałym poziomie a jej ilość nie przekracza wartości dopuszczalnej w pozwoleniu zintegrowanym. Ścieki przemysłowe zatem są odpowiednio poddawane oczyszczaniu (rys. 11).




Rys. 11. Zależność niklu, ołowiu i miedzi od wartości dopuszczalnej [3-6]

Fig. 11. Dependence of nickel, lead and copper from the permissible value [3-6]

Zawartość miedzi w ściekach oczyszczonych jest bliska zeru. Ilość niklu i ołowiu jest nieco wyższa i zmienna na przestrzeni lat. W 2009-2010 rr. wartości te były mniejsze zaś od 2011 roku wzrastały. We wszystkich innych parametrach nie odnotowano przekroczeń, a ich wartości utrzymywały się na stałym poziomie.

## 4. Podsumowanie

Co stosuje się Podkarpacia, to sytuacja wód powierzchniowych jest w dość złym stanie. Wody te są nie dobrej czystości, a niekiedy nie spełniają żadnych wymogów i stanowią wody pozaklasowe. Związane jest to z rozwojem gospodarczym oraz wprowadzeniem do nich ścieków komunalnych i przemysłowych.

Ścieki powstałe w fabrykach są poddawane odpowiednim procesom oczyszczania, gdyż nie wystąpiło przekroczenie dopuszczalnych norm. W celu dalszego zmniejszenia poszczególnych wartości należałoby zastanowić się nad unowocześnieniem technologii stosowanych przy oczyszczaniu danych ścieków lub np. zwiększenie czasu przebywania w osadnikach w celu zmniejszenia ilości zawiesiny ogólnej, CHZT oraz $BZT_5$.

Najwięcej ścieków wyprodukowała Firma Oponiarska w Dębicy. Ścieki te charakteryzują się znaczną zawartością metali ciężkich takich jak: ołów, miedź, nikiel i chrom. Związane jest to z produkcją, jaka odbywa się w fabryce. W celu ich usunięcia przed wprowadzeniem do zlewni stosuje się zbiorniki retencyjny, osadnik trójkomorowy wraz z mechanicznym zgarniaczem osadów. Oczyszczone ścieki kierowane są do rzeki Wisłoki.

Zawartością metali ciężkich charakteryzują się również ścieki w Wytworni Sprzętu Komunikacyjnego „PZL–Rzeszów" S.A. Wyniki nie przekroczyły dopuszczalnej normy jednak ich zawartość znacząco wpływa na jakość rzeki Wisłok. Najnowsze technologie, jakie zostały zastosowane w oczyszczalni ścieków, pozwalają na znaczne ich usuniecie. Urządzenia takie jak wymienniki jonitowe, urządzenia do odwróconej osmozy oraz urządzenia do destylacji próżniowej i utlenianie ścieków cyjankowych pozwalają na ograniczenie emisji ładunku w ściekach.

Fabryka „SANWIL" S.A. w Przemyślu charakteryzuje się znaczną zawartością w ściekach zawiesiny ogólnej. Wartości te są bliskie 400 mg/dm$^3$. Wyniki nie przekroczyły wartości normatywnych jednak ich ilość stwarza poważne zagrożenie dla rzeki San. Ważny jest prawidłowy monitoring ścieków zgodny z obowiązującymi normami i metodykami oraz ich rejestracja a także przechowywanie.

Analizowane ścieki z fabryki ICN Polfa Rzeszów S.A. charakteryzowały się znaczną ilością siarczanów i chlorków. Związane jest to z produkcją leków i używanych tam składników chemicznych. W przepisach szczególnych zakładu opisano metodykę wykonywania pomiarów ścieków przemysłowych.

## Literatura

[1] Corbitt R.A.: „Standard handbook of environmental engineering"; McGRAW–HILL; 2012, s. 205-356.

[2] Neverova–Dziopak E.: „Ekologiczne aspekty ochrony wód powierzchniowych", Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007, s. 7-22.

[3] Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska: Raport o stanie środowiska w województwie podkarpackim w 2009 r., 2010, s. 48-79.

[4] Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska: Raport o stanie środowiska w województwie podkarpackim w 2010 r., 2011, s. 35-84.

[5] Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska: Raport o stanie środowiska w województwie podkarpackim w 2011 r., 2012, s. 32-75.

[6] Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska: Raport o stanie środowiska w województwie podkarpackim w 2012 r., 2013, s. 52-107.

[7] Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska: Pozwolenie zintegrowane dla Firmy Oponiarskiej Dębica S.A., Rzeszów, 2006.

[8] Dymaczewski Z., Jeż–Walkowiak J.: „Water supply and water guality", Poznań: Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych. Oddział Wielkopolski, 2012, s. 27-533.

[9] Wojewódzki Inspektorat Ochrony Środowiska: Pozwolenie zintegrowane dla „SANWIL" S.A. w Przemyślu., Rzeszów, 2007.

[10] Rak J., Boryczko K.: Metoda oceny zagrożenia ujęć wód podziemnych, Aktualne zagadnienia w uzdatnianiu i dystrybucji wody, red. I. Zimoch, W. Sawiniak, Politechnika Śląska, Instytut Inżynierii Wody i Ścieków, Gliwice, 2013, s. 147-155.

## THE PRINCIPLE OF THE PROTECTION OF SURFACE WATER AND GROUNDWATER AGAINST POLLUTION FROM INDUSTRIAL PLANTS IN THE CARPATHIAN

**S u m m a r y**

In this article presents analysis of the issues associated with the protection of surface water and groundwater against pollution, to the origin of industrial establishments in the Carpathian province. The biggest is water pollution of surface water, mainly rivers. The reason for this is mainly industrial and municipal waste water discharges and leaching of fertilizers. In the Carpathian province there are several large industrial establishments, in which the applied technology contributes to the formation of pollutants, mainly surface water. The factory having a special industrial waste-water treatment technology to reduce to the desired degree of the content of heavy metals, sulphates, chlorides, hydrocarbons, phenols and other organic and inorganic pollutants. The discharge of sewage into the water is associated with a change in its properties and effects on fauna and flora. Then in the process of self-cleaning comes to the distribution of pollutants. The Carpathian province has freshwater resources in the from of rivers, lakes and deep waters. Their quantity is dependent on how it is used, geographic location, climate. On the basis of an analysis of the status of surface water and groundwater and the example of water pollution selected companies shows that the situation of surface water is in quite poor condition. These waters are not good, and sometimes do not meet any of the requirements and are outside of class water. This is connected with economic development and an introduction to municipal and industrial waste water. Waste water arising in factories are subject to the appropriate processes, because it does not limit exceedance of standards. In order to further reduce the individual values would consider revising technology used when cleaning or data eg. Increasing time reside in the inhabitants in order to reduce the amount of suspended matter.

**Keywords:** protection, groundwater, surface water, pollution, industrial plants

DOI:10.7862/rb.2016.195

*Przesłano do redakcji: 15.08.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 151-158

**Marek KAMIENIARZ**[1]

# NOWATORSKIE I EKOLOGICZNE BUDOWNICTWO Z GLINY

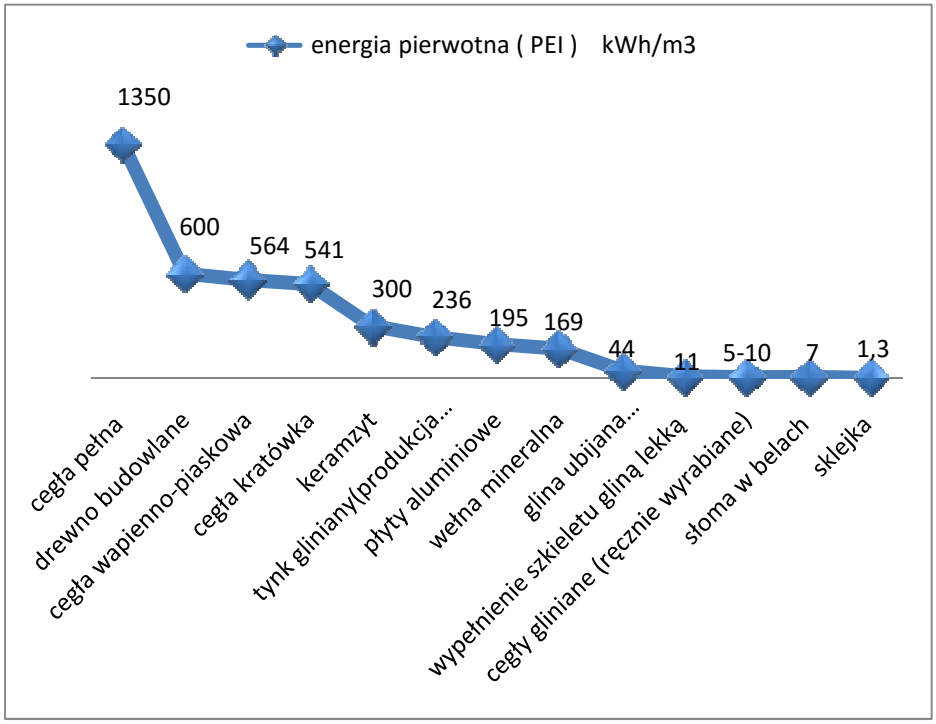
W opracowaniu nakreślono zarys budownictwa naturalnego , pokazując najistotniejsze właściwości materiałów ekologicznych w odniesieniu do energii pierwotnej. Przedstawiono charakterystykę słomy i gliny jako materiału budowlanego. Opisano dwa przykłady technik wznoszenia budynków mieszkalnych z gliny, obecnie bardzo popularnych w Polsce i na świecie. Szczególnie zwrócono uwagę na metodę wznoszenia ścian z mieszanki gliny i słomy w deskowaniu tynkowanych gliną, pokazując ją na przykładzie budynku w Karniowicach. Przedstawiono także technologię wznoszenie ze słomy w nowatorskiej metodzie, przy pomocy modułów drewniano-słomianych tynkowanych gliną.

**Słowa kluczowe:** naturalne budownictwo, glina, słoma, energia pierwotna

## 1. Wstęp

Termin budownictwo ekologiczne nie jest jeszcze zbyt popularny w Polsce, jak również w Europie. Używa się go często jako przykład budownictwa wykorzystującego naturalne materiały budowlane, tzn. zdrowe i energooszczędne. Budownictwo ekologiczne wysoko ceni materiały jak najmniej przetworzone więc takie, które mają jak najmniejszą energię pierwotną (PEI) czyli energię, która jest potrzebna do produkcji materiału budowlanego [1]. Energia ta zawiera wszystkie procesy transportowe i produkcyjne potrzebne do uzyskania gotowego produktu. Bardzo niskie wartości PEI mają przede wszystkim materiały naturalne, natomiast produkty otrzymane przemysłowo-wyższe. Na poniższym rys.1 podano wartości PEI dla wybranych materiałów budowlanych, porównując je z produktami naturalnymi. Odczytując wartości liczbowe poszczególnych materiałów widzimy, że budownictwo ekologiczne używając produktów naturalnych znacznie mniej zanieczyszcza otoczenie naturalne niż budownictwo konwencjonalne, oparte na materiałach przetworzonych.

[1] Marek Kamieniarz , Politechnika Krakowska, Zakład Budownictwa i Fizyki Budowli , ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; tel. 126282152; marek109@vp.pl




Rys. 1. Porównanie niektórych materiałów budowlanych w zależności od energii pierwotnej

Fig. 1. Comparison few building's materials depending on primary energy

## 2. Krótki rys historyczny budownictwa naturalnego

Już w kulturze starożytnej głównymi budulcami stosowanymi powszechnie w budownictwie były surowce naturalne z bezpośredniego otoczenia terenu budowy – głównie kamień, ziemia, drewno i glina. Budowano wówczas ściany z łączonych pionowo i poziomo elementów drewnianych, wypełnianych np. słomą, trzciną czy gliną [2]. Następnie na siatkę rzucano z obu stron kilku centymetrową warstwą gliny. Obecnie spotyka się jeszcze tą technikę budowania w krajach Afryki. Natomiast w krajach wysoko rozwiniętych, technika ta doczekała się mocno udoskonalonej wersji. Przykładem tego może być metoda prasowanej słomy wypełniającej szkielet drewniany, otynkowanej obustronnie tynkiem z gliny. Została ona zastosowana po raz pierwszy pod koniec XIX wieku w stanie Nebraska w USA. Jednak dopiero w latach 90 XX wieku w Europie i USA nastąpił powrót do tego sposobu budownictwa, głównie z powodu wzrastającej konieczności ochrony środowiska i kryzysu energetycznego. Sytuacja ta spowodowała wprowadzenie nowoczesnych rozwiązań technicznych, także w Polsce, gdzie w 1962 roku wydany został komplet norm dla budownictwa glinianego, aktualny do dziś.

# 3. Wstęp do charakterystyki materiału naturalnego

Budownictwo ekologiczne wysoko ceni materiały jak najmniej zmienione, przykładem tego może być drewno budowlane – ale także materiały naturalne: jak słoma czy glina. Badania naukowe dowiodły, że materiałem w który warto inwestować jest słoma, mająca bardzo dobre parametry techniczne.

## 3.1 Podstawowe specyfikacje techniczne słomy

Słoma jest surowcem odnawialnym pochodzenia roślinnego - organicznego. Jest wyrobem ubocznym produkcji roślinnej w gospodarstwach rolnych. Zgodnie z Małą Encyklopedią Rolniczą [3] słoma to dojrzałe lub wysuszone źdźbła roślin zbożowych, strączkowych, lnu, rzepaku. Głównym składnikiem jej jest włókno surowe i związki bezazotowe wyciągowe. W Polsce rocznie produkuje się około 25-33 mln ton słomy [4,5]. Podstawowym kierunkiem wykorzystania słomy jest jej zagospodarowanie w rolnictwie. Jednak po odliczeniu zapotrzebowania na ściółkę i paszę oraz niezbędnej ilości na przyoranie, pozostają znaczne nadwyżki słomy, które według różnych źródeł określa się na poziomie ok. 8-12 mln ton rocznie co stwarza możliwość wykorzystania ich np. w budownictwie. Tymczasem nie ma żadnych uregulowań prawnych dotyczących kostki ze słomy, nie jest zaaprobowana jako wyrób budowlany, a technologia strawbale nie posiada normy technicznej. Można jedynie odnaleźć kilka informacji na temat stosowania słomy w budownictwie zawartych w normach z lat 60-tych, gdzie figuruje ona jako dodatek organiczny (wypełniacz) do mas glinianych lub cementowo glinianych. Dlatego polscy projektanci, inwestorzy bazują przede wszystkim na zagranicznych normach pod kątem zastosowania słomy jako materiału budowlanego. I tak w Niemczech na podstawie danych firmy FASBA [6], testach laboratoryjnych przeprowadzonych na kostkach słomy w poniższych jednostkach:

– testy właściwości akustycznych – w IAB w Oberursel,
– testy właściwości termicznych – w FIW Munchen,
– testy odporności pożarowej – w IBMB w Braunschweig,
– testy nośności ściany konstrukcyjnej z kostek słomy – w FEB Universitat Kassel,
– testy wilgotnościowe, biologiczne – w IBP Fraunhofer w Stuttgart oraz w ZUB.

Uzyskano aprobatę techniczną jako wyrób budowlany, a technika tynkowanej ściany z kostek słomy uzyskała generalną aprobatę techniczną i została dopuszczona do stosowania na rynku niemieckim. Poniżej pokazano kilka charakterystyk technicznych na podstawie Z-23.II-1595 - niemieckiej generalnej aprobaty technicznej [7] dla kostek słomy w zestawie z konstrukcją drewnianą jako wypełnienie ścian w różnych wariantach wykończenia powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej przegrody:

$\lambda$ = 0,052 W/(mK) - w poprzek włókien kostki słomy

$\lambda$ = 0,080 W/(mK) - wzdłuż włókien kostki słomy

R =46 dB - izolacyjność akustyczna w warunkach laboratoryjnych

R =44 dB - izolacyjność akustyczna obliczeniowa

F-30-B - certyfikowana odporność ogniowa ściany z kostki słomy tynkowanej obustronnie trójwarstwowym tynkiem glinianym o grubości 3cm.

We Francji Agencja Jakości Budownictwa (AQC) zatwierdziła normy branżowe dla konstrukcji słomianych, opracowanych przez Francuską Sieć Konstrukcji ze Słomy (RFCP) [8]. Zakres objęty niniejszymi normami to :
– funkcja rusztu dla tynku glinianego i tynku wapiennego,
– wypełnienie przegrody kostką słomianą o funkcji izolacji termicznej,
– dla masy 80-120/ $m^3$ $\lambda$ = 0,052 W/(mK) prostopadle do włókien,
– przenikalność pary wodnej : 2.

Natomiast w Wielkiej Brytanii ośrodek badawczy przy uniwersytecie w Bath opatentował technologię MODCELL [9] (Patent No. GB2457891B)33

U=0.13W/$m^2$K - dla słomy grubości 49cm

R=50dB - dla ww. ściany

A+ - klasa energetyczna wyrobu

ponad 2h - odporność ogniowa kostki słomianej + obustronny tynk wapienny 3cm

Powyższe parametry techniczne słomy wskazują jednoznacznie ,że jest to materiał budowlany, mogący rywalizować z tradycyjnymi materiałami budowlanymi.

## 4. Techniki budownictwa z gliny

Aktualnie istnieje co najmniej kilkanaście metod budownictwa glinianego, ale najbardziej rozpowszechnionych o których warto wspomnieć jest kilka :
– wznoszenie ścian z mieszanki gliny i słomy w deskowaniu,
– wznoszenie ścian z kostek słomianych tynkowanych gliną,
– ubijanie ścian monolitycznych z mieszanki lekkiej gliny z dodatkami mineralnymi,
– formowanie prasowanych cegieł wypełniających szkielet drewniany,
– zagęszczanie suchej gliny piaszczystej ze żwirem w szalunku.

W ostatnich latach zmieniły się gruntownie warunki rozwoju współczesnej nowej generacji budownictwa z gliny. Zwiększone wymagania dotyczące ochrony cieplnej budynków (tabela 1) spowodowały, że ściany konstrukcyjne z gliny stały sie grube i ciężkie, a tym samym mniej korzystne w zastosowaniu. Z tego powodu odpowiednimi obecnie metodami budowania z gliny stały się przytoczone poniżej.

### 4.1 Metoda wznoszenie ścian z mieszanki gliny i słomy w deskowaniu

Technika ta zwana również budownictwem z gliny lekkiej jest to mieszanina gliny i słomy o gęstości mniejszej niż 1200 kg/$m^3$ według DIN 18951. Jeżeli natomiast ta gęstość jest większa mówimy wówczas o glinie ze słomą. Jako skład-

Tabela 1 Wymagania izolacyjności termicznej ścian obowiązujące od 1974 r.

Table 1 Thermal insulation's requirements of wall which have applied since 1974

| **Rok budowy** | **Współczynnik przenikania ciepła U[W/m²K]** dla ściany |
|---|---|
| do 1974 | 1.42 |
| do 1982 | 1.16 |
| do 1991 | 0.75 |
| do 1998 | 0.55 |
| po 1998 | 0.5 |
| | 0.3 |
| do2013 | 0.3 |
| od 2014 | 0.25 |

nik używa się słomy żytniej, pszennej lub owsianej natomiast do tynków najbardziej nadaje się słoma jęczmienna. Ważniejsza jest jednak od rodzaju słomy struktura jej źdźbła. Dla uzyskania lepszej izolacyjności cieplnej lepiej jest zastosować słomę prostą jak najmniej pogniecioną o stabilnej łodydze, która nie została sprasowana w bele. W ostatnich kilku latach zbudowano dużo budynków mieszkalnych z lekkiej gliny, gdzie grubość ściany wahała się w granicach 30 cm. Badania wykazały, że oczekiwana niska gęstość ścian z gliny wynosząca ok. 300 do 400 kg/m$^3$ nie została osiągnięta z przyczyn:

– słoma sprasowana w belach zawiera za mało pustych przestrzeni,
– słoma zatopiona w masie jest miękka i zgnieciona, co powoduje, że masa już w fazie przygotowania i składowania zostaje stosunkowo mocno zagęszczona,
– podczas wkładania mieszanki w deskowanie następuje kolejne zagęszczanie.

Według badań przeprowadzonych przez Laboratorium Budownictwa Eksperymentalnego w Kassel (FEB) najlżejsza mieszanka wykonana z prasowanej słomy o długości zalecanej 10 do 15 cm, waży ok. 500 kg. Taka nie wykazuje wystarczającej wytrzymałości, dla np. utrzymania warstwy tynku. Dopiero przy gęstości 700 kg/m³ ściana osiąga możliwą do przyjęcia wytrzymałość. Jednak grubość takiej ściany wynosiłaby ponad 70 cm, a wartość współczynnika U=0,3W/m²K . Jest to grubość za duża z uwagi na okres schnięcia i tym samym niebezpieczeństwo zbutwienia wilgotnej słomy w deskowaniu oraz aktualną wartość współczynnika U = 0.25 W/m²K. Dlatego opcją dla gliny lekkiej jest glina z dodatkami porowatymi np. keramzyt, szkło porowate lub pumeks.

Przykładem budynku wykonanego z gliny lekkiej jest budynek mieszkalny powstały około 1994 roku w Karniowicach, obecnie w województwie małopolskim (rys.2). Pierwszym etapem budowy było wykonanie fundamentów w technologii tradycyjnej. Potem na warstwie hydroizolacji powstał szkielet drewniany, który wypełniono gliną lekką (rys.3). Następnie tak przygotowane ściany

otynkowano 3 centymetrowym tynkiem z gliny. Uzyskano grubość ściany zewnętrznej 55 cm co przy obowiązującym wówczas współczynniku U=0,55 W/m²K spełniało ówczesne wymogi izolacyjności termicznej ścian (tabe-



Rys. 2. Dom z gliny lekkiej w Karniowicach - małopolska - 1994 rok

Fig. 2. House made from light clay in Karniowice - malopolska voivodeship 1994



Rys. 3. Ściana w technologii z gliny lekkiej - stan surowy 1994r

Fig. 3. Wall made from light clay's technology - raw state 1994



Rys. 4. Dom z gliny lekkiej w Karniowicach - małopolska 2016 r.

Fig. 4. House made from light clay in Karniowice - malopolska voivodeship - 2016



Rys. 5. Odsłonięty fragment z gliny lekkiej – 2016 r.

Fig. 5. Bare part of wall made from light clay - 2016

la 1). Omawiany budynek mieszkalny jest obecnie użytkowany (rys.4), a mając ponad 20 lat jest w dobrym stanie technicznym. Ściana zewnętrzna nie wykazuje (rys.5) kurczenia się materiałów wypełniających, co spowodowałoby powstanie np. mostków termicznych, które w konsekwencji mogłyby spowodować zawilgocenie ściany. Wszystkie źdźbła słomy są dokładnie otoczone gliną, co świadczy o dokładnym zmieszaniu składników. Jak widać na powyższym przykładzie budynki budowane w tej technologii spełniają swoje założenia zarówno ekologiczne jak również ekonomiczne. Jednak przy obecnych zwiększonych wymaganiach ochrony cieplnej budynków (tabela1) ściany zewnętrzne musiałyby być szerokie, co znacznie zmniejsza ich zastosowanie w nowoczesnym budownictwie. Dlatego też najwłaściwszym sposobem budowania z gliny w polskich realiach jest budownictwo z kostek słomianych, tynkowanych gliną w systemie modularnym.

### 4.2 Metoda z kostek słomianych tynkowanych gliną – system modularny

Metoda wznoszenia budynków z bloczków słomianych i gliny jest jedną z najbardziej znanych i rozpowszechnionych w świecie w wielu wariantach. Często nazywana metodą glinosłombeli. Bezpieczeństwo konstrukcji zapewnia typowa struktura drewniana w dowolnie przyjętej formule. Słoma pełni jedynie funkcję izolacyjną (termiczną i akustyczną) oraz wypełniającą, którą następnie trzeba otynkować. Postępowym wariantem jest technika oparta na skonstruowaniu gotowych modułów o konstrukcji ramowo-drewnianej, którą następnie można składać w dowolne kształty. Szkielet drewniany zapewnia bezpieczeństwo konstrukcji, natomiast słoma pełni funkcję izolacyjną, wypełniając wewnętrzną przestrzeń modułu. Po wypełnieniu całego modułu słomą, powleka się go kilkucentymetrową warstwą gliny, tynku wapiennego lub okładziną drewnianą. W zależności od wielkości modułów wykonywanych na placu budowy metodą warsztatową lub metodą przemysłową, różnych detali montażu, lokalnych rozwiązań wypełnienia, stężania, tynkowania lub osłaniania innymi materiałami wykończeniowymi, możemy wyróżnić następujące systemy modularne ścian z kostek słomy :
– System Austriacki ,- System MODCELL,- System GREB itd.

Moduły drewniano-słomiane można wykorzystać w różnych typach budynków np.: mieszkalnych, gospodarczych. Można z nich tworzyć budynki parterowe lub piętrowe w nowoczesnej formie architektonicznej. Opracowany system pozwala na użycie sprasowanej kostki słomianej, również do konstrukcji dachów oraz podłóg. Plusem tego systemu jest możliwość przygotowania segmentów z wyprzedzeniem. Natomiast minusem pomimo stosowania taniej słomy jest cena konstrukcji drewnianej modułu.

## 5. Podsumowanie

Nasilenie budownictwa z gliny i słomy, w szczególności technologii strawbale, jest bardzo ciekawą perspektywą o silnym aspekcie ekologicznym. Domy wykonane w tej technologii mogą nie tylko spełniać rygory niskiego zużycia

energii w fazie eksploatacji, ale przede wszystkim nie wymagają zużycia dużej energii w fazie pro dukcji materiałów i wykonania obiektu. Rozpowszechnienie tej technologii może w znaczący sposób przyczynić się do redukcji emisji zanieczyszczeń gazowych i odpadów, a także emisji hałasu, wibracji promieniowania. Brakuje jednak uregulowań prawnych w zakresie technologii straw-bale w Polsce, co znacznie ogranicza jej rozwój.

## Literatura

[1] Minke G.: Handbuch Lehmbau: Baustoffkunde , Techniken, Lehmarchitektur Verlag: Ökobuch Verlag, Erscheinungsjahr:2009.
[2] Kelm T.: Architektura ziemi. Tradycja i współczesność.1996. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1996 r.:132.
[3] „Mała Encyklopedia Rolnicza".1964. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne. Warszawa 1964r.:1001.
[4] Adamczyk F., P. Frąckowiak., K. Mielec ,Z. Kośmicki . 2005. „Problematyka badawcza w procesie zagęszczania słomy przeznaczonej na opał". Journal of Research and Application in Agricultural Engineering, 50(4):4-7.
[5] Tytko Ryszard.2009.„ Odnawialne źródła energii: wybrane zagadnienia". OWG, Warszawa 2009r.:337.
[6] http://fasba.de/index.php?option=com_content&task=view&id=206&Itemid=325, {dostęp 1.06.2016}.
[7] Z-23.11-1595 (03.06.2014) Wärmedämmstoff aus Strohballen „Baustrohballen". All gemeine bauaufsichtliche Zulassung. Deutsches Institut für Bautechnik: 9.
[8] http://www.compaillons.eu/blog-rfcp/articlelemoniteurfr, {dostęp 1.06.2016}.
[9] http://www.modcell.com/files/2712/8506/9649/balehaus_case_study.pdf {dostęp 1.06.2016}.

## INNOVATORY AND ECOLOGICAL CLAY'S BUILDING

**S u m m a r y**

In study shown natural building focused on crucial properties of ecological materials in reference to primary energy. Presented description of straw and clay as building material. Described two methods of rising houses made from clay, which are very popular in the word. There were special emphasis took under method of rising walls made of clay and straw in boarding, plastered clay, which were shown by the example house in Karniowice. Presented also rising structures made fron straw in innovatory method with wooden-straw method plastered clay.

**Keywords:** natural building, clay, straw, primary energy

DOI:10.7862/rb.2016.196

*Przesłano do redakcji: 01.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 159-167

**Justyna KLESZCZ**[1]

# FARMA MIEJSKA JAKO NOWY SPOSÓB KSZTAŁTOWANIA KAMERALNYCH PRZESTRZENI MIESZKANIOWYCH. ANALIZA SPOSOBÓW I BARIER WDROŻENIA

Miejskie rolnictwo pojawiło się w Europie jako odpowiedź na potrzebę bliższego kontaktu z naturą wśród mieszkańców miast, nie tylko w sposób bierny, poprzez wykorzystywanie już istniejących zasobów, lecz również w sposób czynny - jako sposób na kreowanie najbliższego środowiska między innymi dzięki własnoręcznej produkcji żywności. Farmy miejskie stanowią w tym przypadku element łączący miasto z jego "produktywną" alternatywą, tworząc możliwość budowy przestrzeni mieszkalnych o nowej jakości. Wraz z rozwojem rolnictwa miejskiego pojawiły się również nowe formy kształtowania niewielkich osiedli mieszkaniowych opartych na zasadach współużytkowania przestrzeni przez wybraną grupę ludzi lub jako atrakcyjny "dodatek" do ekskluzywnych osiedli w ścisłych centrach miast. Tego typu rozwiązania stwarzają szerokie pole do rozwoju nowych form urbanistycznych, łączących w sobie przestrzenie mieszkaniowe i rekreacyjne miast, jako miejsca integracji międzygatunkowej. Przykład holenderskiego miasta Almere ukazuje sposób kształtowania przestrzeni mieszkalnej człowieka na zasadach współistnienia z naturą w skali makro - poprzez tworzenia całych dzielnic - farm, jak w wypadku nowopowstającej Almere Oosterword. Na tym tle sytuacja Polski nie wygląda dobrze. Analiza samych uwarunkowań prawnych wykazała istnienie barier, które praktycznie uniemożliwiają rozwój krajowych farm miejskich na skalę, jaką znamy z realizacji europejskich.

**Słowa kluczowe:** przestrzeń międzygatunkowa, farmy wertykalne, miejska agrokultura, zamieszkanie ze zwierzętami

## 1. Wprowadzenie

Gwałtowny rozwój techniki oraz jej szybkie i nieodwracalne wkroczenie w życie człowieka spowodowało rewolucję w codziennym funkcjonowaniu. Już w początkach XIX wieku człowiek, którego zaczęły otaczać coraz to nowe, oraz trudniejsze do zrozumienia zdobycze techniki, zaczął pragnąć powrotu

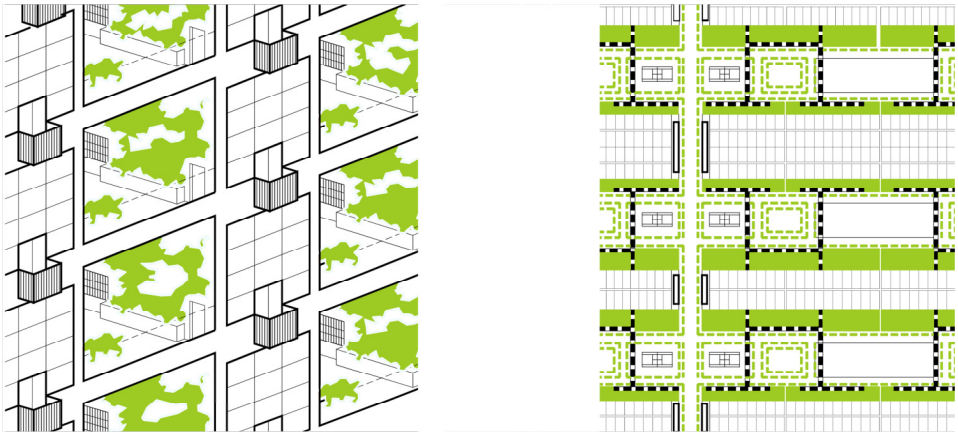
[1] Justyna Kleszcz, Uniwersytet Zielonogórski, Wydział Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska, Katedra Architektury i Urbanistyki, ul. Szafrana 1, 65-516 Zielona Góra; tel. 68 328 23 08; j.kleszcz@aiu.uz.zgora.pl

do życia prostego, samowystarczalnego, zbliżającego go do prostoty wymarzonego raju, arkadii. Mieszkańcy miast zapragnęli ponownego zbliżenia z naturą. Konsekwencje tych pragnień były różnorakie. Od przebudowy miast w celu rozluźnienia ich struktury, po tworzenie nowych założeń wychowania z bliższym kontakcie z przyrodą. Jednym z najnowszych sposobów na zbliżenie do natury w mieście jest powstanie i rozwój idei farmy miejskiej.

## 2. Historia

Pierwsze wizje miasta tak ściśle zespolonego ze strukturami agrarnymi sięgają XIX wieku i idei howardowskiego miasta - ogrodu [1] poprzedzonego wizją Nowej Atlantydy Francisa Bacona, stanowiących połączenie płaszczyznowej formy architektury mieszkaniowej z podobnie jednopłaszczyznową zielenią. Niedługo potem powstały pierwsze wizje łączące wertykalne, spiętrzone formy zamieszkania z uprawą roślin użytkowych. Z 1922 r. pochodzi niezrealizowany projekt le Corbusiera "Immeubles - villas". (rys. 1) Zamknięty kwartał w zabudowie galeriowej, z dwupoziomowymi mieszkaniami posiadał wolne przestrzenie - przynależne do każdego z mieszkań prywatne ogrody uprawne. Jako uzupełnienie tego założenia powstał w 1925 r. projekt "Cité jardin", który zakładał stworzenie pomiędzy kwartałami prywatnych terenów uprawnych przynależnych mieszkańcom oraz terenów sportowych dla rekreacji w bezpośrednim sąsiedztwie zamieszkania [2].

Za pierwsze współczesne w formie farmy miejskie uznaje się, powstałe w wyniku kryzysu ekonomicznego z lat 70-tych w Wielkiej Brytanii londyńskie Kentish Town City Farm (1972 r.) oraz Hackney City Farm (1984 r.) [3], [4], stanowiące przykład zabudowy zagrodowej, zaimplementowanej do miasta.



Rys. 1. Le Corbusier, niezrealizowane projekty Immeubles-villas z 1922 r. oraz Cité jardin z 1925 r. - fragment ogrodów uprawnych

Fig. 1. Le Corbusier's unrealized projects: Immeubles-villas from 1922 and Cité jardin from 1925 - a part of apartment - gardens

Stałe zmniejszanie się zasobów żywności oraz wzrost poziomu urbanizacji spowodowały potrzebę powrotu do produkcyjnej formy samowystarczalnego miasta. Wprowadzenie w jego strukturę, zarezerwowanego w przeszłości dla produkcyjnego aspektu wsi, założenia farm oraz stworzenie nowej formy rolnictwa, które mogłyby powstać na terenach miejskich bez zaburzania antropogenicznego i kulturowego charakteru miasta stały się koniecznością. Nowa forma zabudowy, która powstaje poprzez swoją nietypową dla struktur zurbanizowanych funkcję, staje się nośnikiem wszelkich pomysłów związanych z kulturą rolną i zrównoważonym rozwojem środowiska miejskiego. Staje się to poprzez, m.in. wprowadzenie otwartości, jako jednej z głównych cech przestrzeni, dostępności dla lokalnej społeczności, poszerzenie programu funkcjonalnego farm miejskich o elementy stałego zamieszkania, edukacji, ekologii, terapii poprzez kontakt z naturą i in.

## 3. Podstawowe dane

### 3.1. Definicja farmy miejskiej

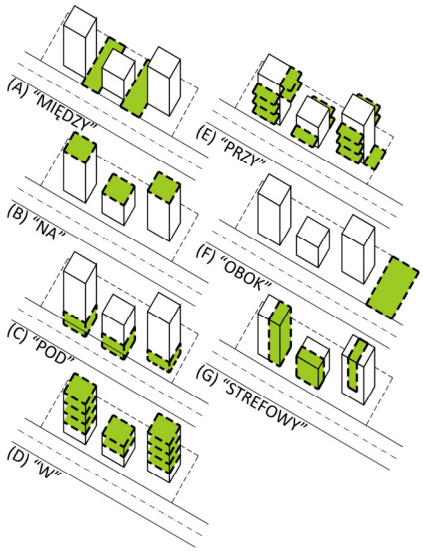
Wg definicji rolnictwo miejskie to rodzaj praktyki uprawy, przetwarzania i dystrybucji żywności, która następuje w/lub wokół wioski, małego, średniego lub dużego miasta. Rolnictwo to może obejmować hodowlę zwierząt, akwakulturę, zagospodarowanie terenów rolno-leśnych, pszczelarstwa i ogrodnictwa [5]. Pojęcie rolnictwa miejskiego nieco różni się od pojęcia i definicji miejskiej agrokultury, która opisuje zagadnienie produkcji żywności w miastach w sposób odmienny, zakładający, że miejska agrokultura jest to wytwarzanie żywności na obszarze miast [6] lub uprawa roślin i chów zwierząt na terenie miast oraz wokół nich [7]. Definicje te ulegają również poszerzeniu, określając produkcję rolną w miastach jako "*działalność w zakresie wytwarzania, przetwarzania i dystrybucji produktów żywnościowych, nieżywnościowych, chowu zwierząt oraz upraw leśnych na terenie miast oraz obszarów podmiejskich"* [8].

### 3.2. Systematyka rolnictwa miejskiego

Powyższe definicje rolnictwa miejskiego stanowią podstawę do usystematyzowania funkcjonalnego i strukturalnego typów obecnie powstających farm i ogrodów miejskich. Na wstępie trzeba jednak zaznaczyć jeszcze istotną różnicę, która występuje pomiędzy pojęciem miejskiego ogrodnictwa, w którym dominującą funkcją jest uprawa roślin, a zwierzęta stanowią jedynie uzupełnienie tej funkcji, od farm miejskich, gdzie hodowla i uprawa występują równocześnie, często z dominującą rolą chowu zwierząt gospodarskich. Wśród różnorodnych form, jakie przybiera miejskie rolnictwo, można wydzielić w szczególności podstawowe grupy wynikające z rodzaju prowadzonych upraw, techniki upraw, rodzaju hodowli, czy wreszcie rodzaju zajmowanej przestrzeni [9]. W wypadku próby łączenia funkcji farmy i zamieszkania w mieście istotna

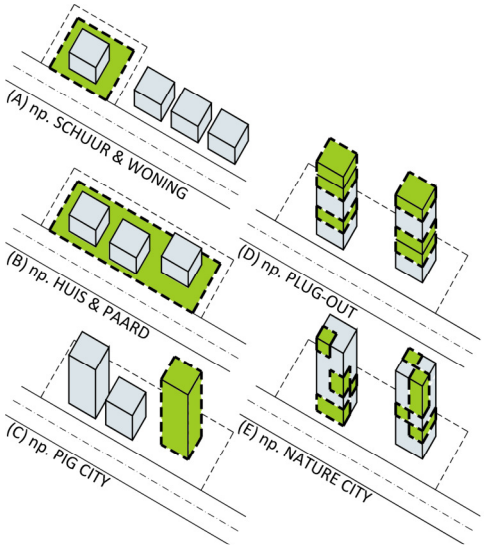
staje się lokalizacja części uprawnej i hodowlanej w stosunku do całości założenia. Podobnie ważne będzie rozróżnienie przestrzeni wydzielonych, uprawianych "pod nadzorem" lub zintegrowanych ze strukturą osiedla.

Wyraźny podział zaznacza się również w wypadku stopnia przynależności części uprawnej do mieszkańców. Może ona stanowić własność i być wyłącznie przez nich użytkowana, stanowiąc jednocześnie silne zdefiniowanie sposobu życia i przynależności grupowej. Nie jest tak jednak zawsze. W założeniach bardziej rozbudowanych zakłada się dowolność korzystania z części uprawnej i hodowlanej osiedla, poprzez dzierżawę lub usytuowanie obrzeżne, peryferyjne lub inne, które nie wymusza współużytkowania przez wszystkich mieszkańców. Istnieje również taki rodzaj przestrzeni mieszkalnych, które działają niezależnie od części uprawnej, ta zaś może być wykorzystywana przez miejskich hodowców całkowicie niezwiązanych z danym osiedlem (rys. 2).




Rys. 2. Schemat lokalizacji farm miejskich w tkance urbanistycznej miast

Fig. 2. Location scheme of urban farms in the city




Rys. 3. Typologia miejskich farm mieszkalnych, a ich położenie w strukturze osiedla

Fig. 3. Typology of housing urban farms, and their location in settlement structure

Farma miejska już u zarania swojego powstania była związana ze sposobem zamieszkania różniących się od form historycznych. Obecnie przybiera ona wiele form, różnych pod względem formalnym, jak i funkcjonalnym, nadając im charakter ekstensywny lub intensywny w zależności od lokalizacji w mieście. Nadal podstawowym rozwiązaniem jest pozostawienie pojedynczych farm, stanowiących jednostki mieszkalne, często z domami jednorodzinnymi wewnątrz struktur o jednorodnym charakterze (rys. 3 A). Rozwinięciem takiego

ekstensywnego układu jest wydzielenie niewielkich osiedli (rys. 3 B). W skrajnych przypadkach podejmowane są jednak próby tworzenia całych dzielnic w oparciu o taki właśnie typ przestrzeni, jak w wypadku Almere Oosterword - idei Agromere autorstwa wspominanej tu często pracowni MVRDV [10]. Intensywniejszą zabudowę, właściwą dla ośrodków centralnych w miastach można uzyskać poprzez stworzenie zespołów, w których funkcje zostają wydzielone punktowo w ramach jednego założenia, tworząc osobno typową zabudowę mieszkaniową wielorodzinną oraz zgrupowane, wydzielone przestrzenie przeznaczone na intensywną uprawę i chów (rys. 3 C). Takie strefowanie występuje np. w wypadku koncepcji Pig Farm autorstwa MRDV. Obecnie najszerzej dyskutowanymi wariantami połączenia funkcji mieszkalnej i rolnej są formy skupiające obie funkcje w zwartych, wysokich budynkach. Nawiązują one często do formy zabudowy kwartałowej lub wysokościowej, tworząc niezależne megastruktury mieszkalno - uprawne. Pod względem funkcjonalnym dzielą się one na układy z wertykalną segregacją funkcji oraz z oboma funkcjami rozmieszczonymi równomiernie (rys. 3 D, E). Do najnowszych przykładów studialnych opracowań tego typu należą Plug - Out pracowni WORK ac z 2009 r. jako propozycja dla centrum Nowego Jorku, Aberrant Architecure dla Chicago autorstwa Scotta Johnsona z 2010 r., czy propozycja Vincenta Callebaut dla indyjskiego miasta Jaypee z 2016 r., czy wreszcie Homefarm w Singapurze pracowni SPARK z 2015 r.

Istotnym elementem analizy jest również określenie genezy powstania osiedla - farmy. Farma mieszkalna może powstawać jako samoistna, wcześniej zdefiniowana przestrzeń, jako element układu wielofunkcyjnego albo wtórnie - jako sposób rewaloryzacji przestrzeni mieszkalnej istniejącej. Największy potencjał wydaje się mieć w tym przypadku, oprócz rozwiązań powstających na surowym korzeniu - tworzenie farm zintegrowanych z zabudową mieszkaniową, a powstałych poprzez nadbudowę, czy przebudowę istniejących obiektów. Znaczenie farm w procesie rewaloryzacji poprzez dużą elastyczność możliwych rozwiązań powoduje, że projekty takie jak Urban Farmers Aquaponic Rooftop Farm w Bazylei z 2012 r., autorstwa Conceptual Devices, mają wszelkie predyspozycje by stać się rozwiązaniem powszechnym.

Miejska farma mieszkalna stała się jednocześnie tworzywem artystycznym lub funkcją włączoną w większe, zwarte obiekty i założenia. Przykładem tego typu działania jest projekt Schuur & Woning autorstwa holenderskiej pracowni Jelle de Jong Architekten, zakładający połączenie w jednym kompleksie zabudowy wielorodzinnej, farmy i produkcji żywności. Podobne projekty mieszkania ze zwierzętami zaczęły powstawać kilka lat wcześniej, jednak z mniejszym rozmachem. O ile mieszkanie z psem czy kotem jest silnie zakorzenione w kulturze, o tyle mieszkanie np. z końmi jest w proponowanej formie nowością, związaną z postępem cywilizacyjnym i uniezależnieniem człowieka od pracy tych ostatnich. Niezrealizowany projekt tego typu to Huis & Paard autorstwa Laury Weeber z 2013 roku położony w dzielnicy Almere Hout Noord. Zakładał on możli-

wość łączenia funkcji mieszkalnej z utrzymaniem koni i zapleczem oraz trasami rekreacyjnymi dla mieszkańców. Mniejsze założenia obejmują łączenie funkcjonalne jednostek mieszkalnych oraz otwartych farm, stajni czy ośrodków jeździecko - terapeutycznych z niewielkimi elementami pokoi gościnnych, salek szkoleniowych itp., służące częściej kulturalnej rekreacji wybranej grupy.

Jak wykazuje poniższa krótka analiza możliwość łączenia funkcji mieszkaniowej na terenach zurbanizowanych z funkcją produkcji żywności wydaje się logiczna i uzasadniona, co wykazują liczne realizacje. Dlaczego jednak w Polsce tego typu farm miejskich nie przybywa? Czy też innymi słowy - dlaczego w ogóle nie powstają? Spróbujmy wyjaśnić to zagadnienie.

## 4. Sytuacja prawna farm miejskich w Polsce. Zwierzęta gospodarskie w miastach

Na sytuację prawną farm miejskich w Polsce składa się wiele czynników. Ich najbardziej widomym efektem jest w rzeczywistości brak typowych form farm miejskich. Jak wykazuje nawet pobieżny przegląd zapisów mediów społecznościowych i podejmowanych inicjatyw społecznych, ludzie są chętni do podjęcia tego typu inicjatyw zwłaszcza jeśli kojarzą je z ogólnodostępnymi, zadbanymi terenami zieleni w mieście. Dlaczego więc nic się nie zmienia?

Pierwszym istotnym elementem są istniejące zapisy miejscowych placów zagospodarowania przestrzennego, które ściśle definiują funkcje poszczególnych terenów. Z założenia jest to działanie mające na celu wprowadzenie ładu przestrzennego, choć w wypadku farm miejskich działają skrajnie ograniczająco, jeśli wręcz nie zakazują całkowicie wprowadzania funkcji okołorolnych, w tym chowu i hodowli zwierząt na terenie śródmieść polskich miast. Na przykładzie Wrocławia można łatwo zaobserwować proces rugowania pozostałych fragmentów terenów rolnych, w których utrzymywane są zwierzęta, np. konie i zastępowanie ich "funkcjami miastotwórczymi". Dodatkowo sytuację komplikują zapisy ustawy o hodowli zwierząt, która zakazywała wszelkiej hodowli, poza hobbystyczną, zwierząt takich, jak psy czy koty, na obszarach w granicach administracyjnych polskich miast. Jednak jak pokazywało samo życie, w znacznej części przypadków był to przepis martwy, choć znacznie utrudniający życie mieszkańcom, chcącym hobbystycznie hodować zwierzęta takie, jak gołębie, czy pszczoły, nie mówiąc już o koniach, trzodzie chlewnej czy drobiu. Sytuacja nieco się poprawiła wraz z wprowadzeniem zmiany w Ustawie o utrzymaniu czystości i porządku w gminach w 2013 roku, w której to gminy zostały zobowiązane do określenia regulaminu utrzymania czystości i porządku na terenie gminy, a w nim w szczególności *"(...) wymagań utrzymywania zwierząt gospodarskich na terenach wyłączonych z produkcji rolniczej, w tym także zakazu ich utrzymywania na określonych obszarach lub w poszczególnych nieruchomościach (...)"* [11], co stworzyło furtkę dla rozwoju nie tylko miejskiego rolnictwa, którego bezpośrednio dotyczyły dotychczasowe zakazy, lecz również in-

nych funkcji bazujących na kontakcie ze zwierzętami, przenosząc ciężar decyzji bezpośrednio na władze gminne.

W wypadku większości polskich miast, np. Wrocławia wprowadzone przepisy nadal w znacznym stopniu ograniczają możliwość tworzenia miejsc innych, niż hipoterapeutycznych na terenach miejskich.[2] Dopuszczenie hodowli jedynie koni, a także królików oraz drobiu, przy jednoczesnym ograniczeniu możliwości utrzymania innych zwierząt gospodarskich poza placówkami naukowymi i jednostkami badawczymi, gdzie mogą być one utrzymywane jedynie w celu prowadzenia badań naukowych powoduje, że jedyną możliwą formą tworzenia farm miejskich jest potencjalnie możliwe tylko pod warunkiem ich doświadczalnego charakteru. Inną potencjalnie możliwą formą wprowadzenia gatunków innych, niż wspomniane w Regulaminie, jest wprowadzenie funkcji farmy miejskiej na terenach wyłączonych z niniejszych regulacji, co jednak znacznie ogranicza zasięg przestrzenny i swobodę wyboru terenu. Analiza regulaminów obowiązujących w największych polskich miastach ukazuje skrajną dowolność w rozwiązywaniu kwestii obecności w nich zwierząt. Spektrum przypadków ukazuje rozwiązanie prawne wprowadzone w Opolu, gdzie miasto pozostało podzielone na trzy strefy związane z typem zabudowy i stopniem uciążliwości potencjalnej hodowli dla mieszkańców. Odmienna sytuacja nastąpiła w Poznaniu, który w regulaminie gminnym pominął całkowicie kwestię zwierząt gospodarskich, pozostając przy całkowitym zakazie ich utrzymania w miastach wprowadzonym w ustawie o hodowli zwierząt. Najbardziej typowe rozwiązania przyjął wspomniany już Wrocław, gdzie rozszerzono grupę gatunków dopuszczonych do hodowli na terenie miasta. Wrocławski regulamin zakazał jednak rygorystycznie utrzymywania koni na nieruchomościach wykorzystywanych na cele mieszkalne.

## 5. Wnioski

Jak wykazała powyższa analiza, farmy miejskie stają się obecnie uzupełnieniem funkcji mieszkalnej w miastach. Są jednocześnie odpowiedzią na rosnące potrzeby żywieniowe mieszkańców, m.in. minimalizują koszty produkcji żywności, jak również na rosnącą potrzebę kontaktu z przyrodą. Stanowiąc kolejną z form zieleni miejskiej, farmy takie uzupełniają pewną lukę w przestrzeni, która powstaje z powodu rozlewania się miast i zagarniania kolejnych fragmentów dzikich przyrodniczo. Choć jednoznacznie pozytywne, w Polsce tworzenie tego typu przestrzeni staje się jednak praktycznie nieosiągalne ze względu na obowiązujące przepisy prawa, i nie tylko. Dlatego w tym

[2] Dla Wrocławia określono, że " Na terenach wyłączonych z produkcji rolniczej można utrzymywać konie do celów rehabilitacyjnych, rekreacyjnych i sportowych, a także króliki oraz drób,..." Uchwała nr XXXV/780/12 Rady Miejskiej Wrocławia z dn. 29.11.2012 r. w sprawie ustalenia regulaminu utrzymania czystości i porządku na terenie Wrocławia. § 15.1.

momencie istotnym staje się podjęcie dyskusji na temat takiej zmiany sytuacji prawnej w kraju, by powstawanie farm miejskich połączonych z zamieszkaniem ludzi w miastach stało się możliwe.

Tradycja ogrodów działkowych - rodzinnych, robotniczych, pracowniczych i innych, która jest nadal bardzo żywa w Polsce, jako jedna z form rekreacji oraz, już nieco w mniejszym stopniu, dożywiania mieszkańców miast staje się paradoksalnie jedną z barier tworzenia w miastach innych form rolnictwa lub ogrodnictwa. Tocząca się w ciągu ostatnich kilkunastu lat ożywiona dyskusja nad przyszłością terenów *de facto* wyłączonych z ogólnego użytkowania i dostępnych wyłącznie dla zrzeszonych działkowców z danego terenu, wygrodzona i zamknięta dla okolicznych mieszkańców nie tworzy atmosfery przychylnej dla powstawiania jakichkolwiek form "zieleni aktywizującej", zwłaszcza tej połączonej bezpośrednio z terenami zamieszkania. W momencie, gdy na świecie forma ogrodów społecznych, rodzinnych, edukacyjnych, czy tymczasowych staje się metodą na aktywizację społeczną niefunkcjonujących poprawnie osiedli mieszkaniowych, w Polsce stanowi ona synonim zamknięcia oraz segregacji, podobnie jak zamknięte strzeżone osiedla.

W podobny sposób nie wytworzyła się w Polsce do tej pory forma miejskiego rolnictwa intensywnego, połączonego z hodowlą, głównie ze względu na kojarzenie tego typu działalności z zagrożeniem sanitarnym, nieczystościami, hałasem oraz nieprzyjemnym zapachem związany z brakiem zachowania podstawowych wymogów sanitarnych. W najlepszym wypadku kojarzona jest z hobbystyczną hodowlą gatunków takich, jak gołębie, króliki itp. Nierzadko też w zbiorowej pamięci pozostają relacje z okresu "zaludniania" miast dawnymi mieszkańcami wsi, hodujących drób w wannach, a kozy i świnie na balkonach nowo wybudowanych blokowisk. Pokłosiem owego skojarzenia rodem z serialu "Alternatywy 4" Stanisława Barei jest właśnie ciągła, choć stopniowo malejąca niechęć, również prawodawców i władz miejskich do wprowadzania różnych form rolnictwa w przestrzenie osiedli w celu ich rewitalizacji i stwarzania nowej jakości życia w mieście, w kameralnych, lecz miejskich założeniach urbanistycznych.

## Literatura

[1] Howard E.: Garden Cities of To-Morrow, Faber and Faber, Londyn 1946, s. 50-57.

[2] http://www.fondationlecorbusier.fr/ {dostęp 15.05.2016 r.}.

[3] http://40years.ktcityfarm.org.uk/ {dostęp 15.05.2016 r.}.

[4] http://hackneycityfarm.co.uk/about/history {dostęp 15.05.2016 r.}.

[5] Poulsen M., Spiker M.: Integrating Urban Farms into the Social Landscape of Cities. Recommendations for Strengthening the Relationship Between Urban Farms and Local Communities, Johns Hopkins Bloomberg School of Public Health, Baltimore 2014, s. iii.

[6] Ackerman K.: The Potential for Urban Agriculture in New York City. Growing Capacity, Food, Security, & Green Infrastructure. Columbia University, Columbia 2012.

[7] Sroka W.: Definicje oraz formy miejskiej agrokultury – przyczynek do dyskusji, Wieś i Rolnictwo, vol. 164, no. 3, 2014, s. 88.

[8] Mougeot L.J.A.: Urban Agriculture: definition, presence, potential and risks. [w:] Bakker N.: Growing Cities, growing food: urban agriculture on the policy agenda. A reader on Urban agriculture, German Foundation for International Development (DSE), Feldafing 2000.

[9] Dubbeling, M., Merzthal G.: Sustaining urban agriculture requires the involvement of multiple stakeholders, [w:] Van Veenhuizen (red., Cities farming for future, Urban Agriculture for green and productive cities, RUAF Foundation, IDRC and IIRP, ETC-Urbanagriculture, Leusden 2006, s. 20-51.

[10] Jansma, J.E., Visser, A.J., Dekking A., Veer E.: Urban Agriculture: How to Create a Natural Connection between the Urban and Rural Environment in Almere Oosterwold (NL), REAL CORP 2013: PLANNING TIMES, Holandia 2014, s. 1373-1382.

[11] Ustawa z dn. 13 września 1996 r. o utrzymaniu czystości i porządku w gminach, Dz.U. 2013 poz. 1399.

## URBAN FARM AS A NEW WAY OF FORMING INTIMATE RESIDENTIAL ENVIRONMENT. ANALYSIS OF METHODS AND BARRIERS OF IMPLEMENTATION

**S u m m a r y**

Urban agriculture came to Europe as an answer to the need of closer contact with natural environment for people living in modern cites and urban areas, not only in the passive form, but also active - as a way of creating their own housing environment through producing their own food. Urban farms become, it this specific event, the element connecting city and its "productive" alternative, enabling the possibility to build a residential space of a new quality. Simultaneously with development of city farming, new forms of intimate housing are being created. It bases on rules of sharing space by chosen group or as attractive "extras" to exclusive residential sites in city centres. This type of urban solutions creates an opportunity to develop new urban forms, joining residential space with recreational function of the city, as a place for cross - species integration. An example of Almere shows the way of forming intimate residential environment basing on coexistence with nature in macro scale - through building whole district farms, as in the example of Almere Oosterword. In comparison to these examples Poland falls flat. Analysis of the same legal conditions revealed the existence of barriers which make the development of national urban farms sized as we know from the European examples practically impossible.

**Keywords:** interspecific area, vertical farming, urban agriculture, living with animals

DOI:10.7862/rb.2016.197

*Przesłano do redakcji: 19.05.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 169-176

**Dominika KNERA**[1]
**Dariusz HEIM**[2]

# WARUNKI PRACY PANELI FOTOWOLTAICZNYCH WYKONANYCH W SYSTEMIE ŚCIANY WENTYLOWANEJ

Najnowsze wymagania dotyczące budynków nisko i niemal zero energetycznych wymagają zastosowania odnawialnych źródeł energii w ramach budynku lub jego najbliższego otoczenia. Przedmiotem pracy jest analiza warunków pracy paneli fotowoltaicznych zamontowanych w systemie fasady wentylowanej. Przeanalizowano dwie fasady fotowoltaiczne, wschodnią i zachodnią, które zostały wkomponowane w elewację budynku znajdującego się w środowisku miejskim. Badane fasady stanowią zewnętrzną warstwę ścian eksperymentalnych zaprojektowanych dla budynków zero energetycznych. Obie ściany zostały zbudowane w ramach polsko-niemieckiego projektu GPEE na temat efektywności energetycznej budynków. Analiza została przeprowadzona dla danych pomiarowych uzyskanych z mierników prądu stałego, czujników temperatury umieszczonych na panelach i stacji meteorologicznej, w której rejestrowano między innymi temperaturę powietrza, kierunek i prędkość wiatru oraz promieniowanie słoneczne docierające zarówno na powierzchnię poziomą jak i pionową, wschodnią i zachodnią. Badania przeprowadzono dla wybranego tygodnia w maju, który charakteryzował się wysokim natężeniem promieniowania słonecznego i temperaturą powietrza utrzymującą się na poziomie około 20°C. Analizując otrzymane dane zaobserwowano, że działanie promieniowania bezpośredniego przy bezchmurnym nieboskłonie wpływa na wzrost temperatury paneli do ponad 60°C przy temperaturze powietrza nieprzekraczającej 20°C. Przy tak wysokiej temperaturze produktywność fasady fotowoltaicznej znacznie spada. Najwyższą moc chwilową zaobserwowano w pierwszej fazie operowania słońca na daną fasadę, przy wysokim natężeniu promieniowania i umiarkowanej temperaturze paneli fotowoltaicznych.

**Słowa kluczowe:** fasada fotowoltaiczna, panele CIS, temperatura paneli PV, natężenie promieniowania, dane pomiarowe, system autonomiczny

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Dominika Knera, Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź; tel. +48 42 631-39-20; dominika.knera@p.lodz.pl

[2] Dariusz Heim, Politechnika Łódzka, Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska, ul. Wólczańska 213, 90-924 Łódź; tel. +48 42 631-39-20; dariusz.heim@p.lodz.pl

# 1. Wprowadzenie

Zgodnie ze zmianami Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady Unii Europejskiej w sprawie charakterystyki energetycznej budynków od roku 2021 wszystkie nowo budowane budynki powinny spełniać założenia budynków niemal zero-energetycznych [1]. Zapewnienie zapotrzebowania energetycznego budynku na tak niskim poziomie wymaga nie tylko wysokiej izolacyjności i szczelności obudowy budynku, ale również wykorzystania odnawialnych źródeł energii zintegrowanych z budynkiem lub znajdujących się w jego najbliższym otoczeniu. W rezultacie, zmienia się funkcja budynku z biernej, wykorzystującej energię dostarczaną, na aktywną, generującą energię na własne potrzeby. Biorąc pod uwagę dostępne odnawialne źródła energii najbardziej stabilnym dla budynku są panele fotowoltaiczne produkujące energię elektryczną pod wpływem działania promieniowania słonecznego. Możliwe jest zintegrowanie lub nałożenie paneli fotowoltaicznych niemal z każdym elementem budynku wystawionym na działanie promieniowania słonecznego, takich jak: dach, elewacja, balustrady lub elementy zacieniające. Energia elektryczna w systemach wykorzystujących panele PV jest produkowana tylko w ciągu dnia w trakcie obecności słońca na nieboskłonie. Zatem wykorzystanie ich w budynkach biurowych i użyteczności publicznej jest bardzo dobrym rozwiązaniem zwłaszcza ze względu na pokrywanie się zapotrzebowania na energię elektryczną z produkcją energii przez system fotowoltaiczny. W rezultacie, można otrzymać niemal zerowy roczny bilans energetyczny dla takiego budynku.

Głównym celem artykułu jest analiza warunków pracy paneli fotowoltaicznych wykonanych w systemie ściany wentylowanej i zlokalizowanych w środowisku miejskim. Pomiary zostały wykonane dla dwóch eksperymentalnych ścian zewnętrznych zbudowanych w ramach polsko-niemieckiego projektu na temat efektywności energetycznej (GPEE). Założeniem projektu było opracowanie i zbudowanie ścian zewnętrznych spełniających wymagania budynków o niemal zerowym zapotrzebowaniu energetycznym. W tym celu została przeprowadzona wielopłaszczyznowa procedura optymalizacyjna uwzględniająca wpływ czynników ekonomicznych, środowiskowych i energetycznych [2, 3]. W rezultacie na istniejącym budynku zostały zbudowane i opomiarowane dwie ściany eksperymentalne, zlokalizowane na wschodniej i zachodniej elewacji. Obie ściany eksperymentalne zostały wyposażone w fotowoltaiczne fasady wentylowane. W poniższej pracy przedstawiono analizę wspomnianych fasad w wybranym tygodniu maja, charakteryzującym się wysokim natężeniem promieniowania.

# 2. Opis stanowiska badawczego

## 2.1. Budowa fotowoltaicznej fasady wentylowanej

Analizowana fotowoltaiczna fasada wentylowana jest położona na 4 piętrze budynku Politechniki Łódzkiej, zlokalizowanego w środowisku miejskim. Fasa-

da składa się z 8 paneli fotowoltaicznych ułożonych wokół centralnie położonego okna, jak widać na rysunku 1. Wybrane panele fotowoltaiczne zostały wykonane w technologii cienkowarstwowej CIS i charakteryzują się dobrą efektywnością przy niewysokiej cenie, ciężarem porównywalnym z typowymi panelami fasad wentylowanych, atrakcyjnym wyglądem i są ogólnie dostępne na rynku. W tabeli 1 podano parametry elektryczne indywidualnych paneli i całej fasady.

System odbioru energii wygenerowanej przez panele został zaprojektowany, jako system autonomiczny bez możliwości przesyłu wyprodukowanej energii do sieci. Cała fasada fotowoltaiczna, jak pokazano na rysunku 2, została podzielona na dwie części: lewą i prawą, składające się z 4 paneli każda. Obie czę-

Tabela 1. Podstawowe parametry elektryczne paneli i całej fasady fotowoltaicznej

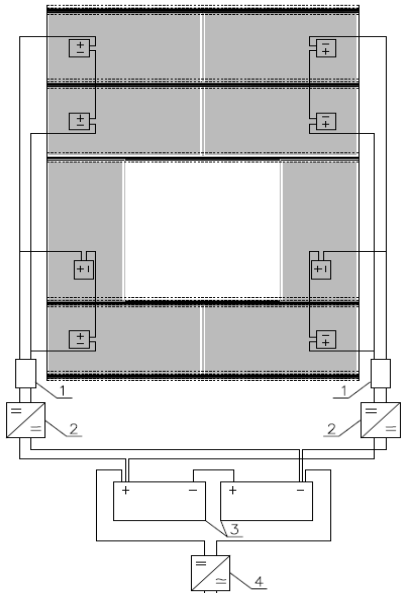
Table 1. Basic electrical parameters of panels and whole photovoltaic façade

| **Parametr** | **Panel CIS** | **Fasada fotowoltaiczna** |
|---|---|---|
| Moc maksymalna | 800 [Wp] | 320 [Wp] |
| Napięcie w punkcie mocy maksymalnej | 35 [V] | 70 [V] |
| Natężenie w punkcie mocy maksymalnej | 2,3 [A] | 4,6 [A] |



Rys. 1. Zdjęcie fasady fotowoltaicznej

Fig. 1. Picture of the photovoltaic façade




Rys. 2. Schemat instalacji elektrycznej 1-miernik prądu stałego, 2-kontroler ładowania, 3-zestaw akumulatorów, 4-falownik

Fig. 2. Scheme of the electrical installation 1-DC measurer, 2-charge controler, 3- bank of batteries, 4-inverter

ści zostały podłączone do indywidualnych mierników prądu stałego i regulatorów ładowania, które przesyłały wygenerowany prąd do wspólnego zestawu akumulatorów. Ostatnim elementem instalacji elektrycznej był falownik, który zmieniał prąd stały powstający w panelach na prąd przemienny wykorzystywany przez odbiorniki. Schemat instalacji elektrycznej został przedstawiony na rysunku 2. Zgodnie z założeniami projektu zaplanowano, że energia z fasad fotowoltaicznych będzie zasilała urządzenia zapewniające odpowiednie warunki środowiska wewnętrznego w pomieszczeniach badawczych przylegających do ścian eksperymentalnych. Indywidualnymi odbiornikami została jednostka wentylacji fasadowej firmy TROX i oświetlenie składające się z 3 opraw typu LED firmy PHILIPS.

## 2.2. Stanowisko pomiarowe (miernik elektryczny, temperatury i stacja meteo)

Fasada eksperymentalna jest dokładnie opomiarowana, zarówno ze względu na parametry prądy wygenerowanego przez panele fotowoltaiczne i ich temperaturę, jak również warunki meteorologiczne wpływające na jej pracę. Pomiar parametrów instalacji elektrycznej, takich jak natężenie i napięcie prądu oraz moc chwilową, jest wykonywany za pomocą mierników prądu stałego umieszczonych przed regulatorem ładowania. Takie umieszczenie mierników pozwala na zminimalizowanie w pomiarach wpływu efektywności instalacji i urządzeń elektrycznych. Pomiar prądu generowanego przez obie instalacje indywidualnie jest wykonywany, co 5 minut.

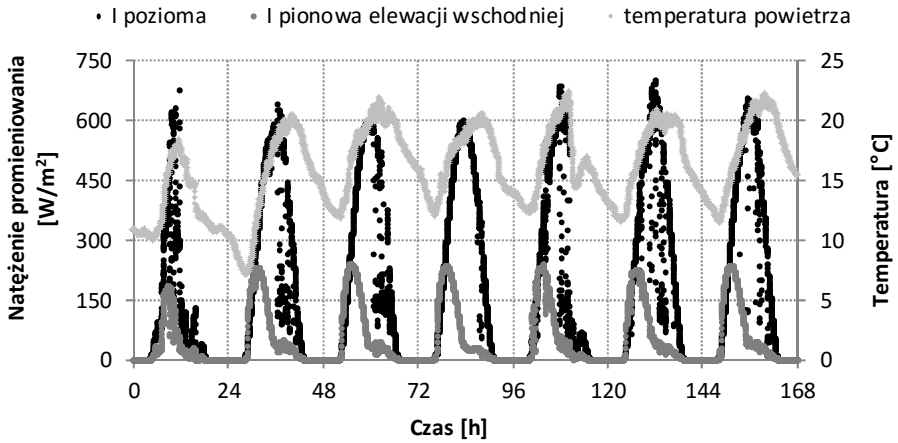
Każda fasada posiada 64 czujniki temperatury umieszczone na panelach fotowoltaicznych, w przestrzeni wentylowanej i wewnątrz warstwy izolacji. Każdy z paneli jest opomiarowany za pomocą 2 czujników temperatury, co pozwoli na precyzyjne określenie temperatury powierzchni fasady i jej wpływu na produktywność instalacji fotowoltaicznej. Dane z czujników temperatury są zbierane z 5 minutowym krokiem czasowym.

Dodatkowo na dachu budynku wyposażonego w ściany eksperymentalne umieszczono rozbudowaną stację meteorologiczną, dzięki której możliwe jest dokładne określenie warunków pracy fasady i wyjaśnienie zachodzących zjawisk. W stacji meteorologicznej znajduje się miernik wielofunkcyjny, który rejestruje temperaturę powietrza, wilgotność, ciśnienie oraz kierunek i prędkość wiatru. Zamontowano również deszczomierz i 4 sondy do pomiaru promieniowania słonecznego w różnych zakresach fali, UVA/UVB, VIS, IR, QUANTUM. Ponad to, prowadzony jest pomiar promieniowania całkowitego padającego na powierzchnię poziomą, rozproszonego i odbitego od gruntu. Ostatnia, bardzo ważną składową stacji są dwa pyranometry, zamontowane na pionowej powierzchni fasady wschodniej i zachodniej, służące do pomiaru natężenia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię fasad fotowoltaicznych. Pomiar warunków meteorologicznych jest wykonywany co 1 minutę.

# 3. Wyniki badań

## 3.1. Charakterystyka analizowanego okresu

Analizę warunków pracy paneli fotowoltaicznych wykonanych w systemie ściany wentylowanej przeprowadzono dla wytypowanego tygodnia w maju, którego warunki meteorologiczne są przestawione na rysunku 3. Wybrane dni, charakteryzują się nieboskłonem czystym lub z niewielkim zachmurzeniem, maksymalne natężenie promieniowania padające na powierzchnię paneli osiąga wartość około 250 W/m$^2$, a promieniowanie padające na powierzchnię poziomą przekracza 700 W/m$^2$. Ponadto, zarejestrowana temperatura powietrza wynosiła około 10°C w nocy, dzięki czemu panele fotowoltaiczne mogły się wychłodzić, i około 20°C w ciągi dnia, czyli poniżej temperatury STC (ang. Standard Test Conditions).



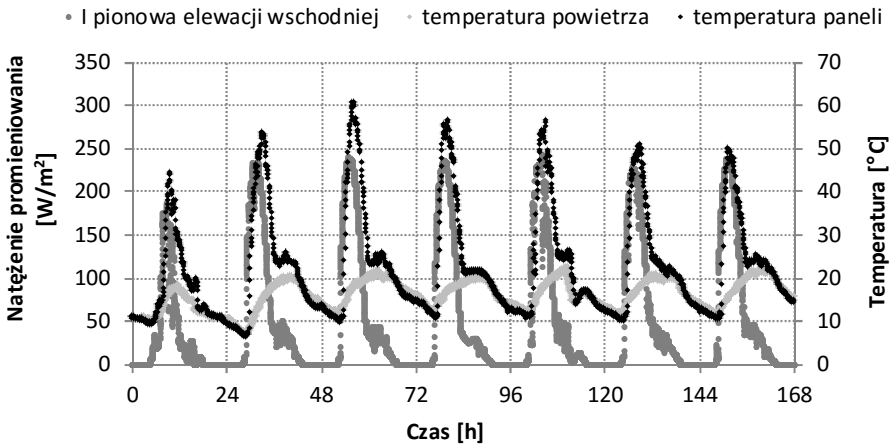

Rys. 3. Natężenie promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię poziomą i pionową elewacji wschodniej oraz temperatura powietrza w analizowanym okresie (4-10.05)

Fig. 3. Solar irradiation incident on horizontal and eastern oriented vertical surface as well as air temperature in analyzed period (4-10.05)

## 3.2. Wpływ temperatury na pracę paneli w systemie ścian wentylowanych

Na rysunku 4 pokazano wykres natężenia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię fasady fotowoltaicznej wraz z temperaturą powierzchni paneli i temperaturą powietrza w analizowanym okresie czasu. Przedstawiony wykres dotyczy fasady wschodniej, zależności dla fasady zachodniej były zbliżone. Jak można zauważyć temperatura paneli znacznie rośnie ze względu na działanie promieniowania bezpośredniego, osiągając ponad 60°C przy temperaturze powietrza nieprzekraczającej 20°C. Ponadto, można zaobserwować, że profil zmian temperatury paneli jest zbliżony do profilu zmian natężenia promieniowania padającego na powierzchnię paneli. Wysoką temperaturę

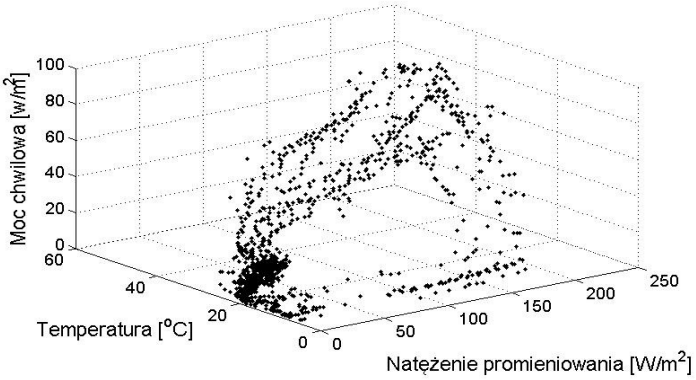
paneli odnotowano w ciągu dnia, od rana dla fasady wschodniej i po południu dla fasady zachodniej. Natomiast w ciągu nocy temperatura paneli była dużo niższa, na poziomie temperatury powietrza. Dodatkowo zaobserwowano wpływ promieniowania rozproszonego na wzrost temperatury paneli, ale na znacznie niższym poziomie.




Rys. 4. Natężenia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię wschodniej fasady fotowoltaicznej oraz temperatura powietrza i powierzchni paneli w analizowanym terminie

Fig. 4. The solar irradiance incident on surface of eastern photovoltaic façade as well as air and panel surface temperature in analyzed period

Wykres na rysunku 5 przedstawia zależność mocy chwilowej fasady fotowoltaicznej od natężenia promieniowania padającego na powierzchnię paneli i ich temperatury dla przypadku fasady wschodniej. Nie zaobserwowano jednoznacznej zależności, co może być spowodowane różnymi warunkami pracy paneli w ciągu dnia. Przy niskim natężeniu promieniowania, charakterystycznym dla okresu wczesno porannego i wieczornego, oraz przy promieniowaniu bezpośrednim temperatura paneli jest niewysoka, ale moc chwilowa wygenerowana przez fasadę fotowoltaiczną jest również niska. Z drugiej strony przy wysokim natężeniu promieniowania występującym w ciągu dnia, ze względu na działanie promieniowania bezpośredniego, temperatura paneli znacznie rośnie, a moc maleje. Najlepsze parametry zanotowano w początkowym okresie działania promieniowania bezpośredniego na daną fasadę, kiedy natężenie promieniowania jest wysokie, a panele nie zdążyły się jeszcze nagrzać do 60°C.




Rys. 5. Zależność mocy chwilowej 1m$^2$ fasady fotowoltaicznej wschodniej od natężenia promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię paneli i od ich temperatury

Fig. 5. The dependence the instantaneous power of 1m$^2$ photovoltaic façade on solar irradiance incident on panel surface and its temperature

## 4. Wnioski

W pracy przedstawiono warunki pracy paneli fotowoltaicznych wbudowanych w dwie ściany eksperymentalne, wschodnią i zachodnią, w trakcie wybranego tygodnia w maju, charakteryzującym się wysokim natężeniem promieniowania słonecznego. W ciągu dnia ze względu na działanie promieniowania bezpośredniego zaobserwowano znaczny wzrost temperatury paneli, osiągającej ponad 60°C przy temperaturze powietrza nieprzekraczającą 20°C. Przy tak wysokiej temperaturze produktywność paneli znacznie spada. Najwyższą moc chwilową zanotowano w pierwszej fazie operowania słońca na daną fasadę, przy wysokim natężeniu promieniowania i umiarkowanej temperaturze paneli.

*Niniejsza praca została sfinansowana ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach projektu pt.: „Promowanie zrównoważonego podejścia do efektywności energetycznej w budownictwie jako narzędzia ochrony klimatu w miastach Niemiec i Polski: opracowanie technologii fasady dla potrzeb budynków o zerowej emisji" (GPEE).*

## Literatura

[1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.

[2] Barecka, M., Zbiciński, I., Heim, D.: Life Cycle Assessment of zero- emission façade construction, materiały konferencyjne międzynarodowej konferencji Sustainable Building, vol. 5, p. 137-143, GBCe, Barcelona, Madrid, 2014.

[3] Szczepańska-Rosiak, E., Heim D.: An effect of wall thickness and window position on efficient daylight utilisation in building interiors, Technical Transactions. Civil Engineering, Vol. 2-B, pp 329-340, 2015.

## OPERATING CONDITIONS OF PHOTOVOLTAIC PANELS PERFORMED IN VENTILATED WALL SYSTEM

**S u m m a r y**

Recent requirements for low or nearly zero energy buildings requires usage of renewable energy sources integrated with building or in nearly surroundings. The aim of the paper is to analyze operating conditions of photovoltaic panels mounted as the ventilated facades system. Analyzed two facades photovoltaic, east and west, were located on the fourth floor of a building located in an urban environment. Studied facades are outer layer of the experimental walls designed for a zero energy buildings. Both walls were built in the framework of Polish-German project GPEE about energy efficiency of buildings. The analysis was conducted for the measurement data obtained from the DC current measurer, temperature sensors placed on the panels and weather station, which recorded, among others air temperature, wind direction and speed, as well as solar irradiation incident on both horizontal and vertical (eastern and western) surfaces. The study was conducted for the selected week in May, which was characterized by high intensity of solar radiation and air temperature holding at about 20°C. Analyzing the obtained data, it was observed that the effect of direct radiation by clear sky have influence on the increase of panels temperature to over 60°C at an air temperature not exceeding 20°C. Such high temperature significantly decreases photovoltaic facades productivity. The highest instantaneous power was observed in the first phase of operating the sun on a given facade, with high-intensity radiation and temperate photovoltaic panels.

**Keywords:** photovoltaic facade, CIS panel, PV panel temperature, solar irradaition, measurement data, off-grid system

DOI:10.7862/rb.2016.198

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 177-184

**Piotr KONCA**[1]
**Anna MAĆKOWIAK**[2]
**Marcin KONIORCZYK**[3]

# TYNKI RENOWACYJNE JAKO OCHRONA MURÓW PRZED ZNISZCZENIEM WSKUTEK KRYSTALIZACJI SOLI

W artykule przedstawiono badania dotyczące ochrony konstrukcji murowych przed zniszczeniem wskutek krystalizacji soli. Omówiono mechanizmy destrukcji wywołanej solą i warunki, w jakich do niej dochodzi. Przedstawiono rodzaje soli najczęściej występujących w warunkach rzeczywistych, a także zjawiska towarzyszące migracji roztworu i procesowi krystalizacji. Zdefiniowano ciśnienie krystalizacji, jako funkcję przesycenia roztworu oraz wielkości i kształtu porów, w których aktualnie następuje krystalizacja. Następnie określono klasy zasolenia konstrukcji murowych oraz układ warstw tynków renowacyjnych i ich wymiary zgodnie z zaleceniami niemieckiego instytutu WTA. Podkreślono, iż tynk renowacyjny to w rzeczywistości system składający się z obrzutki, warstwy podkładowej - magazynującej, tynku renowacyjnego - nawierzchniowego oraz ewentualnych szpachli i farb. Takie rozwiązanie ma za zadanie przesunąć strefę krystalizacji poza lico muru. W ostatniej części pracy przedstawiono wyniki badań tynku lekkiego cementowo–wapiennego na bazie perlitu ekspandowanego oraz popularnego przemysłowego tynku renowacyjnego pod kątem spełnienia wymagań normowych będących warunkiem wprowadzenia produktu na polski rynek. Przeanalizowano również spełnienie przez badane tynki kryteriów stawianych przez instrukcję instytutu WTA. Sprawdzono parametry świeżej mieszanki, przede wszystkim konsystencję, gęstość, zawartość porów powietrza. Dla stwardniałej mieszanki określono między innymi gęstość, porowatość, parametry wytrzymałościowe, paroprzepuszczalność, absorpcje wody i odporność na sole. Badania pokazują, iż ostatnie dwie cechy stanowią zasadniczą przeszkodę dla stosowania tynku lekkiego do zasolonych murów.

**Słowa kluczowe:** budynki zabytkowe, trwałość konstrukcji, transport i krystalizacja soli, tynki wielowarstwowe

[1] Piotr Konca, Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź; Piotr.konca@p.lodz.pl

[2] Anna Maćkowiak, Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź; anna.mackowiak@p.lodz.pl

[3] Autor do korespondencji / corresponding author: Marcin Koniorczyk, Politechnika Łódzka, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, Al. Politechniki 6, 90-924 Łódź; marcin.koniorczyk@p.lodz.pl

## 1. Wprowadzenie

Mechanizm zniszczenia murów spowodowany obecnością różnych soli jest bardzo złożony. Zawilgocenie ścian może mieć źródła zewnętrzne i być wynikiem braku izolacji poziomej lub pionowej, uszkodzeniami pokrycia dachu lub obróbek blacharskich, deszczu zalewającego mur bezpośrednio, a także rozbryzgów od nawierzchni chodnika lub jedni podczas ruchu pojazdów. Mogą też występować wewnętrzne źródła zawilgocenia, takie jak przecieki instalacji wodno-kanalizacyjnej, brak wentylacji, czy nieodpowiedni sposób użytkowania pomieszczeń. Oprócz oczywistych negatywnych skutków występowania nadmiernej ilości wilgoci w materiałach budowlanych należy pamiętać, że szkodliwe substancje przemieszczają się wraz z nią. W przypadku roztworu zawierającego sole oznacza to, iż nie tylko dostaje się on wraz z wodą w głąb muru, ale w czasie odparowywania wilgoci do otoczenia sól krystalizuje w porach i na powierzchni przegrody.

Pomocne przy określeniu rodzaju, ilości i rozmieszczeni soli jest zidentyfikowanie jej źródła. Szczególnie w przypadku starszych materiałów budowlanych, zarówno cegieł jak zapraw, znaczna ilość związków łatwo tworzących sole wprowadzona była do materiałów już na etapie produkcji lub wbudowania.

Jednym ze sposobów przeciwdziałania zniszczeniu murów (Rys.1.) wskutek krystalizacji soli jest zastosowanie tynku renowacyjnego. Tynki jednowarstwowe stosuje się przy niskim lub średnim poziomie zasolenia. Najczęściej jednak jest to system przynajmniej trzech zapraw i ewentualnych szpachli do wykończenia powierzchni oraz farb. Wymagania te zostały sformalizowane przez



Rys. 1. Zniszczenie muru wskutek krystalizacji soli

Fig. 1. An example of salt crystallization induced damage of brick wall

niemiecki instytut WTA (Wissenschaftlich-Technische Arbeitsgemeinschaft für Bauwerkserhaltung und Denkmalpflege) w instrukcji nr 2-9-04 *Sanierputzsysteme* [1]. Należy zauważyć, że polskie doświadczenia w tym obszarze również są znaczne i w dużej mierze pokrywają się ze wspomnianą instrukcją. Szereg wskazówek dotyczących prac przy obiektach zabytkowych znajdziemy w wielu publikacjach [2,3,4,5,6,8]. Aktualna norma europejska PN-EN 998-1:2012 *Wymagania dotyczące zapraw do murów. Część 1: Zaprawa tynkarska* wprowadza pojęcie tynku renowacyjnego, niestety w zasadzie nie precyzuje stawianych mu wymagań specjalnych [7].

W poniższym artykule po krótkim opisie mechanizmu zniszczenia materiałów budowlanych wskutek krystalizacji soli przedstawiono wstępne badania tynku lekkiego, jako tynku renowacyjnego. Próby zastąpienia gotowych tynków renowacyjnych tynkami lekkimi o składzie możliwie najbardziej zbliżonym do zapraw tradycyjnych są podejmowane ze względu na wymagania niektórych środowisk konserwatorskich.

## 2. Krystalizacja soli w porowatych materiałach budowlanych

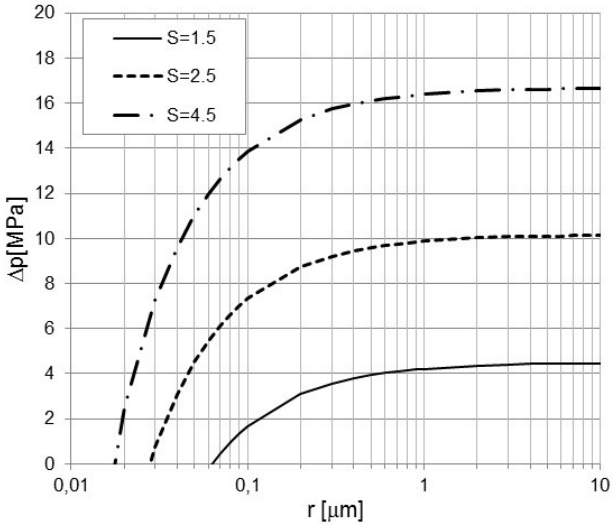
Do soli najczęściej występujących w obiektach budowlanych należą siarczany, chlorki, azotany i węglany. Sole mogą występować w dwóch fazach: ciekłej, są to sole rozpuszczone w cieczy porowej oraz stałej, jako kryształy soli bądź związki zaadsorbowane na powierzchni szkieletu. Tylko sól rozpuszczona w fazie ciekłej może się przemieszczać. Sól może krystalizować w wyniku dwóch procesów. Pierwszym jest odparowanie wody, z którym mamy do czynienia podczas wysychania murów. Sól rozpuszczona przemieszcza się wraz z wodą, w kierunku powierzchni, skąd woda paruje. W konsekwencji stężenie soli w roztworze wzrasta w warstwie przypowierzchniowej, co prowadzi do przesycenia roztworu i krystalizacji soli. Niektóre sole mogą również krystalizować wskutek obniżenia temperatur, np. siarczan sodu lub magnezu, gdyż rozpuszczalność tych soli w wodzie zależy od temperatury.

Krystalizacji soli towarzyszy wzrost ciśnienia krystalizacyjnego wywieranego na ściany szkieletu. Szczególnie duże wartości ciśnienia odnotowuje się dla siarczanu sodu, z którego powstaje dekahydrat siarczanu sodu zwany mirabilitem. Objętość molowa mirabilitu jest 4.5 krotnie większa niż objętość siarczanu sodu. Steiger [9,10] wyprowadził wzór ujmujący zależność ciśnienia krystalizacji od stopnia przesycenia, zdefiniowanego przy pomocy parametrów termodynamicznych charakteryzujących objętość roztworu:

$$\Delta p = \frac{RT}{V_m} \ln\left(\frac{a}{a_\infty}\right) - \overline{\gamma}_{cl} \frac{dA}{dV}$$

gdzie: $V_m$ jest objętością molową, $R$ jest stałą gazową, $T$ jest temperaturą bezwzględną, $a$ jest aktywnością jonów w roztworze wypełniającym pory o danym

promieniu, $a_\infty$ jest iloczynem rozpuszczalności w objętości roztworu, $A$ jest polem powierzchni a $V$ jest objętością poru. Powyższy wzór pozwala na uwzględnienie wpływu wielkości i kształtu porów na wartość ciśnienia krystalizacji. Powyższą zależność graficznie przedstawiono na Rys. 4. Sól krystalizuje począwszy od porów największych, następnie wraz ze wzrostem stopnia przesycenia roztworu kryształy soli zajmują coraz mniejsze pory.




Rys. 2. Wartość ciśnienia krystalizacji obliczona dla trzech wartości stopnia przesycenia roztworu w funkcji średnicy porów

Fig. 2. Crystallization pressure as a function of solution supersaturation ratio and the size and shape of pores

## 3. Tynki renowacyjne

Instrukcja WTA definiuje, podstawową wytyczną do wyboru ilości składników (Tab. 2) systemu renowacyjnego jako stopień zasolenia (Tab. 1.). Zasada działania tynków renowacyjnych opiera się na zjawiskach dyfuzji pary wodnej i migracji roztworu soli do porowatego ośrodka. Sól krystalizuje w strefie odparowania wilgoci, uwidaczniając się na powierzchni ścian w postaci charaktery-

Tablica 1. Stopnie zasolenia wg instrukcji WTA nr 2-9-04

Table 1. Degree of salinity according to the WTA instruction No 2-9-04

| Rodzaj soli | Stopień zasolenia | | |
|---|---|---|---|
| | Niski | Średni | Wysoki |
| Chlorki | <0,2 | 0,2-0,5 | >0,5 |
| Siarczany | <0,5 | 0,5-1,5 | >1,5 |
| Azotany | <0,1 | 0,1-0,3 | >0,3 |

Tablica 2. Elementy systemu tynku renowacyjnego wg instrukcji WTA nr 2-9-04

Table 2. Components of renovation plaster system according the WTA instruction No 2-9-04

| Stopień zasolenia | Układ warstw | Grubość [mm] |
|---|---|---|
| Niski | Obrzutka | ≤5 |
| | Tynk renowacyjny | ≥20 |
| Średni do wysokiego | Obrzutka | ≤5 |
| | Tynk renowacyjny | 10-20 |
| | Tynk renowacyjny | 10-20 |
| | Obrzutka | ≤5 |
| | Tynk podkładowy | 10-20 |
| | Tynk renowacyjny | 10-20 |

stycznych białych, lekko wypukłych śladów. W strefie przypowierzchniowej sól krystalizuje w porach materiałów, zwiększając znacznie swoją objętość. W trakcie tego procesu na ścianki porów oddziałują siły związane z tzw. ciśnieniem krystalizacji. W efekcie strefa przypowierzchniowa materiału ulega destrukcji obejmującej w pierwszej fazie pojawienie się spękań, miejscowe murszenie i odspajanie. Dochodzi do zniszczenia najpierw wyprawy tynkarskiej, spoin a następnie cegły, aż do całkowitej utraty przez nią lica. Strefa krystalizacji przesuwa się w ten sposób w głąb muru. Dodatkowo występująca w porach sól uszczelnia materiał utrudniając wysychanie muru.

Tynk renowacyjny ma za zadanie przesunąć strefę odparowania poza lico muru. Jego struktura wewnętrzna powinna pozwalać na bezpieczne magazynowanie soli, nie dopuszczając do wykwitów na powierzchni tynku. Jednocześnie musi on zabezpieczać mur przed wnikaniem wody przez powierzchnię przegrody uniemożliwiając wtórny transportu soli w głąb muru. Konieczne jest to również ze względu na wysychanie samej konstrukcji. Stosowanie rozwiązań systemowych jest skuteczniejsze, niż zastosowanie tynków jednowarstwowych.

System tynków renowacyjnych obejmuje podstawowe elementy:

- obrzutkę;
- tynk podkładowy;
- tynk nawierzchniowy;
- ewentualnie szpachle wygładzające lub strukturalne i farby.

### 3.1. Badania laboratoryjne

Do wprowadzenia tynku renowacyjnego (R) na rynek polski wystarczy deklaracja zgodności wyrobu z normą. Jedyną normą, która wymienia i stawia wymagania takim tynkom jest EN 998-1.

Tynk renowacyjny jest tynkiem porowatym, mającym zapewnić dużo objętości dla powstających kryształów soli, więc wydawać by się mogło, że zastosowanie tynku lekkiego (LW) może być dobrym rozwiązaniem. W artykule

Tablica 3. Zestawienie wyników badań laboratoryjnych i wymagań normowych

Table 3. Experimental results and requirements of the standards

| Parametr i wymagania według normy PN-EN 998-1 | Wymagania PN-EN 998-1 | Tynk LW | Tynk R |
|---|---|---|---|
| Czas zachowania własności roboczych [min] | LW Deklaracja<br>R Deklaracja | 30 | 60 |
| Gęstość Stwardniałej zaprawy [kg/m$^3$] | LW < 1300 kg/m$^3$<br>R Deklaracja | 990 | 1390 |
| Wytrzymałość na ściskanie [N/mm$^2$] | LW od 0,4 do 7,5<br>R od 1,5 do 5,0 | 3,4 | 2,8 |
| Przyczepność [N/mm$^2$] | LW Deklaracja<br>R Deklaracja | 0,3 | 0,1 |
| Absorpcja wody przez podciąganie kapilarne | LW od W0 do W3 [kg/(m$^2$.min$^{0,5}$)]<br>R ≥0.3 [kg/m$^2$] | 0,75 (W0)<br>23,2 | 0,04 (W3)<br>1,76 |
| Głębokość wnikania wody [mm] | LW brak wymagań,<br>R ≤5 | 47,0 | 3,3 |
| Współczynnik przepuszczalności pary wodnej | LW Deklaracja<br>R ≤ 15 | 7,3 | 6,6 |

przedstawiono (Tab. 3, 4) wyniki badań tynku renowacyjnego dostępnego na rynku i tynku lekkiego cementowo–wapiennego na bazie perlitu ekspandowanego wykonanego w laboratorium.

Jedyną cechą tynku lekkiego, która powoduje brak możliwości zadeklarowania spełnienia wymagań takich, jak dla tynku renowacyjnego w tym przypadku jest głębokość wnikania wody. Tynk lekki charakteryzuje się bardzo dużą absorpcją wody przy bardzo dużej głębokości jej wnikania (dla tynku LW brak wymagań co do tej cechy), natomiast od tynku renowacyjnego wymaga się odpowiednio wysoką absorpcję (powyżej 0,3 kg/m$^2$), przy jednocześnie niskiej głębokości wnikania wody (poniżej 5 mm).

## 4. Wnioski

Podsumowując, zwykły tynk lekki nie spełnił wymagań normy dotyczących tynku renowacyjnego w jednym punkcie. Natomiast tynk renowacyjny, który spełnia wymagania normy PN-EN 998-1 i może być wprowadzony do obrotu na rynku budowlanym, może nie spełniać wszystkich wymagań instrukcji WTA. W instrukcji postawiono wysokie wymagania dotyczące tynków renowacyjnych, których realizacja może zapewnić korzystne działanie. Jednocześnie nie jest to dokument, na podstawie którego można wprowadzać wyroby budowlane do obrotu i stosowania na rynku europejskim.

Tablica 4. Zestawienie wymagań zgodnie z WTA-2-9-04 i wyników badań eksperymentalnych
Table 4. Requirements set by the WTA instruction No 2-9-04 and experimental results

| Parametr | Wymogi | Tynk LW | Tynk R |
|---|---|---|---|
| Konsystencja (rozpływ) [mm] | 170±5 | 170 | 171 |
| Gęstość świeżej zaprawy [kg/m$^3$] | Deklaracja | 1387 | 1447 |
| Zawartość porów powietrza w świeżej zaprawie [%] | >25% | 26 | 35 |
| Porowatość [%] | >40% | 42 | 27 |
| Wytrzymałość na zginanie | Deklaracja | 1,2 | 1,1 |
| Wytrzymałość na ściskanie | 1.5<W<5 | 3,4 | 2,8 |
| Stosunek wytrzymałości na ściskanie do wytrzymałości na zginanie | <3 | 2,8 | 2,5 |
| Absorpcja wody spowodowana podciąganiem kapilarnym w ciągu 24h [kg/m$^2$] | >0.3 | 23,2 | 1,76 |
| Głębokość wnikania wody [mm] | <5 | 47 | 3,3 |
| Odporność na sole | Odporny | Brak odporności | Odporny |
| Współczynnik przepuszczalności pary wodnej | <12 | 7,3 | 6,6 |

## Literatura

[1] WTA Merkblatt 2-9-04 Sanierputzsysteme, Monachium 2004.

[2] Domasłowski W., red., Zabytki kamienne i metalowe, ich niszczenie i konserwacja profilaktyczna, Toruń 2011.

[3] Frössel F., Osuszanie murów i renowacja piwnic, Warszawa 2007.

[4] Praca zbiorowa pod kier. P. Klemm, Budownictwo ogólne, Tom 2, Fizyka budowli, Warszawa 2005.

[5] H. Stankiewicz, Zabezpieczenie budowli przed wilgocią, wodą gruntową i korozją, Warszawa 1984.

[6] M. Rokiel, Tynki renowacyjne w świetle normy „PN-EN 998-1 Wymagania dotyczące zapraw do murów. Część 1. Zaprawa tynkarska" oraz instrukcji „WTA nr 2-9-04 Sanierputzsysteme", Inżynier budownictwa 9/2012.

[7] PN-EN 998-1:2012, Wymagania dotyczące zapraw do murów. Część 1: Zaprawa tynkarska.

[8] Koniorczyk, M., Gawin, D., Modelling of salt crystallization in building materials with microstructure ‑Poromechanical approach, Construction and Building Materials, 2012, 860-873.

[9] Steiger, M., Crystal growth in porous materials-I: the crystallization pressure of large crystals. Journal of Crystal Growth 282, 2005, 455‑469.

[10] Steiger, M., Crystal growth in porous materials-II: Influence of crystal size on the crystallization pressure. Journal of Crystal Growth 282, 2005, 470-481.

## RENOVATION PLASTER AS A PROTECTION AGAINST SALT CRYSTALLIZATION INDUCED DAMAGE

**S u m m a r y**

We present the research aims at the better protection of brick wall against salt crystallization induced damage. Damage mechanisms and conditions enable destruction were elaborated. We present salts, which are most destructive in real constructions. The formula defining crystallization pressure as a function of solution supersaturation ratio and the size and shape of pores, where the crystallization proceeds, is defined. Classes of salt content and the dimensions of composite layers due to German WTA Institute is given. It is also stressed that renovation plaster is actually a whole system containing rendering, ground plaster coat – as salt storage, renovation plaster – external protective layer and additional putties and paints. The paper is finished with the results of experimental research on the comparison of light lime-cement plaster with expanded perlite and popular commercial-made renovation plaster. Whole range of research of fresh and hardened mortars has been performed. For fresh mortar especially the consistence, density and content of air pores has been evaluated. The hardened product has been examined due to set density, porosity, compressive and bending strength, diffusion, water absorption coefficient and resistance to salts damage. Two last properties doesn't allow to apply light plasters for salt attacked walls.

**Keywords:** historical buildings, durability of constructions, salt transport and crystallization, composite plasters

DOI:10.7862/rb.2016.199

*Przesłano do redakcji: 24.04.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 185-192

**Ada KOWALSKA**[1]
**Karolina KURTZ-ORECKA**[2]

# ANALIZA DOBRYCH PRAKTYK W ZAKRESIE WYKORZYSTANIA OZE ORAZ ENERGII ODPADOWEJ NA PRZYKŁADZIE ROZWIĄZAŃ OBIEKTU PRZEMYSŁOWO-BIUROWEGO W SCHWABACH/ NIEMCY

Zastosowanie źródeł odnawialnych i niekonwencjonalnych na cele zaspokojenia potrzeb energetycznych pozwala na ograniczenie kosztów zakupu energii oraz opłat za korzystanie ze środowiska naturalnego w przypadku obiektów przemysłowych. W artykule omówiono rozwiązania służące redukcji zużycia energii i wykorzystaniu energii odpadowej generowanej w procesach produkcyjnych, zastosowane w nowej siedzibie producenta maszyn w przemyśle kablowym, firmie NIEHOFF. Zastosowane technologie pozwoliły na ograniczenie kosztów zakupu energii, opłat za korzystanie ze środowiska naturalnego oraz sprawiło, że firma NIEHOFF stała się jednym z największych użytkowników geotermii w Niemczech. Zastosowane nowatorskie rozwiązania, wymagały użycia materiałów i izolacji termicznej o możliwie najniższych współczynnikach przewodzenia ciepła. Dopiero tak zaprojektowany budynek mógł spełnić warunki wysokiej efektywności energetycznej nowobudowanych obiektów. Głównym źródłem ciepła w budynku jest energia geotermalna, która zasila zarówno układ ogrzewania jak i chłodzenia. Takie podejście pozwoliło na oszczędności rzędu 75% w porównaniu do rozwiązań konwencjonalnych. Technologia wykorzystana do kontroli obiektów dostosowuje temperatury w pomieszczeniach z uwagi na warunki wewnętrzne oraz zewnętrzne, co zostało osiągnięte dzięki stałemu wglądowi do danych pogodowych. Zaopatrzenie w ciepło/chłód technologiczny zachodzi przez radiacyjne panele sufitowe, sufitowe panele grzewcze i wentylację oraz tradycyjną instalację c.o. co znacznie podniosło efektywność grzewczą oraz podniosło komfort pracowników. Obiekty firmy NIEHOFF w Schwabach są przykładem dobrych praktyk proekologicznych i zrównoważonego wykorzystywania energii.

**Słowa kluczowe:** energia odnawialna, środowisko naturalne, energooszczędne budownictwo przemysłowe, efektywne oszczędzanie, inteligentne budynki

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Ada Kowalska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin; tel. 668208638; adaakowalska@gmail.com

[2] Karolina Kurtz-Orecka (opiekun naukowy), ZUT w Szczecinie, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, tel. 608691975, karolinakurtz@gmial.com

## 1. Wprowadzenie

Problematyka nadmiernego wykorzystywania nieodnawialnych surowców energetycznych na cele ogrzewania i wentylacji oraz wpływu ich spalania na środowisko naturalne poruszana jest od lat i znalazła odzwierciedlenie nie tylko w doniesieniach naukowych , ale również obowiązującym prawie europejskim – m.in. w dyrektywie w sprawie charakterystyki energetycznej budynków [2] oraz dyrektywie w sprawie emisji przemysłowych [3]. Po dzień dzisiejszy głównymi źródłami energii w gospodarstwach domowych, przemyśle oraz budynkach użyteczności publicznej, w Polsce i na świecie, są nieodnawialne źródła energii.

Według danych [4] zużycie energii końcowej przez przemysł w 2013 r. wyniosło 276,6 Mtoe, co stanowi 25,10% całkowitego zużycia energii w Europie. W samych Niemczech wielkość zużycia energii w przemyśle wynosi 60,74 Mtoe – 22% w skali zużycia w całej Unii, zaś w Polsce sięga 15,10 Mtoe [4].

Rozwiązania służące oszczędnością energii stosowane są przede wszystkim w budynkach mieszkalnych, zaś dość rzadko w obiektach przemysłowych głównie z uwagi na ich specyficzne warunki użytkowania i potrzeby technologii charakteryzujące dany sektor przemysłu, jednak obiekty te nie są zwolnione z konieczności podnoszenia swojej efektywności energetycznej. Przykładem dobrej praktyki w tym zakresie jest energooszczędny budynek firmy poligraficznej z Karlsruhe [6], w którym zastosowany oryginalny kształt budynku oraz innowacyjny system chłodzenia, pozwoliły na znaczne zredukowanie zużycia energii. Ponadto zintegrowany system chłodzenia z odzyskiem chłodu przyczynił się do zmniejszenia zapotrzebowania na energię o prawie 90% [6].

Jednym ze sposobów wpływania na poprawę stanu środowiska naturalnego jest przenoszenie na grunt rodzimy sprawdzonych, często innowacyjnych, rozwiązań efektywnych energetycznie, tzw. dobrych praktyk.

Polska, podobnie jak i inne kraje europejskie, zobligowana jest do realizacji polityki unijnej w zakresie ochrony środowiska naturalnego, w tym obniżenia limitów emisji zanieczyszczeń powietrza. Wskazane dla wspólnoty nowe pułapy redukcji emisji zanieczyszczeń do osiągnięcia do roku 2020, są rygorystyczne a ich uzyskanie wymaga podjęcia zdecydowanych działań w każdym sektorze gospodarki oraz istotnego zwiększenia wykorzystania odnawialnych i niekonwencjonalnych źródeł energii [7]. Według raportu Europejskiej Agencji Środowiska [1] Polska i Niemcy są krajami, w których na przestrzeni ostatniej dekady emisja zanieczyszczeń do środowiska naturalnego uległa wzrostowi.

Przykładem dobrej praktyki w poszukiwaniu rozwiązań minimalizujących wpływ przemysłu na środowisko naturalne są rozwiązania podjęte podczas rozbudowy podstawowego zakładu, przez niemieckiego producenta maszyn – firmę NIEHOFF.

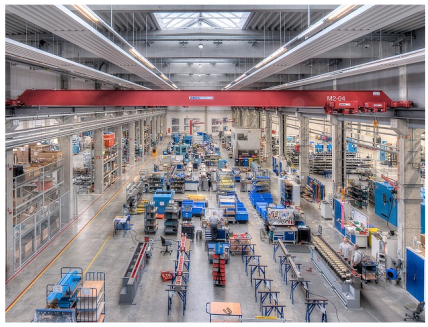
## 2. Firma NIEHOFF

Działająca na rynku niemieckim od 1951 r. firma NIEHOFF, Schwabach, jest jednym z wiodących, ogólnoświatowych dostawców maszyn w przemyśle kablowym. W jej ofercie mieści się wykonywanie projektów maszyn pod klucz oraz globalna obsługa dostarczanych produktów. Na przestrzeni lat rosło zapotrzebowanie na powierzchnię produkcyjną i biurową. W 2007 r. zlecono wykonanie opracowania koncepcji i realizacji nowego kompleksu obiektów, a rok później rozpoczęto prace budowlane pierwszego etapu inwestycji. Całe przedsięwzięcie zajęło 8 lat. W grudniu 2015 r. ostatni etap inwestycji został zakończony i oddany do użytkowania (rys. 1, 2) [9]. Całkowita powierzchnia nowej siedziby firmy to 35,5 tys. $m^2$, z czego 25 tys. $m^2$ stanowi część produkcyjną, w której mieszczą się hale z liniami technologicznymi, lakiernia oraz pomieszczenia magazynowe. Pozostała powierzchnia pełni funkcje zaplecza socjalno-biurowego.



Rys. 1. Widok na kompleks zabudowań [9]

Fig. 1. Aerial view on a complex of buildings [9]



Rys. 2. Widok na główną halę produkcyjną [9]

Fig. 2. View of the main production hall [9]

## 3. Najlepsze praktyki – prezentacja zastosowanych rozwiązań

Głównym celem, przyświecającym koncepcji budowy nowej siedziby firmy NIEHOFF, było ograniczenie kosztów zakupu energii oraz zmniejszenie opłat za korzystanie ze środowiska naturalnego. Osiągnięto to przez wprowadzenie zintegrowanego zarządzenia energią. Zastosowaną w obiekcie technologię ogrzewania i chłodzenia oparto na wykorzystaniu energii geotermalnej oraz instalację pomp ciepła. Podstawowym warunkiem, pozwalającym na osiągnięcie wysokiej efektywności energetycznej nowych budynków, była odpowiednia izolacja termiczna przegród zewnętrznych oraz instalacji. Przegrody zewnętrze budynku produkcyjnego wykonano z izolowanego termicznie betonu kompozytowego, osiągając współczynnik przenikania ciepła elewacji poniżej 0,23 W/($m^2$K) oraz 0,16 W/($m^2$K) w przypadku stropodachu izolowanego wełną mineralną o grubości 20 cm, co pozwoliło na spełnienie restrykcyjnych niemieckich wymagań w zakresie ograniczenia ilości energii koniecznej do dostarczenia na potrzeby ogrzewania i chłodzenia.

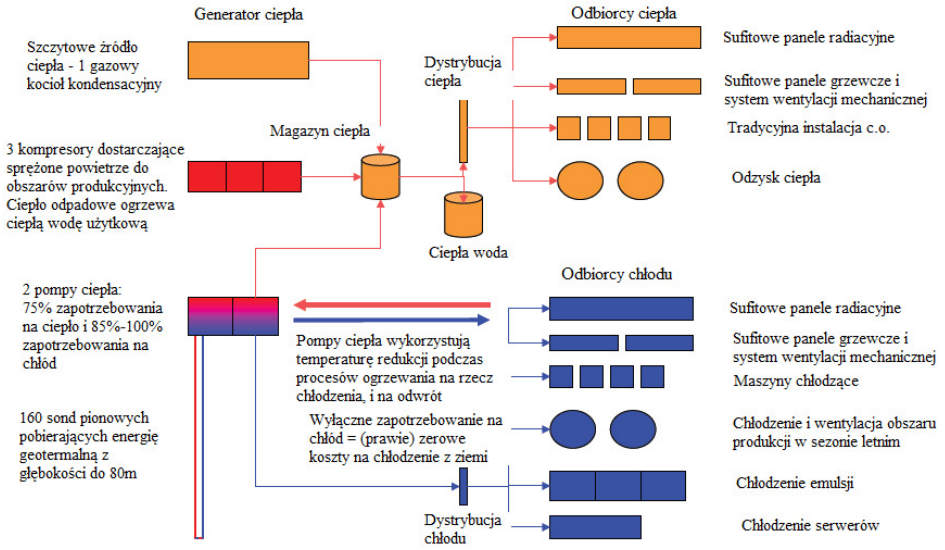
### 3.1. Energia geotermalna

Ograniczenia zużycia energii końcowej i pierwotnej na cele ogrzewania i chłodzenia w budynku fabrycznym uzyskano przez zastosowanie 160 pionowych sond wprowadzonych do rzędnej 80 m pod poziomem terenu - ograniczone zagłębienie narzuciły warunki lokalnego prawa geologicznego i górniczego. Pobierana z gruntu energia zasila 2 pompy ciepła, które zasilane energią geotermalną pokrywają 75% zapotrzebowania na energię cieplną oraz 85-100% zapotrzebowania chłód technologiczny. Pobrana energia podlega częściowej akumulacji w magazynach energii. W przypadku wyłącznego zapotrzebowania na chłodzenie system nie generuje prawie żadnych kosztów, poza zapotrzebowaniem na energią elektryczną potrzebną do zasilenia urządzeń pomocniczych, a chłodzenie całkowicie pokrywane jest energią geotermalną. Dodatkowo, do magazynu ciepła doprowadzona jest instalacja składająca się z 5 kompresorów i kondensacyjny kocioł gazowy. Zadaniem kompresorów jest dostarczenie sprężonego powietrza do obszarów roboczych linii produkcyjnych. Energia odpadowa, uzyskana z procesów technologicznych w fabryce, wykorzystywana jest do podgrzewania ciepłej wody użytkowej oraz wspomaga instalację grzewczą. Szczytowe źródło ciepła – gazowy kocioł kondensacyjny, zasila instalację grzewczą budynku fabryki, gdy temperatura zewnętrzna spadnie poniżej 5 °C.

### 3.2. Ogrzewanie i chłodzenie

Ogrzewanie samej lakierni również oparte jest na spalaniu gazu zimnego, natomiast do ogrzewania budynku administracyjnego zastosowano lekki olej opałowy. W budynku tym ciepło/chłód, dostarczane jest do pomieszczeń ogrzewanych poprzez radiacyjne panele sufitowe, ogrzewanie powierzchniowe zainstalowane na powierzchni sufitów, układy wentylacji mechanicznej z klimatyzacją oraz z wykorzystaniem tradycyjnej instalacji c.o. (w niektórych pomieszczeniach). Chłodzenia wymagają urządzenia linii technologicznych, emulsja wykorzystywana w procesach ciągnienia drutu, a także pomieszczenia serwerów.

Na terenie hali produkcyjnej oraz w korytarzach budynku biurowego, zapotrzebowanie na ciepło i chłód pokrywane jest za pomocą radiacyjnych paneli sufitowych. Promieniujące w dół ciepło zapewnia niemal pionowy gradient temperatury, który jest niemożliwy do osiągnięcia, na terenie hal produkcyjnych, przy rozwiązaniach tradycyjnych. Zastosowany system spełnia rolę klimatyzacji w cieplejsze dni. Kontrola temperatury w pomieszczeniach odbywa się automatycznie z wykorzystaniem inteligentnego systemu sterowania, współpracującego z automatyką pogodową. W porównaniu do ogrzewania podłogowego, radiacyjne panele sufitowe działają bardzo szybko na zmiany temperatury – pierwsze efekty odczuwalne są już po 10 minutach od włączenia ogrzewania. Regulacja warunków termicznych w pomieszczeniach biurowych w budynku administracyjnym oraz części fabrycznej, odbywa się za pomocą sufitowych paneli grzewczych oraz systemu wentylacji, znajdującego się w podłodze pomieszczeń (rys. 3).




Rys. 3. Schemat instalacji grzewczo-chłodzącej [9]

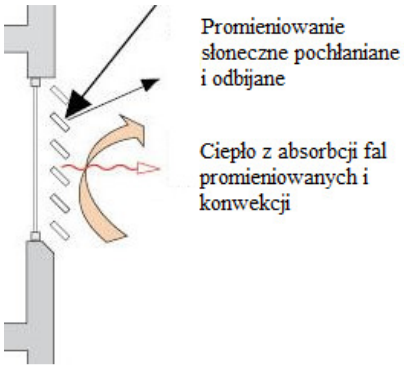
Fig. 3. Scheme of heating and cooling systems [9]

Budynek administracyjno-biurowy w rzucie poziomym, ma kształt wyoblonego trójkąta równobocznego. Łagodne przejście jednej ściany zewnętrznej w drugą zapewniło usunięcie wystąpienia liniowych mostków termicznych na styku ściana – ściana. Z wyłączeniem parteru, wszystkie kondygnacje są powtarzalne. Powierzchnia danego piętra została podzielona na dwa obszary logistyczne: część biurową oraz rdzeń (komunikacja i pomieszczenia sanitarne).

### 3.3. Oświetlenie pomieszczeń

Pomieszczenia administracyjne w dużym stopniu oświetlane są światłem dziennym. Dla zapewnienia normowych wartości oświetlenia w obszarach roboczych, wbudowano oświetlenie LED-owe. Czujniki światła dziennego regulują natężenie dostarczanego oświetlenia, co zmniejsza zużycie energii elektrycznej o ok. 30% w stosunku do systemów konwencjonalnych. Zainstalowane automatyczne rolety fasadowe zmieniając swoje ustawienie w zależności od intensywności padania promieni słonecznych na powierzchnię okna, chronią budynek przed przegrzaniem oraz powstaniem zjawiska olśnienia (rys. 4).

Z uwagi na komfort użytkowników budynku, zaprojektowane oświetlenie w przypadku wystarczającej ilości naturalnego światła, pracuje z najniższą intensywnością. Rdzeń budynku nie ma dostępu do światła dziennego. Całkowite zapotrzebowanie na światło w korytarzach i sanitariatach pokrywane jest przez oświetlenie wbudowane z LED-owymi źródłami oświetlenia.




Rys. 4. Schemat działania rolet fasadowych, na podstawie [5]

Fig. 4. Shade facade flow chart, based on [5]

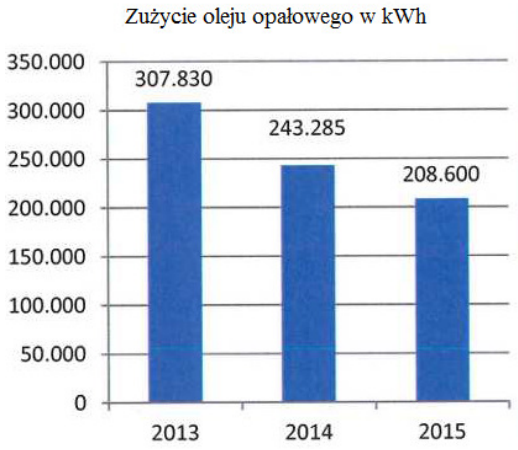
System odpowiedzialny za kontrolę temperatury w budynkach i ustawienie rolet okiennych zlokalizowany jest na dachu budynku administracyjnego. Stałe połączenie z bieżącymi danymi o warunkach panujących w środowisku zewnętrznym, ma na celu zapewnić czas na zmianę ustawień, których efekty odczuwalne są po 48 godzinach.

### 3.4. Odzysk ciepła

W celu zwiększenia efektywności energetycznej hali produkcyjnej, zainstalowano nowoczesny system wentylacji oraz maszyny z indywidualną instalacją wymiennika ciepła. Zastosowane urządzenia w znacznym stopniu przyczyniły się do poprawy jakości powietrza. Energia zawarta w zużytym powietrzu z systemu wentylacji i lakierni – z procesu suszenia, wykorzystywana jest do wstępnego podgrzania świeżego powietrza. Odzysk ciepła z powietrza wywiewanego za pomocą krzyżowego wymiennika ciepła, daje oszczędność energii cieplnej na poziomie 60-75%. Kabiny suszenia w malarni są obsługiwane w trybie recyrkulacji świeżego powietrza, który spowodował nieznaczne straty wyciągowe podczas pracy. Izolacja termiczna kabin grubości 120 mm przyczyniła się do ograniczenia strat ciepła do minimum oraz zmniejszenia zapotrzebowania na energię hali produkcyjnej.

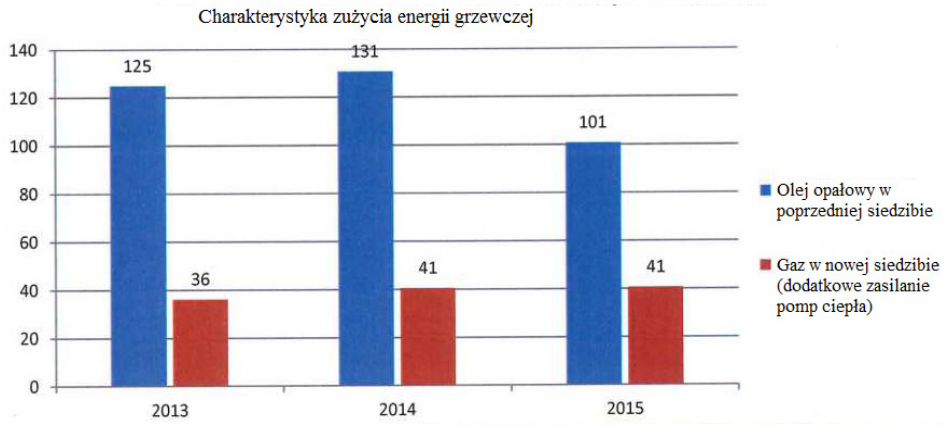
### 3.5. Wielkość zużycia energii w budynku fabrycznym

Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii oraz energii odpadowej przyczyniło się do osiągnięcia wskaźnika zużycia energii pierwotnej przez budynek fabryczny na poziomie 190 kWh/(m$^2$rok). Przy dopuszczalnej wartości wskaźnika zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną $EP$= 347 kWh/(m$^2$rok), daje to 45% dopuszczalnego zużycia zgodnie z niemieckimi standardami. Na rysunku 5 przedstawiono zużycie oleju opałowego na cele ogrzewania w starej siedzibie firmy NIEHOFF, zaś na rysunku 6 wskaźniki energii cieplnej zgodnie z wytycznymi VDI3807 [8] „Wartości zużycia w budynkach”.




Rys. 5. Zużycie oleju opałowego na cele ogrzewania w starej siedzibie firmy, na podstawie [10]

Fig. 5. Consumption of fuel oil for heating purposes in the old headquarters, based on [10]




Rys. 6. Wskaźniki energii cieplnej zgodnie z wytycznymi VDI3807 [8], na podstawie [10]

Fig. 6. Indicators of thermal energy according to VDI3807 [8], based on [10]

## 4. Podsumowanie

W zaledwie 6 lat firma NIEHOFF wybudowała budynek fabryczny i administracyjny, spełniający najwyższe wymagania z uwagi na energooszczędność nowobudowanych obiektów. Jest to trend ogólnoświatowy, który nie dotarł jeszcze na Polski rynek budownictwa przemysłowego. Coraz bardziej rygorystyczne przepisy narzucane przez prawo europejskie, spowodują wzrost wykorzystywania odnawialnych źródeł energii i budowę tego typów obiektów w Polsce. Firma NIEHOFF jest dobrym przykładem zastosowania rozwiązań zapewniających zrównoważone wykorzystywanie energii.

## Literatura

[1] Air quality in Europe — 2015 report.
[2] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19.05.2010 r., w sprawie charakterystyki energetycznej budynków, Dz.U. UE L153/13.
[3] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/75/UE z dnia 24.11.2010 r. w sprawie emisji przemysłowych – IED, (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola), Dz.U. L 257 z 10.10.1996, s. 26.
[4] Energy statistical pocketbook. https://ec.europa.eu { dostęp 23.05.2016}.
[5] http://www.australianliving.com.au {dostęp 10.05.2016}.
[6] http://www.efficiency-from-germany.info {dostęp 20.05.2016}.
[7] http://www.gios.gov.pl {dostęp 16.05.2016}.
[8] https://www.vdi.de {dostęp 23.05.2016}.
[9] NIEHOFF Magazine, http://www.niehoff-gmbh.info/ {dostęp 23.05.2016}.
[10] Umwelterklärung 2016 für 2015.

## ANALYSIS OF GOOD PRACTICE IN THE USE OF RES AND WASTE ENERGY FOR EXAMPLE OF BUILDING INDUSTRY OFFICE IN SCHWABACH/ GERMANY

**S u m m a r y**

The use of renewable and alternative sources for the purposes of energy needs allows to reduce costs of energy purchase and fees for use of the environment in industrial facilities. The solutions to reduce the energy consumption and the use of waste energy generated in the manufacturing processes used in the new building of machine manufacturer in the cable industry, the NIEHOFF company have been discussed in the article.

The use of unconventional sources has allowed to reduce the cost of energy purchase, charges for the use of the environment and made NIEHOFF company one of the largest users of geothermal energy in Germany. A range of innovative solutions has required the use of materials and thermal insulation with the lowest possible heat conductivity coefficients. Such a designed building could meet the conditions of the high energy efficiency of new buildings. The main source of heat in the building is geothermal energy that powers both the heating and cooling. This approach has allowed savings of 75% compared to conventional solutions. The technology used to control objects adjusts the room temperature due to the conditions, internal and external, which has been achieved through continuous insight into weather data. Heat supply / cooling technology occurs by radiation ceiling panels, heating ceiling panels, ventilation and a traditional installation C.O. which has greatly increased the efficiency of heating and increased the comfort of employees.

Objects of NIEHOFF in Schwabach are an example of good pro-ecological practices and sustainable use of energy.

**Keywords:** renewable energy, the environment, energy-efficient industrial building, economize, intelligent buildings

DOI:10.7862/rb.2016.200

*Przesłano do redakcji: 06.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 193-200

**Ewelina KRAWCZAK**[1]
**Agata ZDYB**[2]

# ANALIZA PRACY INSTALACJI FOTOWOLTAICZNEJ W ZALEŻNOŚCI OD ORIENTACJI GEOGRAFICZNEJ

Rynek odnawialnych źródeł energii z każdym dniem coraz bardziej się rozwija. Zapotrzebowanie na energię elektryczną wzrasta, przy czym zasoby konwencjonalnych i zarazem nieodnawialnych źródeł energii (paliw kopalnych) ulegają zubożeniu. Alternatywą dla nich są odnawialne źródła energii (OZE), których rezerwy uzupełniane są w naturalnych procesach ekosystemu, co stanowi o ich niewyczerpalności. Zmiany legislacyjne w Polsce dotyczące OZE spowodowały duże zainteresowanie małymi instalacjami fotowoltaicznymi w wyniku czego dotychczasowy konsument zmienia się w prosumenta energii elektrycznej. Rozwój rynku odnawialnych źródeł energii stawia przed projektantami ciągłe wyzwania, ponieważ projektowanie instalacji fotowoltaicznych o wysokiej wydajności dla istniejących budynków, przy uwzględnieniu występujących lokalnych warunków oraz architektury budowli, jest niezwykle trudne. Uzysk energetyczny systemu słonecznego zależy od wielu czynników, jednym z najważniejszych jest wartość nasłonecznienia zależna od lokalizacji (szerokości geograficznej), a także orientacja projektowanego systemu względem kierunku azymutu. Narzędziem wspomagającym i usprawniającym projektowanie instalacji PV (Photovoltaics) jest oprogramowanie DDS-CAD, pozwalające przeprowadzić symulację uzysków energii elektrycznej. Wyniki otrzymanych symulacji umożliwiają w krótkim czasie porównanie wielu wirtualnych modeli instalacji pod kątem wydajności, a co za tym idzie wybranie najkorzystniejszego wariantu dla istniejącej orientacji geograficznej. W niniejszej pracy poddane zostały analizie rezultaty symulacji wirtualnych modeli instalacji fotowoltaicznych pod względem liczby generatorów fotowoltaicznych oraz wielkości uzysku energii elektrycznej przy założeniu wykorzystania całej powierzchni dachu oraz uwzględnieniu zmiany kąta usytuowania modułów PV względem okapu połaci dachowej i kierunku azymutu.

**Słowa kluczowe:** fotowoltaika, energetyka słoneczna, OZE, DDS-CAD

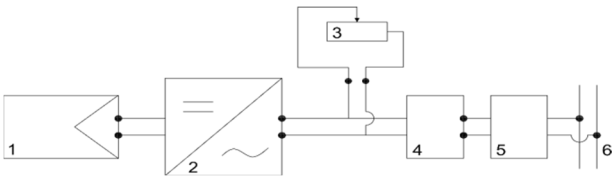
[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Ewelina Krawczak, Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38, tel. 81 538 45 02; e.krawczak@pollub.pl

[2] Agata Zdyb, Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38, tel. 81 538 47 47; a.zdyb@pollub.pl

## 1. Wprowadzenie

W ostatnich latach nastąpił intensywny rozwój fotowoltaiki na świecie, spowodowany wyczerpywaniem zasobów paliw kopalnych, wzrostem ich cen oraz uniezależnieniem się od krajów posiadających złoża kopalniane. Nie bez znaczenia są też klimatyczne konsekwencje spalania czyli emisja gazów cieplarnianych z paliw kopalnych. W wyniku wielu zmian legislacyjnych, jak również zgodnie z europejską strategią Unii Energetycznej oraz z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2012/27/UE z dnia 25 października 2012 r. w sprawie efektywności energetycznej Polska do 2020 r. powinna uzyskać 15% udziału OZE w produkcji energii. Przyjęte na szczycie Unii Europejskiej w październiku 2014 r. nowe ramy klimatyczno-energetyczne zakładają kolejne, wieloletnie działania zapobiegające zmianom klimatu poprzez redukcję emisji dwutlenku węgla, a także zwiększenie udziału energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych. Kraje członkowskie UE muszą dążyć do poprawy efektywności energetycznej o 27% do roku 2030. Zgodnie z danymi pochodzącymi z Urzędu Regulacji Energetyki zainstalowana moc w polskich elektrowniach wytwarzających energię elektryczną z promieniowania słonecznego wynosi 87,718 MW (stan z dnia 31.03.2016 r.). Do roku 2016 zostało zgłoszonych w Polsce 267 elektrowni wytwarzających energię z promieniowania słonecznego i około 3 tysięcy mikroinstalacji, w tym w 2015 r. - 2,1 tysiąca instalacji (systemy *on-grid*) [1].

Zachodzące zmiany na rynku energetycznym motywują dotychczasowego konsumenta, aby stał się prosumentem energii elektrycznej [2]. Prosument może całkowicie uniezależnić się od dostawcy energii elektrycznej konsumując energię, którą sam wytworzy w systemie autonomicznym (*off-grid)*. Drugim typem instalacji prosumenckich najczęściej instalowanych na dachach budynków wolnostojących są systemy *on-grid* (rys.1) współpracujące z siecią przesyłową [3].




Rys. 1 Schemat instalacji prosumenckiej: 1–moduły fotowoltaiczne, 2-falownik, 3-obciążenie pochodzące z urządzeń elektrycznych, 4-urządzenie służące do pomiaru energii elektrycznej oddawanej do sieci energetycznej, 5-urzadzenie służące do pomiaru energii elektrycznej kupowanej z sieci, 6-podłączenie do sieci przesyłowej

Fig. 1 Schematic diagram of the prosumer photovoltaic system: 1–PV modules, 2-inverter, 3-load, 4-electricity meter for production, 5- electricity meter for consumption, 6-utility grid

Instalacje *on-grid* samoczynnie sterują eksportem i importem wytworzonej energii, dlatego są to układy niezawodne. Jeżeli uzysk przewyższa zapotrzebowanie energetyczne gospodarstwa domowego, to nadwyżka energii sprzedawana jest do sieci elektroenergetycznej, w przypadku niedoboru istnieje możliwość dokupienia jej od lokalnego dystrybutora [4]. W systemie przyłączonym do sieci

przesyłowej można wyróżnić część stałoprądową DC, w której energia elektryczna dostarczana jest w postaci prądu stałego. W skład części DC wchodzi: moduł PV, przewody, skrzynki rozdzielcze oraz konstrukcje nośne. Kolejną częścią jest zmiennoprądowa AC, w której energia dostarczana jest za pomocą prądu przemiennego, zawierająca następujące elementy: falowniki, przewody, elementy ochronne i urządzenia pomiarowe.

W Polsce brakuje wyraźnego wsparcia inwestycji w fotowoltaikę pomimo rosnącego zainteresowania systemami PV [5]. Niezbędna jest długookresowa strategia rozwoju wspierająca indywidulanych konsumentów energii elektrycznej poprzez wprowadzenie różnych systemów wsparcia inwestycyjnego [6]. Jednym z nich jest program PROSUMENT realizowany przez NFOŚiGW, który wspiera zakup i montaż mikroinstalcji przyjaznych środowisku, a także dba o podniesienie świadomości ekologicznej Polaków. Istnieją dwie możliwości wsparcia potencjalnych prosumentów: przy pomocy bezzwrotnego dofinansowania 40% kosztów kwalifikowanych (w latach 2014-2016), 30% od roku 2016 lub za pomocą taryfy gwarantowanej FIT. Mechanizm wsparcia FIT zapewnia beneficjentowi programu stałą stawkę energii 0.75 zł/kWh dla instalacji do 3 kW oraz 0.65 zł/kWh dla instalacji od 3 do 10 kWh.

Wydajność energetyczna instalacji fotowoltaicznej zależy od wielu czynników [7-8]. Jednym z najważniejszych jest ilość promieniowania słonecznego padającego na powierzchnię modułów, co z kolei zależne jest od lokalnych warunków pogodowych. Określenie potencjału energii promieniowania słonecznego jest kluczowe dla prognozy uzysku energii z instalacji słonecznej [9]. Polska posiada porównywalne warunki klimatyczne jak Niemcy, obecny lider technologii OZE, który w maju 2016 r. po raz pierwszy w historii zapewnił całodzienne pokrycie zapotrzebowania energetycznego w państwie energią z odnawialnych źródeł. Położenie geograficzne instalacji (długość i szerokość geograficzna) wraz z indywidualnymi cechami systemu, takimi jak orientacja względem azymutu czy też kąt pochylenia modułów determinują uzysk energetyczny oraz wydajność pracy systemu. Najkorzystniejsze jest usytuowanie modułów pod kątem $35^0$ względem poziomu (w naszej szerokości geograficznej) i zwrócenie ich na południe (azymut $0^0$). Połacie dachowe w istniejących domach mają jednak różne kąty nachylenia oraz różną orientację azymutu. W celu uzyskania maksymalnej energii należy rozważać ułożenie modułów w różnych konfiguracjach. W przedstawionej pracy porównane są dwa warianty rozmieszczenia modułów, dla których produkcja energii zmienia się wraz ze zmianą azymutu.

## 2. Metodyka

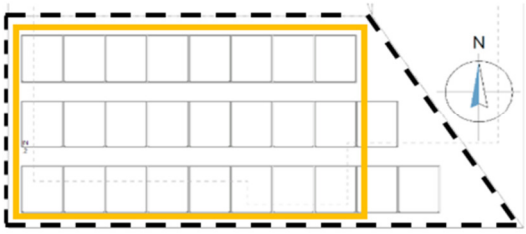
Dane dotyczące uzysku energetycznego, które zostały przeanalizowane w dalszej części pracy pochodzą z oprogramowania DDS-CAD, wersja 11, które jest narzędziem wspomagającym projektowanie, pozwalającym projektować instalacje fotowoltaiczne dowolnie zintegrowane z budynkiem, jak również sys-

temy naziemne. Dzięki zaimplementowanym do programu DDS-CAD modułom (sanitarno-grzewczy, wentylacyjno – klimatyzacyjny, elektrotechniczny oraz fotowoltaiczny) możliwe jest tworzenie wielobranżowych, kompleksowych opracowań. Każdy moduł dedykowany jest inżynierom innej branży, co pozwala na tworzenie indywidualnej instalacji będącej integralną częścią opracowywanego modelu. Występujący w programie moduł architektoniczny, współpracujący z każdym z pozostałych komponentów, pozwala na stworzenie dwuwymiarowego oraz trójwymiarowego modelu budynku. Prototyp konstrukcji tworzony jest na podstawie dwuwymiarowych podkładów architektonicznych stworzonych w innych programach grafiki inżynierskiej (np. *.dwg, *.jpg czy *.pdf). Wykorzystana nowoczesna technologia BIM (*Building Information Modeling*) dodatkowo usprawnia i intensyfikuje pracę. Jest to narzędzie odwzorowujące fizyczne i funkcjonalne właściwości tworzonego projektu. Posługiwanie się wirtualnym modelem umożliwia uzyskanie pełnej dokumentacji projektowej – części rysunkowej oraz obliczeniowej, analizy ekonomicznej, czy też zestawienia materiałów. Program ten wyróżnia się nowatorską technologią pozwalającą na wyeliminowanie możliwych błędów, kolizji oraz na wirtualne sprawdzenie wszystkich aspektów planowanej konstrukcji, instalacji już na etapie projektowania, jak również wykonanie analizy nasłonecznienia instalacji PV. Powstający model jest wirtualnym odwzorowaniem rzeczywistych elementów budynku oraz instalacji w standardzie zorientowanym obiektowo, co optymalizuje proces projektowania, wykonania, a także zakończenia inwestycji.

## 3. Wyniki i analiza

W celu sprawdzenia zmiany uzysku energetycznego w zależności od zmiany orientacji geograficznej analizie poddano instalację fotowoltaiczną o mocy 4,8 kWp zintegrowaną z dachem budynku jednorodzinnego dwukondygnacyjnego o łącznej powierzchni 150 $m^2$. Inwestycję przewidziano w miejscowości Warszawa w województwie mazowieckim w III strefie klimatycznej. Budynek zaprojektowany jest do zamieszkania przez 5 osób. Do obliczeń uzysku energetycznego przyjęto dane klimatyczne pobrane z oprogramowania Meteonorm 7, zintegrowanego z programem DDS-CAD.

Przewidziano dwie konfiguracje rozmieszczenia modułów (rys. 2) oraz dwa warianty obliczeniowe instalacji słonecznej. W pierwszej konfiguracji założono wykorzystanie prostokątnej części trapezowatej powierzchni połaci dachu. Część zadaszenia nie została uwzględniona w symulacji, z uwagi na ustandaryzowanie kształtu przykrycia dachowego. Zaprojektowano system zbudowany z 24 sztuk modułów polikrystalicznych firmy Solar EnerTech (Shanghai) Co., typ SE200 54P o mocy nominalnej 200 W. Powierzchnia modułu wynosi 1,494 $m^2$, sprawność 14%. Przewidziano montaż instalacji na połaci dachowej zorientowanej w kierunku południowym o wymiarach 8,7 m x 5,5 m, powierzchni 47,85 $m^2$ oraz kącie nachylenia $23{,}6^0$. W wariancie I zbadano zmiany



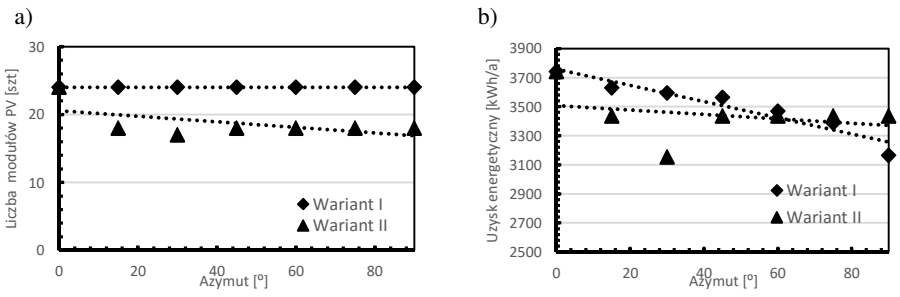

Rys. 2 Konfiguracje instalacji fotowoltaicznej, linia ciągła – konfiguracja I, linia przerywana –konfiguracja II

Fig. 2 Configurations of PV installation, solid line – configuration I, dotted line – configuration II

uzysku energetycznego przy zmianie azymutu. Symulacje uzysku energii elektrycznej zostały wykonane w krokach, co piętnaście stopni zmian azymutu.

Moduły zostały rozmieszczone w trzech rzędach po 8 sztuk zachowując niezbędne odstępy montażowe oraz nachylenie $12{,}4^0$ do połaci dachowej (wartość inklinacji - $36^0$). Odsunięcie od siebie kolejnych rzędów instalacji zapewnia uniknięcia zacienienia.

Drugi wariant obliczeniowy zakłada zmianę azymutu z jednoczesną zmianą kąta skierowania modułów fotowoltaicznych, tak aby moduły zainstalowane na dodatkowych stelażach były zawsze zwrócone na południe. Zachowano kąt pochylenia modułów względem połaci dachowej. Przy założeniu wykorzystania całej powierzchni dachu w pierwszej konfiguracji obliczeniowej liczba modułów PV jest stała i wynosi 24 sztuki. Przy zmianie azymutu powstający za generatorami cień zwiększa się, obligując jednocześnie do wydłużenia odległości pomiędzy kolejnymi rzędami paneli. Powoduje to spadek ilości paneli do 17 sztuk (rys. 3a). Na rysunku 3b przedstawiono uzysk energetyczny wygenerowany na podstawie symulacji pracy instalacji fotowoltaicznej. W obu wariantach obliczeniowych najkorzystniejszy uzysk energetyczny wynosi 3740,86 kWh/a przy azymucie $0^0$.

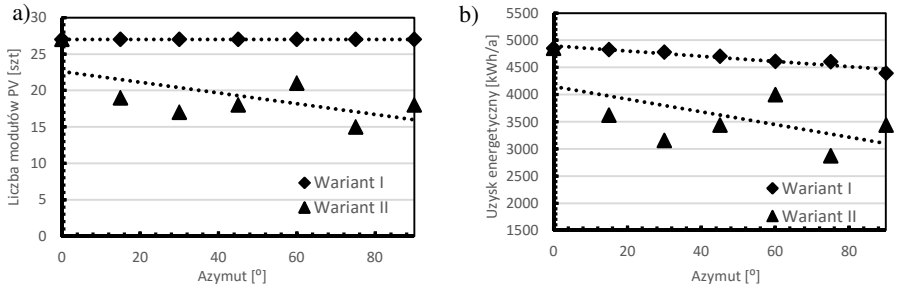



Rys. 3 a) Zależność liczby modułów PV od kierunku azymutu, b) Zależność uzysku energetycznego od kierunku azymutu

Fig. 3 a) Dependence of quantity of PV modules on the azimuth, b) Dependence of energy yield of PV modules on the azimuth

Spadek ilości wytwarzanej energii pomiędzy azymutem $0^0$ i $90^0$ dla pierwszego wariantu obliczeniowego wynosi 577,15 kWh/a, dla drugiego 305,49 kWh/a. Współczynnik uzysku energetycznego dla instalacji w wariancie I wynosi 6,41 kWh przy zmianie azymutu o $1^0$ w stosunku rocznym, w wariancie II - 9,64 kWh/a/$^0$.

W drugiej konfiguracji (rys. 2) przeanalizowano pracę instalacji fotowoltaicznej przy założeniu wykorzystania całej powierzchni połaci dachowej, o kształcie trapezu prostokątnego. Powierzchnia przeznaczona pod montaż instalacji fotowoltaicznej wynosi 57,75 m$^2$. Założono takie same warianty obliczeniowe jak w konfiguracji pierwszej. Na rysunku 4a przedstawiono liczbę modułów fotowoltaicznych w zależności od azymutu. W przypadku zmiany azymutu ilość ta jest stała (27 sztuk), natomiast przy jednoczesnej zmianie kąta położenia instalacji względem okapu połaci dachowej liczba modułów ulega zmianie w zakresie 15-27 sztuk. W przypadku niestandardowych kształtów połaci dachowej, to właśnie jej forma jednoznacznie determinuje wielkość instalacji. Wartość uzysku energetycznego (rys. 4b) dla kierunku azymutu najbardziej i najmniej korzystnego dla pierwszego wariantu obliczeniowego wynosi 459,81 kWh/a, natomiast dla drugiego 1980,41 kWh/a. Tak znaczna różnica uzysku energii (wariant II) spowodowana jest dużą rozbieżnością pomiędzy kątem krawędzi połaci oraz kierunku azymutu. Różnica uzysków energetycznych pomiędzy wariantami spowodowana jest przede wszystkim zmianą ilość modułów PV, których liczba zależy od występującej pomiędzy nimi strefy zacienienia, a także specyficznej konstrukcji więźby dachowej. Kluczowe znaczenie ma krawędź połaci dachowej poprowadzonej pod niestandardowym kątem. Gdy kąt krawędzi połaci pokrywa się z kątem posadowienia paneli to możliwe jest wykorzystanie prawie całej powierzchni tej części dachu. W momencie, gdy te dwa kąty nie współgrają ze sobą zostaje niewykorzystane nawet do 20% powierzchni połaci dachowej.




Rys. 4 a) Zależność liczby modułów PV od kierunku azymutu, b) Zależność uzysku energetycznego od kierunku azymutu

Fig. 4 a) Dependence of quantity of PV modules on the azimuth, b) Dependence of energy yield of PV modules on the azimuth

## 4. Podsumowanie

Ilość produkowanej energii elektrycznej jest ściśle związana z położeniem modułów fotowoltaicznych względem azymutu. Jest to czynnik determinujący wydajność pracy systemu słonecznego, niezależnie od technologii wykonania budujących go ogniw fotowoltaicznych. W przypadku istniejącego budynku należy zadecydować, jaki sposób montażu instalacji sprawdzi się najlepiej, wykorzystujący całą powierzchnię połaci dachowej czy montując moduły PV zgodnie z kierunkiem azymutu. Zależy to przede wszystkim od indywidualnej konstrukcji więźby dachowej, kształtu poszczególnych połaci oraz możliwości wykorzystania jak największej powierzchni, pomimo zmiany kąta usytuowania modułów PV względem okapu połaci dachowej. W przypadku montażu modułów na prostokątnej połaci zorientowanej w zakresie 0 - $60^0$ w stosunku do azymutu korzystniejsze uzyski energetyczne występują przy całkowitym wykorzystaniu jej powierzchni. W przypadku odchylenia o kąt 75-$90^0$ wariant zakładający, iż moduły są zawsze zwrócone na południe uzyskuje o 8% lepsze rezultaty. Przy wykorzystaniu całej powierzchni połaci (niezależnie od kształtu), w obu wariantach następuje spadek generowanej energii odpowiednio o 15% i 40%. Uwzględniając otrzymane wyniki ze wszystkich rozpatrywanych wariantów należy zauważyć, iż największy uzysk energetyczny generuje system fotowoltaiczny wykorzystujący całą powierzchnię dachu (nawet przy niestandardowym kształcie połaci) niezależnie od odchylenia od kierunku azymutu. Inżynier przed rozpoczęciem procesu projektowania musi rozważyć obie konfiguracje uwzględniając konstrukcję dachu istniejącego budynku. Dzięki wykorzystaniu symulacji komputerowych tworzonych m.in. w programie DDS-CAD, możliwe jest sprawdzenie wielu wariantów obliczeniowych i zrealizowanie inwestycji najefektywniejszej energetycznie.

## Literatura

[1] Pietruszko S.: Fotowoltaika - przyszłość bezpieczeństwa energetycznego, Warunki Techniczne 1 nr 12 2016, s. 26-29.

[2] Olchowik J. M., Cieslak K., Gulkowski S., Mucha J., Sordyl M., Zabielski K., Szymczuk D., Zdyb A.: Progress of development of PV systems in south-eastern Poland, Proc. of 35th IEEE PVSC Honolulu, Hawaii, 20-25 June 2010, p. 002397-002399.

[3] Stryczewska D.: Energie odnawialne. Przegląd technologii i zastosowań, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2012.

[4] Klugmann-Radziemska E.: Fotowoltaika w teorii i praktyce, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2010.

[5] Olchowik J. M., Dragan P., Gembarzewski O., Gulkowski S., Szymczuk D., Tomaszewski R.: The reasons of the delays in introducing in Poland law regulations favorable for photovoltaics. Procedings of the 28th EU PVSEC, Paris, France, 2013, p. 4676-4679.

[6] Olchowik J. M., Cieslak K., Gulkowski S., Mucha J., Sordyl M., Zabielski K., Szymczuk D., Zdyb A.: Activation of polish public administration bodies and business within the IEE PVS in Bloom Project, Proc. of 26th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, Hamburg, Germany, October 2011, p. 4693-4696.
[7] Krawczak E., Gułkowski S., Olchowik J.M.: Badanie efektywności pracy fotowoltaicznego systemu „off-grid" w warunkach zimowo-wiosennych dla Lubelszczyzny, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury - Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, t. XXXI, z. 61 (3/II/14), 2014, s. 317-328, DOI:10.7862/rb.2014.98.
[8] Mroziński A.: Badanie efektywności energetycznej laboratoryjnej instalacji fotowoltaicznej, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury - Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, t. XXXI, z. 61 (3/II/14), 2014, s. 357-366, DOI:10.7862/rb.2014.102.
[9] Siuta-Olcha A.: Potencjał energii promieniowania słonecznego w województwie lubelskim. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej Nr 283, Budownictwo i Inżynieria Środowiska z. 59 (2/2012/II), 2012, s. 693-698.

## ANALYSIS OF PHOTOVOLTAIC INSTALLATION WORK ACCORDING TO GEOGRAPHICAL ORIENTATION

**S u m m a r y**

The market of a renewable energy sources is still developing. Electricity demand is increasing and fossil fuels are being depleted. The alternative for them are renewable energy sources, their reserves are replenished in the natural ecosystem processes, which proves the fact of their being unexhausted. Legislative changes in Poland caused a big interest in small photovoltaic installations, and consequently the energy consumer may become electricity prosumer. Market development of renewable energy sources challenges designers continuously because designing the high efficiency photovoltaic systems for existing buildings, taking into account local conditions and existing buildings architecture, is extremely difficult. The yield of solar energy system depends on many factors. One of the most important is the value of solar radiation depending on the location (geographical latitude), as well as the orientation of the designed system with respect to the azimuth. Supportive and labor-saving computer software for design PV systems is DDS-CAD, which allows to simulate electricity yield. The results of simulation allows for quick comparison of various virtual models of installations taking into account their efficiency and quick select of the most advantageous variant according to geographical orientation. In this paper, the results of virtual simulation models of photovoltaic systems in terms of the number of PV generators and the size of the energy yield have been analyzed. The analysis was conducted assuming the use of whole-surface roof and taking into account changes in the angle of PV modules placement in relation to the eaves of the roof slope and azimuth direction.

**Keywords:** photovoltaics, solar energy, renewable energy, DDS-CAD

DOI:10.7862/rb.2016.201

*Przesłano do redakcji: 25.05.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 201-210

**Jan KRUPA**[1]
**Andrzej MANTAJ**[2]
**Piotr KOSZELNIK**[3]

# GOSPODARKA ENERGETYCZNA A OCHRONA ŚRODOWISKA W OPINII RÓŻNYCH GRUP RESPONDENTÓW. Część 1

Celem badań była ocena prezentowanych przez respondentów opinii w zakresie szeroko rozumianej gospodarki energetycznej, z uwzględnieniem jej oddziaływania na środowisko oraz znaczenia różnych nośników energii. Analizę oparto na 1036 kwestionariuszach ankiet, wypełnionych w okresie październik – grudzień 2015 r. W niniejszej części opracowania poddano analizie kształtowanie się ocen ankietowanych osób bez uwzględniania opisujących je charakterystyk. Stwierdzono, że w opinii respondentów poziom wiedzy społeczeństwa w zakresie ochrony środowiska, a zwłaszcza przyrody jest ciągle niski, natomiast wpływ człowieka na globalne ocieplenie – znaczny. Za najgroźniejsze gazy cieplarniane, z uwagi na skalę ich oddziaływania, uznano, w kolejności ich ważności: dwutlenek węgla, freony i halony, metan, tlenki siarki, tlenki azotu oraz parę wodną. Zastosowanie trzech najważniejszych tradycyjnych źródeł energii (węgiel kamienny, gaz i węgiel brunatny) dla kraju i województwa podkarpackiego uznano za takie samo, przy czym energetyce jądrowej dla podkarpackiej gospodarki przypisano mniejszą atrakcyjność, aniżeli dla Polski. Skłonność do zamiany pieca węglowego na bardziej ekologiczne źródło energii wyraziła prawie połowa respondentów, a tylko jedna piąta ich liczby akceptuje budowę siłowni atomowej. Przeprowadzona analiza dowodzi dużych rozbieżności między opiniami respondentów, a stanem rzeczywistym problematyki będącej przedmiotem badań. Wynika stąd potrzeba szerszego informowania społeczeństwa o stanie i kierunkach rozwoju gospodarki energetycznej w oparciu o rzetelne i aktualne argumenty.

**Słowa kluczowe:** emisja zanieczyszczeń, zanieczyszczenie klimatu, konsultacje społeczne, energetyka jądrowa

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Jan Krupa, Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Rzeszowie, e-mail: jkrupa@wsiz.rzeszow.pl

[2] Andrzej Mantaj, Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania w Rzeszowie

[3] Piotr Koszelnik, Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza, Wydział Budownictwa Inżynierii Środowiska i Architektury, pkoszel@prz.edu.pl

## 1. Wprowadzenie

Za jedną z najważniejszych przyczyn współczesnych zmian klimatu uznaje się emisję $CO_2$ w wyniku spalania paliw kopalnych, tj. ropy, gazu i węgla. Toksyczność atmosfery, będąca wynikiem spalania paliw ze źródeł nieodnawialnych jest obecnie przedmiotem ciągłych badań. Ze spalania tylko samego węgla w naszym kraju powstaje w ciągu roku około 4-5 milinów ton zanieczyszczeń stałych oraz duże ilości zanieczyszczeń gazowych. Szacuje się, że z powodu zanieczyszczenia powietrza umiera w Polsce około 45 tys. osób rocznie, m.in. z powodu ponadnormatywnego stężenia np. pyłu zawieszonego, który wywołuje choroby płuc i układu krążenia [5]. Europejska Agencja Ochrony Środowiska (EEA) opracowała ranking, według którego aż 6 polskich miast znajduje się w pierwszej dziesiątce tych najbardziej zanieczyszczonych w Europie. Wynika to m.in. z niskiej jakości powietrza powodowanej wysoką energochłonnością budynków.

Znaczący wpływ na jakość środowiska przyrodniczego w Polsce ma elektroenergetyka. [8]. Oddziaływanie to powodowane jest nie tylko zużywaniem energetycznych surowców kopalnych, ale także zanieczyszczaniem środowiska naturalnego gazami, pyłami i innymi odpadami procesu spalania. Konkurencja między elektrowniami wymusza ich dostosowywanie się do zaostrzonych wymagań środowiskowych i ekonomicznych oraz do zmieniającego się otoczenia. Dla jednych elektrowni stanowi to szansę, a dla innych jest to poważne zagrożenie. Z uwagi na członkostwo w UE, Polska została zobowiązana do wypełniania szeregu warunków związanych z ochroną środowiska, wcześniej nie branych pod uwagę. Ekologicznymi celami polityki energetycznej UE są, m.in.: redukcja emisji dwutlenku węgla, jako dominującego gazu cieplarnianego, oraz zmiana struktury paliw, w tym wzrost udziału energii odnawialnej w zużyciu energii.

Rozwój społeczno-gospodarczy oraz potrzeba chwili sprawiają, że istnieje konieczność zastosowania w zakresie ochrony środowiska racjonalnych rozwiązań. Wyraża je także zasada zrównoważonego rozwoju, która określona została w wielu ustawach i rozporządzeniach UE. Przedstawione w pracy wyniki badań mają na celu prezentację tej problematyki w odniesieniu do kraju, a w szczególności do województwa podkarpackiego, a jej wyrazem są opinie, wiedza i działania praktyczne badanych respondentów, świadczące o poziomie ich świadomości ekologicznej.

Celem opracowania była ocena prezentowanych przez respondentów opinii w zakresie szeroko rozumianej gospodarki energetycznej, z uwzględnieniem jej oddziaływania na środowisko oraz znaczenia różnych nośników energii. Materiał badawczy uzyskano na podstawie analizy danych z kwestionariuszy ankiet wypełnionych przez osoby zamieszkujące w zdecydowanej większości teren województwa podkarpackiego. W niniejszej części opracowania zaprezentowano zebrane opinie bez uwzględniania opisujących respondentów charakterystyk. Ocena oddziaływania tych charakterystyk, jako uwarunkowań wyrażanych poglądów, będzie przedmiotem interpretacji zawartej w drugiej części artykułu. Przedstawiona tu analiza ma więc na celu przede wszystkim uchwycenie dominujących tendencji poglądów zakresie problematyki będącej przedmiotem badania.

## 2. Materiał źródłowy i metodyka analizy wyników badań

Podstawę przeprowadzonej analizy stanowiły wypełnione, przez 1036 osób w okresie październik – grudzień 2015 r., kwestionariusze ankiet. Wśród respondentów zdecydowanie dominowali mieszkańcy województwa podkarpackiego (995), a ponadto pochodzili oni z województw: lubelskiego (21), małopolskiego (15) oraz śląskiego (5). Nie wszystkie spośród kwestionariuszy zawierały kompletny odpowiedzi, w związku z czym przy opisie poszczególnych problemów podano rzeczywistą liczbę wypowiedzi dotyczącą danego zagadnienia.

Respondenci wyrażali swoje opinie głównie poprzez wybór jednego z trzech poziomów akceptacji podanych określeń opisujących przedmiot badania, przy czym 1 oznaczało zawsze najwyższy stopień jego aprobaty. Pozostała część wypowiedzi miała charakter zero-jedynkowy i polegała na przyjęciu lub odrzuceniu danego poglądu.

Opinie badanych osób zebrano w dwuwymiarowych tablicach zawierających odsetki wypowiedzi wskazujących stopień znaczenia lub, w przypadku odpowiedzi zero-jedynkowych, fakt akceptacji podanych określeń. Tablice te stanowiły więc sposób prezentacji danych, a jednocześnie podstawę analizy wyników badań [6].

## 3. Analiza wyników badań

Przed rozpoczęciem analizy przedstawione zostały charakterystyki osób, które brały udział w ankietyzacji, a następnie ich opinie w całej badanej próbie, jednak bez uwzględniania determinant wypowiedzi. Rozkłady ocen respondentów na tle ich charakterystyk zostały omówione w drugiej części opracowania.

Charakterystyki opisujące badane osoby ze względu na ich wiek, płeć, miejsce zamieszkania, wykształcenie oraz stopień zainteresowania problematyką w zakresie ochrony środowiska podano w tabeli 1.

Tabela 1. Charakterystyka respondentów

Table 1. The characteristics of the respondent

| Wyszczególnienie | Cechy różnicujące respondentów | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Wiek (lata) | | Płeć | | Zamieszkanie | | Wykształcenie | | Zainteresowanie ochroną środow. | |
| | ≤ 25 | > 25 | K | M | Wieś | Miasto | Zaw./ Śr. | Wyższe | Mała | Duża |
| Liczba respondentów | 416 | 620 | 617 | 419 | 570 | 466 | 648 | 388 | 838 | 198 |
| Odsetek respondentów [%] | 40,2 | 59,8 | 59,6 | 40,4 | 55,0 | 45,0 | 62,5 | 37,5 | 80,9 | 19,1 |

Źródło: opracowanie własne

Około 60% liczby respondentów stanowiły osoby w wieku powyżej 25 lat oraz kobiety, osoby z wykształceniem średnim lub zawodowym – 62,5% i 55% - mieszkańcy wsi. Duże zainteresowanie ochroną środowiska wykazało 19,1% ankietowanych. Oznacza to podobny rozkład liczby osób z uwagi na wiek, płeć i wykształcenie oraz zbliżony do poprzednich – ze względu na miejsce zamieszkania.

Z uwagi na to, że energetyka w kontekście ochrony środowiska kojarzona jest najczęściej z jej wpływem na emisję gazów i związanym z nią globalnym ociepleniem, w tabeli 2 przedstawiono opinie dotyczące tego zjawiska, a także wyrażoną przez ankietowanych ocenę poziomu wiedzy społeczeństwa dotyczącą zagadnień ochrony środowiska.

Tabela 2. Poziom wiedzy społeczeństwa dotyczącej ochrony środowiska i wpływu człowieka na globalne ocieplenie wg odsetek 1036 wypowiedzi [%]

Table 2. The level of public awareness concerning the protection of the environment and the human impact on global warming. The percentage of 1036 expressions [%]

| Wyszczególnienie | Skala zjawiska | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| **Wiedza społeczeństwa dotycząca ochrony środowiska** | 11,1 | 34,0 | 54,9 |
| **Wpływ człowieka na globalne ocieplenie** | 57,4 | 27,4 | 15,2 |

Źródło: opracowanie własne

Łatwo można zauważyć, że poziom tej wiedzy w społeczeństwie, wg opinii respondentów, jest niewielki, ponieważ najwyższy jej stopień przypisany został tylko ok. 11% obywateli, a ponad ich połowa została uznana za posiadającą tylko słabą znajomość tej problematyki. Z kolei ponad 57% osób uznało wpływ człowieka na globalne ocieplenie za bardzo istotny.

Wpływ gazów emitowanych z różnych źródeł na stan środowiska uzależniony jest zarówno od ich ilości, jak i rodzaju. W tabeli 3 podano częstości opinii dotyczących udziału i szkodliwości gazów cieplarnianych z uwagi na powszech-

Tabela 3. Szkodliwość gazów cieplarnianych ze względu na skalę ich oddziaływania na zdrowie człowieka wg odsetek 1036 wypowiedzi [%]

Table 3. The harmfulness of greenhouse gases due to the scale of their impact on human health. The percentage of 1036 expressions [%]

| Rodzaj gazu | Wskazania | |
|---|---|---|
| | Liczba | Odsetek |
| **Dwutlenek węgla** | 315 | 30,4 |
| **Freony i halony** | 226 | 21,8 |
| **Metan** | 203 | 19,6 |
| **Tlenki siarki** | 172 | 16,6 |
| **Tlenki azotu** | 80 | 7,7 |
| **Para wodna** | 40 | 3,9 |

Źródło: opracowanie własne

ność i niebezpieczeństwo ich oddziaływania na zdrowie człowieka. Około 30% osób wskazało w tym względzie na dwutlenek węgla, a na następne, co do udziału i szkodliwości - tlenki azotu, już tylko niespełna 8% ankietowanych. Świadczy to o stosunkowo dobrej znajomości tego problemu, bowiem udział $CO_2$ w strukturze wszystkich gazów cieplarnianych określany jest na poziomie ok. 50%, natomiast udział związków azotu stanowi ok. 18% [2]. Z kolei udział $CO_2$, według jego bezpośredniego wpływu na efekt cieplarniany, określany jest na poziomie od 9–26%, metanu 4-9%, natomiast największy udział przypisywany jest parze wodnej 36-72%, która należy do najpowszechniejszych gazów cieplarnianych w atmosferze [3].

Należy tu jednak zaznaczyć, że antropogeniczna emisja dwutlenku węgla jest pięciokrotnie mniejsza od naturalnej, przy zdefiniowaniu jej jako działalności wulkanicznej i procesów zachodzących w glebie [4]. Całkowita emisja gazów cieplarnianych spadła o blisko 30% od początku transformacji polskiej gospodarki, natomiast emisje pochodzące z transportu wzrosły o niemal 75%, co jest wywołane intensywnym rozwojem motoryzacji, przy spadku udziału transportu kolejowego w przemieszczaniu towarów.

Problem globalnego ocieplenia budzi wiele kontrowersji. Pytania o skutki globalnego wzrostu temperatury, wpływu poszczególnych gazów oraz działalności człowieka na zmianę klimatu, pomimo różnych opinii, mają istotne znaczenie i zasługują na szczegółowe badania wyjaśniające i krytyczną analizę, bowiem przecenianie wagi efektu cieplarnianego przy zbyt wielkich restrykcjach w zużyciu paliw może doprowadzić do zahamowania rozwoju cywilizacyjnego, a niedocenianie - katastrofę środowiska naturalnego [7]. Ważna więc wydaje się w dalszym ciągu ocena tego zagrożenia, stały monitoring zanieczyszczeń atmosfery i próby ograniczania emisji szkodliwych gazów podejmowane przez poszczególne państwa. Działania te powinny mieć charakter globalny, przy czym powszechnie niedoceniany bezpośredni wpływ każdego mieszkańca naszej planety w powyższym zakresie może jednak negatywnie wpływać na indywidualne działania mające na celu ograniczanie emisji rodzajów gazów.

Częstym przedmiotem dyskusji w środkach masowego przekazu jest wybór odpowiednich źródeł energii wykorzystywanych w gospodarce, a w tabeli 4 przedstawiono dotyczącą tego zagadnienia strukturę częstości opinii badanych osób.

Tabela 4. Tradycyjne źródła energii i ich znaczenie dla gospodarki Polski wg odsetek 991 wypowiedzi [%]

Table 4. Traditional energy sources and their significance in Polish economy. The percentage of 991 expressions [%]

| Źródła energii | Znaczenie źródeł energii | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| **Węgiel kamienny** | 48,3 | 26,1 | 25,6 |
| **Gaz** | 44,5 | 44,2 | 13,3 |
| **Węgiel brunatny** | 38,0 | 35,1 | 26,9 |
| **Łupki bitumiczne** | 25,1 | 25,4 | 49,4 |
| **Ropa** | 22,7 | 48,1 | 29,2 |
| **Energia jądrowa** | 21,3 | 23,0 | 55,7 |

Źródło: opracowanie własne

Najwięcej (ok. 48%) z nich za najważniejsze w tym względzie źródło energii podało węgiel kamienny i jest to zgodne z aktualną polityką rządu. Następną pozycję wśród źródeł energii stanowił gaz. Co prawda korzystanie z niego uwarunkowane jest importem tego surowca, to jednak produkty jego spalania są zdecydowanie mniej uciążliwe dla środowiska i zdrowia człowieka, aniżeli emisje będące wynikiem spalania węgla. Pozostałym nośnikom energii nadano mniejsze znaczenie, co wiąże się także z ich ograniczoną dostępnością. Zwraca jednak uwagę fakt, że jedna piąta respondentów do najważniejszych źródeł energii była skłonna zaakceptować elektrownie atomowe.

W innych badaniach, przeprowadzonych w 2009 r., wykazano dużą akceptację dla energetyki jądrowej (23,7%), jako przyszłego źródło pozyskiwania energii [1]. Wyniki tych badań odniesione do uzyskanych w 2008 r. wskazały, że akceptacja energetyki jądrowej wzrosła prawie o 70%, zajmując drugie, po surowcach i źródłach odnawialnych, miejsce wśród zaproponowanych nośników energii. Awans energetyki jądrowej wystąpił tu kosztem wszystkich pozostałych rozwiązań, przy czym na uwagę zasługuje także fakt, że największy spadek wskazań w tych badaniach dotyczył zjawiska zmniejszenia się skłonności do oszczędzania energii.

Należy jeszcze zaznaczyć, że wytwarzanie $CO_2$ w procesie spalania węgla jest tylko jednym z wielu czynników wpływających na zmianę klimatu na Ziemi, a gaz ten jest naturalnym składnikiem atmosfery, podobnie jak woda, metan i związki azotu, tworzące wokół Ziemi otulinę gazów cieplarnianych, niezbędnych dla istnienia życia. Działania informacyjne o dużym wpływie $CO_2$ na globalne ocieplenie i jego szkodliwości skierowane są głównie przeciwko wykorzystywaniu energii konwencjonalnej pochodzącej ze spalania węgla kopalnego, którego zamiennika upatruje się w energii jądrowej.

Alternatywą dla nieodnawialnych źródeł energii jest energia odnawialna. Odsetki opinii respondentów dotyczących znaczenia poszczególnych jej źródeł, z jakich powinna korzystać polska gospodarka, przedstawiono w tabeli 5. Wyniki ba-

Tabela 5. Alternatywne źródła energii i ich znaczenie dla gospodarki Polski wg odsetek 968 wypowiedzi [%]

Table 5. Alternative energy sources and their importance to the Polish economy The percentage of 991 expressions [%]

| Źródła energii | Znaczenie źródeł energii | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| **Kolektory słoneczne** | 58,1 | 34,3 | 7,6 |
| **Ogniwa fotowoltaiczne** | 45,9 | 44,4 | 9,7 |
| **Energia wiatru** | 31,8 | 56,2 | 12,0 |
| **Energia wodna** | 19,8 | 67,1 | 13,0 |
| **Biomasa** | 12,2 | 54,4 | 33,4 |
| **Geotermia** | 11,8 | 56,9 | 31,3 |
| **Drewno** | 10,9 | 33,3 | 55,8 |
| **Biogaz** | 9,5 | 53,3 | 37,2 |

Źródło: opracowanie własne

dań wskazują, że najczęściej w tym zakresie spośród urządzeń umożliwiających pozyskiwanie energii odnawialnej wymieniano kolektory słoneczne oraz ogniwa fotowoltaiczne, a następnie elektrownie wiatrowe. Zapewne są to najbardziej czyste odnawialne źródła energii, aczkolwiek mocno uzależnione od warunków pogodowych i ze względów technicznych, ciągle o stosunkowo niskim potencjale.

Ponadto wskazano, aczkolwiek w dużo mniejszym stopniu, na znaczenie energii wodnej oraz geotermii, a dopiero potem na produkcję biomasy. Przedstawione opinie, dotyczące najważniejszych sposobów pozyskiwania energii, mogą odbiegać od powszechnie panujących w tej dziedzinie poglądów, zwłaszcza wśród profesjonalistów.

W badaniach przeprowadzonych w 2009 r. stwierdzono, że większą wagę w zakresie ochrony zasobów naturalnych, przykłada się do zmian technologicznych niż do zmiany nawyków konsumpcyjnych czy edukacji, np. poprzez popularyzację oszczędzania energii i surowców do jej produkcji, co nie napawa optymizmem [1]. Należy jednak podkreślić, że w Polsce ok. 85% emisji gazów cieplarnianych jest związanych z sektorem energii - głównie elektrowni węglowych [4].

Spośród źródeł energii, które powinna wykorzystywać gospodarka podkarpacka, za najważniejsze uznano węgiel i gaz ziemny, a następnie węgiel brunatny oraz ropę naftową, na co wskazują zebrane dane w tabeli 6.

Tabela 6. Alternatywne źródła energii, z jakich powinna korzystać gospodarka podkarpacka i ich ranga wg odsetek 987 wypowiedzi [%]

Table 6. Alternative energy sources and their importance to the Podkarpackie Voivodeship economy. The percentage of 987 expressions [%]

| Źródła energii | Znaczenie źródeł energii | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| **Węgiel kamienny** | 45,6 | 27,6 | 26,8 |
| **Gaz** | 45,5 | 39,6 | 14,9 |
| **Węgiel brunatny** | 32,9 | 37,6 | 29,5 |
| **Ropa** | 28,7 | 44,8 | 26,5 |
| **Łupki bitumiczne** | 27,2 | 27,0 | 45,8 |
| **Energia jądrowa** | 20,2 | 23,4 | 56,4 |

Źródło: opracowanie własne

Ranga pierwszych trzech rodzajów źródeł jest analogiczna, jak w przypadku ich znaczenia dla całego kraju, natomiast różnice zauważyć można na dalszych pozycjach tego uszeregowania. Energetyka jądrowa znalazła się na ostatnim miejscu w obu rozważanych przypadkach, ale nieco mniejszy odsetek respondentów wskazał ją jako ważną dla województwa podkarpackiego, co może być zrozumiałe z uwagi na przypisywane jej zagrożenia dla jakości środowiska oraz zdrowia i życia człowieka.

Opinie respondentów dotyczące możliwości wykorzystania energii odnawialnej w mieszkalnictwie przedstawiono w tabeli 7. Z uwagi na duży odsetek osób w Polsce zamieszkujących we własnych budynkach jedno- lub wielorodzinnych

Tabela 7. Alternatywne źródła energii, z jakich powinno korzystać mieszkalnictwo i ich ranga wg odsetek 982 wypowiedzi [%]

Table 7. Alternative energy sources, which should benefit from housing. Opinion of 982 respondents [%]

| Źródła energii | Znaczenie źródeł energii | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| **Kolektory słoneczne** | 66,3 | 27,5 | 6,2 |
| **Ogniwa fotowoltaiczne** | 51,5 | 38,2 | 10,3 |
| **Energia wiatru** | 25,7 | 61,1 | 13,2 |
| **Drewno** | 14,9 | 41,1 | 44,0 |
| **Biomasa** | 11,5 | 55,3 | 33,2 |
| **Energia wodna** | 11,1 | 69,3 | 19,6 |
| **Biogaz** | 10,4 | 53,0 | 36,6 |
| **Geotermia** | 8,6 | 54,4 | 37,0 |

Źródło: opracowanie własne

oraz w starym budownictwie, wskazane poprzednio uszeregowanie ze względu na znaczenie źródeł energii dla gospodarki znajduje tu analogiczny, a jednocześnie jeszcze bardziej jednoznaczny wyraz. Najczęściej więc, jako najbardziej znaczące źródła potencjału energetycznego dla mieszkalnictwa, wybierano kolektory słoneczne, a następnie ogniwa fotowoltaiczne i farmy wiatrowe.

Ostatnim celem badań na całej próbie, bez uwzględniania uwarunkowań opinii, były oceny respondentów dotyczące ewentualnej zamiany pieca węglowego na inne źródło ogrzewania oraz stopień akceptacji budowy elektrowni atomowej, których strukturę liczebności zaprezentowano w tabeli 8.

Tabela 8. Stopień skłonności do zmiany pieca węglowego na inne źródło ogrzewania oraz akceptacji budowy elektrowni atomowej w Polsce wg odsetek 1036 wypowiedzi [%]

Table 8. The degree of willingness to change coal furnace for other heating source and acceptance of the nuclear power plant energy in Poland. Opinion of 1,036 respondents [%]

| Rodzaje działań | Stopień akceptacji działań | | |
|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 |
| **Zamiana pieca węglowego na inne źródło ogrzewania** | 47,5 | 31,9 | 20,6 |
| **Akceptacja budowy elektrowni atomowej** | 22,4 | 30,6 | 47,0 |

Źródło: opracowanie własne

Najwyższy odsetek (47,5%) badanych osób, w stopniu najwyższym opowiedział się za wymianą pieca, a pozostałe osoby czyniły to w sposób tylko umiarkowany lub słaby. Z kolei poziom akceptacji budowy elektrowni atomowej był zbliżony do odsetek opinii wyrażonych przy określaniu znaczenia energii otrzymywanej z rozszczepiania atomów dla gospodarki kraju i województwa podkarpackiego. Ponad 22% respondentów w stopniu najwyższym aprobowało to działanie, natomiast 47% ich liczby uznało taką budowę za mało konieczną lub zupełnie zbędną.

Przedstawiona powyżej ocena uzyskanych, w oparciu o przeprowadzone obserwacje poglądów respondentów, nie uwzględniała opisujące ich charakterystyki.

## 4. Podsumowanie

Celem opracowania była analiza ocen respondentów w zakresie gospodarki energetycznej z uwzględnieniem jej oddziaływania na środowisko. Materiał badawczy uzyskano na podstawie 1036 ankiet wypełnionych przez osoby zamieszkujące w zdecydowanej większości teren województwa podkarpackiego. Niniejszą część opracowania poświęcono ocenie zaprezentowanych opinii bez uwzględniania charakterystyk prezentujących je osób. Respondenci uznali, że poziom wiedzy społeczeństwa w zakresie ochrony przyrody jest ciągle niski, natomiast wpływ człowieka na globalne ocieplenie – znaczny. Za najgroźniejsze gazy cieplarniane, z uwagi na skalę ich oddziaływania, uznano, w kolejności ich ważności: dwutlenek węgla, freony i halony, metan, tlenki siarki, tlenki azotu oraz parę wodną. Uszeregowanie trzech najważniejszych tradycyjnych źródeł energii dla kraju i województwa podkarpackiego było podobne, przy czym energetyce jądrowej dla podkarpackiej gospodarki przypisano mniejsze znaczenie, aniżeli dla Polski. Także jednakowe uporządkowanie z uwagi na znaczenie podano dla alternatywnych źródeł energii dla kraju oraz mieszkalnictwa. Odbiega ono jednak bardzo mocno od ich uszeregowania z uwagi na aktualne i planowane korzystanie z ich potencjału energetycznego. Ponadto skłonność do zamiany pieca węglowego na bardziej ekologiczne źródło energii wyraziła prawie połowa respondentów, a ok. 22% ich liczby akceptuje budowę siłowni atomowej.

Przedstawiona analiza dowodzi dużych rozbieżności między opiniami respondentów, a stanem rzeczywistym problematyki będącej przedmiotem badań. Wynika stąd potrzeba szerszego informowania społeczeństwa o stanie i kierunkach rozwoju gospodarki energetycznej w oparciu o rzetelne i aktualne argumenty.

Należy podkreślić, że rozważania o degradacji środowiska oraz zmianach klimatycznych i konsekwencjach globalnego ocieplenia grożącym żywym organizmom na Ziemi, są często źródłem kontrowersji i nie do końca potwierdzonych stwierdzeń. Niepewność ocen i duży margines ciągle niewyjaśnionych procesów fizycznych nie zwalnia ludzkości od odpowiedzialności za stan środowiska. Postawa proekologiczna i systematyczna dbałość o środowisko będzie wymuszać uwzględniający te wymogi rozwój nowych technologii i z pewnością wpłynie korzystnie na jakość naszego życia i zdrowia.

## Literatura

[1] Bołtromiuk A., Świadomość ekologiczna Polaków – zrównoważony rozwój – raport z ba-dań 2009, INSTYTUT NA RZECZ EKOROZWOJU, na podstawie: http://www.ine-isd.org.pl/ 2009.pdf (dostęp:16-06-2016).

[2] Główny Inspektorat Środowiska, Stan środowiska w Polsce, Raport 2014, Biblioteka Monitoringu Środowiska, Warszawa 2014, s. 162-170, na podstawie: http://www.gios.gov.pl/pl/stan-srodowiska/raporty-o-stanie-srodowiska (dostęp: 16-06-2016).

[3] Kiehl J.T., Kevin E. Trenberth, Earths annual global mean Energy budget, „Bulletin of the American Meteorological Society", 78, 2006, s. 197-208.

[4] Kucowski J., Laudyn D., Przekwas M., Energetyka a ochrona środowiska, Wyd. Nauko-Techniczne, Warszawa 1997, s. 21-39.

[5] Sawczuk P., Dom, który oszczędza, „Human", Nr 2(3), 2016, s. 50-53.

[6] Steczkowski J. Opis statystyczny, Pozyskiwanie i analizowanie informacji, Wyższa Szkoła Informatyki i Zarządzania, Rzeszów 2005, s. 61-75.

[7] Van Loon G.W., Duffy S.J., Chemia środowiska, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2008, s. 201-219.

[8] Żaba-Nieroda R., Rozwój energetyki w Polsce w świetle regulacji ekologicznych, „Nauka i Gospodarka", nr 3(6), 2010, s. 63-73.Czarnecki L., Broniewski T., Henning O.: Chemia w budownictwie, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1994.

## ENERGY MANAGEMENT AND ENVIRONMENTAL PROTECTION IN THE OPINION OF THE VARIOUS CATEGORIES OF RESPONDENTS. Part 1

**S u m m a r y**

The aim of the study was to evaluate the presented respondents' opinion on the broader economy, energy, taking into account its impact on the environment and the importance of various energy carriers. The analysis was based on 1,036 survey questionnaires, filled in the October - December 2015 period. This part of the study analyzed the formation of the ratings of respondents without taking into account the characteristics that describe them. It was found that the respondents level of public awareness of environmental protection, especially of nature is still low, and the human impact on global warming - significant. For the most dangerous greenhouse gases, given the scale of their impact, it was, in order of importance: carbon dioxide, chlorofluorocarbons and halons, methane, sulfur oxides, nitrogen oxides and water vapor. The use of the three most important traditional energy sources (coal, natural gas and lignite) for the country and the Podkarpackie Voivodeship considered the same, the nuclear power industry for voivodeship economy is less attractive than for the Poland as a whole. The tendency to convert the furnace coal to cleaner energy sources expressed almost half of the respondents, and only one-fifth of their number allowed to build nuclear plant. The analysis shows a wide disparity between the opinions of the respondents, and the state of the real issues of interest. Hence the need to inform the wider public about the status and development of the energy economy based on reliable and valid arguments.

**Keywords:** emissions of pollutants, climate pollutants, public consultation, nuclear power energy

DOI:10.7862/rb.2016.202

*Przesłano do redakcji: 25.08.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16),lipiec-wrzesień 2016, s. 211-218

**Karolina KURTZ-ORECKA**[1]

# WSPÓŁCZYNNIK REDUKCJI TEMPERATURY W OBLICZENIACH STRAT CIEPŁA DO PRZESTRZENI NIEOGRZEWANYCH PIWNIC

Sukcesywne podnoszenie wymagań oszczędności energii, a także zróżnicowanie warunków otoczenia budynku charakterystyczne dla lokalizacji, wymagają szczegółowego podejścia do obliczeń potrzeb cieplnych budynków nowoprojektowanych, jak i istniejących. Zastosowanie w obliczeniach bilansu zapotrzebowania na energię na potrzeby ogrzewania i wentylacji, stałej zryczałtowanej wartości współczynnika redukcji temperatury wydaje się być podejściem niewłaściwym, z uwagi na brak szczegółowych danych krajowych.
W artykule, na przykładzie wyników uzyskanych dla trzech obiektów, przedstawiono zmienność współczynnika redukcji temperatury stropów nad nieogrzewanymi piwnicami, w zależności od izolacyjności termicznej przegród zamykających przestrzeni ogrzewaną i nieogrzewaną oraz warunków środowiska zewnętrznego. Wykazano, że zastosowanie do obliczeń potrzeb cieplnych budynku stałej wartości współczynnika redukcji temperatury wiąże się z przeszacowaniem start ciepła z powierzchni stropu nad nieogrzewanymi piwnicami, co prowadzi do istotnego niedostosowania modelu obliczeniowego budynku w odniesieniu do jego rzeczywistego stanu. Przy projektowaniu budynków przeszacowanie zużycia energii często wiąże się z koniecznością wprowadzania kosztownych rozwiązań pozwalających na dotrzymanie wartości granicznych wskaźnika zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną, stąd poprawność przyjętego modelu obliczeniowego nabiera istotnej wagi. W przypadku budynków istniejących poddawanych procesowi termomodernizacji, szczegółowo wyznaczony współczynnik redukcji temperatury, a za tym straty ciepła, pozwalają na wskazanie oszczędności energii związanej z ociepleniem ścian nieogrzewanych piwnic. Dokładny opis modelu budynku jest również istotny przy rozliczaniu wsparcia finansowego udzielonego na poprawę efektywności energetycznej budynku i raportowaniu z osiągniętego efektu ekologicznego, ponieważ pozwala na dokładniejsze szacowanie redukcji emisji $CO_2$.

**Słowa kluczowe:** wymiana ciepła pomiędzy przestrzenią ogrzewaną i nieogrzewaną, ocieplenie stropów piwnic, termomodernizacja, raportowanie z osiągniętego efektu ekologicznego

[1] Karolina Kurtz-Orecka, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Katedra Fizyki Budowli i Materiałów Budowlanych, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin; tel. 608691975; kurtz@zut.edu.pl, karolinakurtz@gmail.com

## 1. Wprowadzenie

W obliczeniach charakterystyki energetycznej budynku – zapotrzebowania na energię na potrzeby ogrzewania i wentylacji [1], jedną ze składowych bilansu są straty ciepła przez przenikanie opisane zależnością (1). Obejmują one przenoszenie ciepła przez przegrody w bezpośrednim kontakcie z powietrzem zewnętrznym ($e$), do przestrzeni przyległej ($j$), w kontakcie z gruntem ($g$) oraz pomiędzy środowiskiem o regulowanej i nieregulowanej temperaturze ($u$). Z czterech składowych przenoszenia ciepła opisanych zależnością (2) tylko pierwsza związana jest wprost z różnicą temperatury wewnętrznej (w ujęciu normy PN-EN ISO 13790 [2] oraz metodyki [1]) oraz średniej miesięcznej temperatury zewnętrznej, ponieważ obejmuje przenikanie ciepła przez przegrody stanowiące bezpośrednią granicę termiczną pomiędzy warunkami wewnętrznymi i zewnętrznymi. Pozostałe składowe, $H_{tr,iue}$, $H_{tr,ij}$, $H_{tr,ig}$, dla których różnica temperatury pomiędzy środowiskami jest zazwyczaj mniejsza [3], podlegają zmniejszeniu poprzez uwzględnienie współczynnika redukcji temperatury.

$$Q_{tr,n} = H_{tr}\left(\theta_{\mathrm{int},H} - \theta_{e,n}\right) t_M \,, \tag{1}$$

$$H_{tr} = H_{tr,ie} + H_{tr,iue} + H_{tr,ij} + H_{tr,ig} \,, \tag{2}$$

gdzie: $H_{tr}$ – współczynnik przenoszenia ciepła przez przenikanie, [W/K] [7],
$Q_{tr,n}$ – ilość ciepła przenoszonego ze strefy ogrzewanej przez przenikanie w $n$-tym okresie obliczeniowym, [kWh/m-c],
$t_M$ – czas, [h],
$\theta$ – temperatura, [ºC],
indeksy opisano w tekście.

W przypadku obliczeń start ciepła do przestrzeni nieogrzewanej ($u$), współczynnik redukcji temperatury uwzględnia różnicę pomiędzy temperaturą przestrzeni nieogrzewanej oraz temperaturą zewnętrzną [4]. Może być wyznaczony jedną z trzech metod:

- z zależności (3) w przypadku, gdy znana jest temperatura przestrzeni nieogrzewanej $\theta_u$,
- przy wykorzystaniu współczynników start ciepła przez przenikanie i wentylację z przestrzeni ogrzewaj do nieogrzewanej $H_{iu}$ oraz z przestrzeni nieogrzewanej do otoczenia $H_{ue}$ zgodnie ze wzorem (4),
- poprzez przyjęcie zryczałtowanej wielkości określonej w normie PN-EN 12831 [4].

$$b_u = \frac{\theta_{\mathrm{int},i} - \theta_u}{\theta_{\mathrm{int},i} - \theta_e} \tag{3}$$

$$b_u = \frac{H_{ue}}{H_{iu} + H_{ue}}, \tag{4}$$

gdzie oznaczenia jak w zależnościach (1) i (2) oraz w tekście. We wzorze (3) temperatura przestrzeni nieogrzewanej określona jest zależnością [7]:

$$\theta_u = \frac{\phi + \theta_i H_{iu} + \theta_e H_{ue}}{H_{iu} + H_{ue}}, \tag{5}$$

gdzie: $\Phi$ – strumień cieplny [W], wytwarzany w przestrzeni nieogrzewanej, pozostałe symbole zgodnie z objaśnieniami do zależności (1) i (2).

W przypadku przenoszenia ciepła z ogrzewanej części budynku do przestrzeni nieogrzewanych piwnic, zryczałtowana wartość współczynnika redukcji temperatury zgodnie z normą PN-EN 12831 [4] przyjmuje wartość stałą, wynoszącą 0,8. Z uwagi na brak danych krajowych [5], w normie [4] przyjęto wielkości orientacyjne zaproponowane w normie europejskiej EN 12831. Należy zwrócić uwagę, że stała, dla danej przestrzeni wartość współczynnika redukcji temperatury nie pozwala na uwzględnienie wpływu na wielkość strat ciepła izolacyjności termicznej obudowy przestrzeni nieogrzewanej. W praktyce inżynierskiej utrudnia to m.in. uargumentowanie objęcia działaniami termomodernizacyjnymi powierzchni ograniczających przestrzenie nieogrzewane, z uwagi na brak możliwości wskazania oszczędności energii. W związku z tym w audycie energetycznym często podjęta zostaje decyzja o ociepleniu ścian zewnętrznych jedynie do płaszczyzny stropu nad piwnicą, co może skutkować wystąpieniem krytycznej temperatury na powierzchni wewnętrznej węzła połączenia ściany zewnętrznej ze stropem. Stąd zastosowanie w obliczeniach zapotrzebowania na energię w budynku stałej wartości współczynnika redukcji temperatury wydaje się być podejściem niewłaściwym, szczególnie we wskazanej sytuacji braku danych krajowych [5]. Systematycznie zaostrzane wymagania oszczędności energii [6], pociągają za sobą konieczność szczegółowego podejścia do obliczeń potrzeb cieplnych budynków nowoprojektowanych, jak i istniejących.

Zmienność współczynnika redukcji temperatury, w zależności od izolacyjności termicznej przegród zamykających przestrzeń ogrzewaną i nieogrzewaną oraz warunków panujących w otoczeniu budynku, zostanie przedstawiona na przykładzie trzech istniejących obiektów mieszkalnych wielorodzinnych.

## 2. Charakterystyka budynków

Przyjęte do analizy budynki zlokalizowane są na terenie Szczecina. Wszystkie obiekty wzniesiono w technologii prefabrykowanej, w systemie Szczecińskim, w okresie od 1971 do 1989 roku. Budynki zróżnicowane są w zakresie geometrii rzutu przyziemia, skali, kubatury oraz liczby lokali mieszk-

kalnych. Podstawową ich charakterystykę zestawiono w tabeli 1 i 2. Budynki 1 i 2 na początku lat 90. XX w. zostały ocieplone w płaszczyźnie ścian zewnętrznych styropianem fasadowym o grubości 5 cm. W przypadku budynku nr 1 izolacja termiczna została wykonana do poziomu dolnej płaszczyzny stropu piwnic, zaś w przypadku budynku nr 2 – izolację sprowadzono na 40 cm poniżej płaszczyzny dolnej stropu. Budynek nr 3 nie jest dodatkowo izolowany termicznie poza warstwą wełny mineralnej prefabrykowanej płyty warstwowej kondygnacji nadziemnych.

Tabela 1. Charakterystyka analizowanych budynków

Table 1. Characteristics of analyzed buildings

| Opis | Jedn. | Budynek 1 | Budynek 2 | Budynek 3 |
|---|---|---|---|---|
| Rok budowy | - | 1971 | 1975 | 1989 |
| Liczba lokali mieszkalnych | szt. | 20 | 75 | 205 |
| Temperatura w pomieszczeniach ogrzewanych | ºC | 16, 20, 24 | 16, 20, 24 | 16, 20, 24 |
| Powierzchnia użytkowa o regulowanej temperaturze, $A_f$ | $m^2$ | 981 | 3393 | 10093 |
| Kubatura ogrzewana | $m^3$ | 2451 | 8789 | 19257 |
| Liczba kondygnacji, bez piwnic | - | 5 | 5 | 10 i 11 |
| Kształt rzuty przyziemia | - | Kwadrat | Prostokąt | Litera L |
| Wymiary rzutu budynku | m | 16,82×14,34 | 86,95×9,97 | 31,6×14,26 / 33,8×17,2 |
| Powierzchnia stropu piwnic do obliczeń strat ciepła, $A_{str_PIW}$ | $m^2$ | 241 | 795 | 1073 |
| Powierzchnia obudowy przestrzeni nieogrzewanej piwnic w kontakcie z otoczeniem, $A_{ue}$ | $m^2$ | 112 | 266 | 157 |

Tabela 2. Charakterystyka izolacyjności termicznej oraz wentylacyjna przestrzeni nieogrzewanej analizowanych budynków

Table 2. Thermal insulation and ventilation characteristics of unconditioned space of analyzed buildings

| Opis | Budynek 1 | Budynek 2 | Budynek 3 |
|---|---|---|---|
| Współczynnik przenikania ciepła, [W/($m^2$K)] | | | |
| Strop nad piwnicami | 1,12 - 1,39 | 1,05 | 1,05 |
| Ściany piwnic w kontakcie z powietrzem zewnętrznym, nieizolowane termicznie | 1,43 | 4,26 | 4,17 |
| Ściany piwnic w kontakcie z powietrzem zewnętrznym, izolowane termicznie | - | 0,55 | - |
| Okna w ścianach piwnic | 2,3 | 2,3 | 2,3 |
| Bramy garażowe | 2,6 | - | 5,0 |
| Współczynnik start ciepła przez wentylację, [W/K] | | | |
| Przestrzeń nieogrzewanych piwnic | 35,42 | 169,65 | 232,21 |

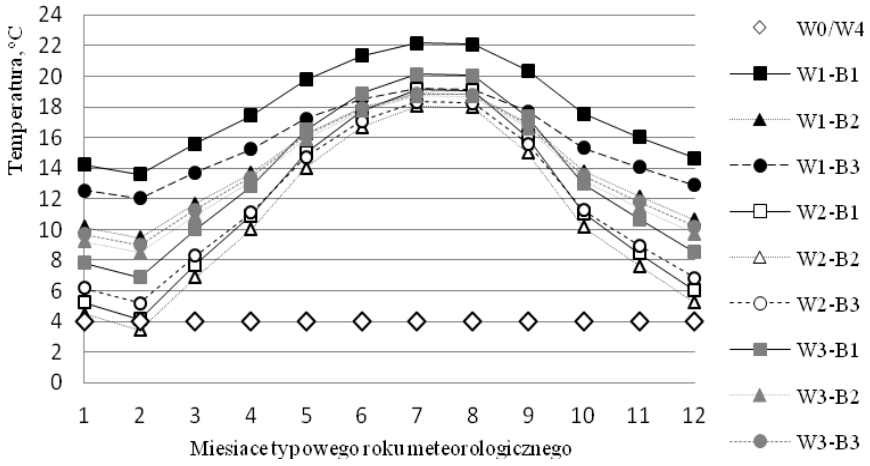
## 3. Współczynnik redukcji temperatury dla analizowanych stropów nieogrzewanych piwnic

Zmienność współczynnika redukcji temperatury, temperatury przestrzeni nieogrzewanej oraz strat ciepła z powierzchni stropu nad piwnicą w zależności od izolacyjności termicznej stropu piwnic oraz ścian zewnętrznych piwnic przeanalizowano w wariantach:

- warianty 0 i 4 (W0, W4) – współczynnik redukcji temperatury oraz temperaturę w przestrzeni piwnic przyjęto jako wartości stałe odczytane z norm [4],[8] – stan przed (W0) i po termomodernizacji obejmującej powierzchnię stropu piwnic oraz ściany zewnętrzne piwnic (W4),
- warianty pośrednie 1, 2 i 3 (W1, W2, W3), w których współczynnik redukcji temperatury oraz temperaturę w przestrzeni nieogrzewanych piwnic wyznaczono w funkcji izolacyjności termicznej przegród z zależności (3) i (5); wariant 1 – przed termomodernizacją, 2 – z ociepleniem tylko stropu piwnic, 3 – z ociepleniem stropu oraz ścian zewnętrznych piwnic.

W przypadku przyjęcia stałej wartości współczynnika redukcji temperatury $b_u$, temperaturę nieogrzewanych piwnic można ustalić na podstawie normy PN-82/B-02403 [8]. W odniesieniu do analizowanych budynków wynosi ona 4ºC. Uzyskaną z zależności (3) i (5) zmienność temperatury przestrzeni nieogrzewanych piwnic oraz współczynnika redukcji temperatury w układzie miesięcznym typowego roku meteorologicznego stacji Szczecin-Dąbie, zestawiono na rysunkach 1 i 2.

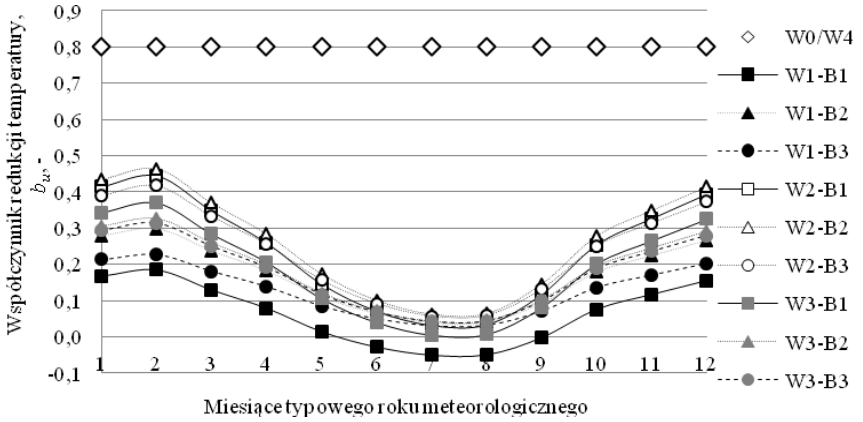
Straty ciepła z powierzchni stropu piwnic odniesione do 1m$^2$ jego powierzchni przedstawiono na rysunku 3. W prezentacji wyników przyjęto ozna-




Rys. 1. Przebieg roczny temperatury przestrzeni nieogrzewanych piwnic

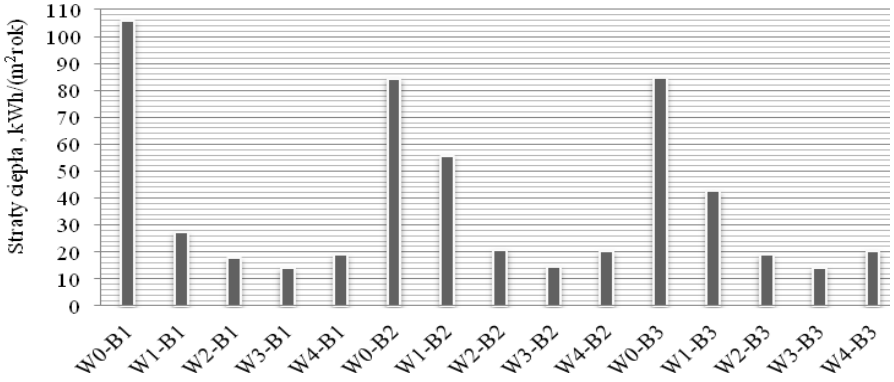
Fig. 1. The annual temperature variation of unconditioned basement space

czenia: B1 – budynek nr 1, B2 – budynek nr 2, B3 – budynek nr 3. W wariantach W0 i W4 temperatura piwnic oraz współczynnik redukcji temperatury są wartościami stałymi.




Rys. 2. Zmienność współczynnika redukcji temperatury dla analizowanych przypadków

Fig. 2. The variation of temperature adjustment factor of analyzed cases




Rys. 3. Starty ciepła z powierzchni stropu nad nieogrzewanymi piwnicami

Fig. 3. Heat losses through the surface of the ceiling above unconditioned basements

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że zarówno temperatura w przestrzeni nieogrzewanych piwnic, jak i współczynnik redukcji temperatury podlegają zmienności w typowym roku meteorologicznym w zależności od izolacyjności termicznej ich obudowy oraz warunków panujących w przestrzeni ogrzewanej i otoczeniu. Temperatura przestrzeni nieogrzewanej i współ-

czynnik redukcji temperatury są istotnie różne od przybliżonych wartości normowych. Ponadto wprowadzenie izolacji termicznej ścian zewnętrznych piwnic przyczynia się do wzrostu szacowanej temperatury w przestrzeni nieogrzewanej, powodując tym samym zmniejszenie start ciepła przez przenikanie przez powierzchnię stropu nad piwnicami.

## 4. Wnioski

Wykorzystanie w obliczeniach zapotrzebowania budynku na energię na potrzeby ogrzewania stałej wartości współczynnika redukcji temperatury $b_u$, wiąże się ze znaczącym przeszacowaniem start ciepła z powierzchni stropu nad nieogrzewanymi piwnicami, co prowadzi do istotnego niedostosowania modelu obliczeniowego budynku w odniesieniu do jego rzeczywistego stanu.

Przy projektowaniu budynków przeszacowanie zużycia energii wiąże się z często koniecznością wprowadzania kosztownych rozwiązań pozwalających na dotrzymanie wartości granicznych wskaźnika zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną *EP*, stąd jakość modelu obliczeniowego przekłada się na wymiar ekonomiczny inwestycji.

W przypadku budynków istniejących poddawanych procesowi termomodernizacji, szczegółowo wyznaczony współczynnik redukcji temperatury, a w konsekwencji oszacowane straty ciepła, pozwalają na wykazanie oszczędności energii związanej z ociepleniem ścian nieogrzewanych piwnic. Uszczegółowienie obliczeń umożliwia również dokładniejsze, niż w przypadku zastosowania stałych współczynników redukcji temperatury, szacowanie zapotrzebowania na energię w budynku w stanie przed i po planowanej termomodernizacji, warunkując często dotrzymanie wymagań programów wsparcia finansowego poprawy efektywności energetycznej. Dokładny opis modelu budynku jest również istotny przy rozliczaniu wsparcia finansowego udzielonego na poprawę efektywności energetycznej budynku i raportowaniu z osiągniętego efektu ekologicznego, ponieważ pozwala na dokładniejsze szacowanie redukcji emisji $CO_2$.

## Literatura

[1] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dn. 27.02.2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej, Dz.U. (2015) poz. 376.

[2] Polska Norma PN-EN ISO 13790:2009 Energetyczne właściwości użytkowe budynków – Obliczenia zużycia energii do ogrzewania i chłodzenia. PKN, Warszawa 2009.

[3] Strzeszewski M. Współczynnik redukcji temperatury w metodyce obliczania obciążenia cieplnego wg PN-EN 12831. http://www.is.pw.edu.pl/~michal_strzeszewski/ioiw/12831WRT.pdf (dostęp 20.05.2016).

[4] Polska Norma PN-EN 12831:2006 Instalacje ogrzewcze budynkach – Metoda obliczania projektowanego obciążenia cieplnego. PKN, Warszawa 2006.

[5] Kasperkiewicz K. Nowe zasady obliczania projektowanego obciążenia cieplnego pomieszczeń i budynków wg PN-EN 12831:2006 „Instalacje ogrzewcze w budynkach – Metoda obliczania projektowego obciążenia cieplnego". http://www.itb.pl/nf/PDF/KK05.pdf (dostęp 20.05.2016).

[6] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dn. 12.04.2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. 75, poz 690 z późn. zm.

[7] Polska Norma PN-EN ISO 13789: 2008 Cieplne właściwości użytkowe budynków – Współczynniki przenoszenia ciepła przez przenikanie i wentylację – Metoda obliczania. PKN, Warszawa 2008.

[8] Polska Norma PN-82/B-02403 Ogrzewnictwo – Temperatury obliczeniowe zewnętrzne. PKNMiJ, Warszawa 1982.

## TEMPERATURE ADJUSTMENT FACTOR USED IN CALCULATIONS OF ENERGY LOSSES TO UNCONDITIONED CELLAR SPACE

**S u m m a r y**

Gradual increase of energy saving requirements, as well as the diversity of environmental conditions specific to the location of a building, require specific approach towards the calculation of thermal needs of newly designed and existing buildings. The use of the heating energy demand balance of and fixed rate of temperature adjustment factor in the calculations seems to be a wrong approach, because of the lack of detailed national data.

In the article, on the example of the results obtained from three objects, the adjustment factor of the ceilings above the unconditioned basements, depending on the thermal insulation of envelope partitions as well as the conditions of the external environment have been presented. It has been shown that the use of the constant value of the adjustment factor for the calculation of the heat demand of the building is associated with the overestimation of heat losses from the surface of the ceiling above the basement floor, which leads to a significant inadequacy of calculation model of the building in relation to its actual condition. When designing buildings the overestimation of energy often requires introduction of expensive solutions to meet the limit values of the indicator of demand for non-renewable primary energy, hence the correctness of the adopted calculation model is gaining substantial importance. In case of existing buildings undergoing a general thermal retrofit, a temperature adjustment factor designed in a detailed manner, and so the heat losses, allows to identify energy savings associated with the insulation of walls of unconditioned basements. The exact description of the building model is also important when accounting financial support for improvement of the energy efficiency of the building as well as reporting the achieved environmental effect, because it allows for more accurate estimation of $CO_2$ emission reduction.

**Keywords:** heat flow between conditioned and unconditioned space, thermal retrofit of basement ceilings, thermal retrofit, reporting of achieved environmental effect

DOI:10.7862/rb.2016.203

*Przesłano do redakcji: 13.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 219-226

**Dominika KUŚNIERZ-KRUPA**[1]
**Michał KRUPA**[2]

# UWAGI DO REWALORYZACJI TERENU WOKÓŁ ZABYTKOWEGO KOŚCIOŁA PW. ŚW. MARCINA W GRYWAŁDZIE

Niniejszy artykuł podejmuje problem rewaloryzacji terenu wokół zabytkowego kościoła pw. św. Marcina w Grywałdzie. Opisano w nim historię świątyni wraz z udokumentowanymi pracami rewaloryzacyjnymi obiektu oraz jego otoczenia, stan istniejący zespołu oraz wytyczne konserwatorskie do procesu rewaloryzacji zagospodarowania terenu wokół kościoła.
Kościół pw. św. Marcina został wzniesiony w wieku XV i jest jednym z najcenniejszych przykładów sakralnego budownictwa drewnianego w Polsce. Sam obiekt w związku z licznymi pracami renowacyjnymi jakie były tutaj prowadzone w wieku XX oraz na początku XXI jest w dobrym stanie technicznym. Natomiast jego otoczenie, na które składa się: kamienny mur ogrodzeniowy, dwie pary filarów tworzących symboliczne bramy w murze ogrodzeniowym, schody terenowe oraz kamienne dojścia do świątyni, jest w złym stanie technicznym i wymagają pilnej interwencji konserwatorskiej. Interwencja ta winna być poprzedzona opracowaniem wytycznych konserwatorskich w postaci programu prac konserwatorskich przy zabytku, a także projektu budowlano-wykonawczego planowanych prac. Proces rewaloryzacji przedmiotowego terenu winien być prowadzony w uzgodnieniu z Wojewódzkim Konserwatorem Zabytków, gdyż kościół wraz z otoczeniem jest wpisany do Rejestru Zabytków Nieruchomych Województwa Małopolskiego.

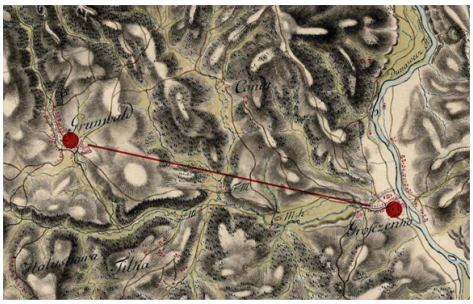
**Słowa kluczowe:** zagospodarowanie wokół kościoła, rewaloryzacja, zespół zabytkowy, konserwacja kamienia

## 1. Wprowadzenie

Kościół pw. św. Marcina jest jednym z najstarszych drewnianych kościołów w Małopolsce. Położony jest na wzniesieniu, w niewielkiej podhalańskiej miejscowości Grywałd (ryc. 1-3), nieopodal Krościenka and Dunajcem. Historia powstania samego Grywałdu sięga 1 połowy XIV wieku, kiedy to w dokumentach źródłowych po raz pierwszy wymieniono nazwę Grünewald, czyli Zielony Las [1].

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Dominika Kuśnierz-Krupa, Politechnika Krakowska, Instytut Historii Architektury i Konserwacji Zabytków, ul. Kanonicza 1, 31-002 Kraków; tel. 12 6282419; dkk@zeriba.pl

[2] Michał Krupa, Politechnika Rzeszowska, Zakład Urbanistyki i Architektury, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów; tel. 17 8651691; mkrupa@prz.edu.pl



Ryc. 1. Grywałd na XVIII-wiecznej Mapie Miega. Czerwoną linią zaznaczono jego lokalizację względem Krościenka nad Dunajcem. Kopia mapy w Archiwum KHAUiSzP WA PK, s.v.

Fig. 1. Grywałd on Mieg's map from the 18th century. Red line marked its location in relation to Krościenko on the Dunajec. Copy of the map in the Archive KHAUiSzP WA PK, s.v.




Ryc. 2. Grywałd na XVIII-wiecznej Mapie Miega. Zielonym kołem zaznaczono lokalizację kościoła pw. św. Marcina. Kopia mapy w Archiwum KHAUiSzP WA PK, s.v.

Fig. 2. Grywałd on Mieg's map from the 18th century. Green circle marked location of the church of St. Martin. Copy of the map in the Archive KHAUiSzP WA PK, s.v.



Ryc. 3. Kościół pw. św. Marcina w Grywałdzie na ortofotomapie. Stan istniejący

Fig. 3. The St. Martin church in Grywałd in the orthophotomap. Present state



Ryc. 4. Kościół pw. św. Marcina w Grywałdzie w widoku od północy. Stan istniejący. Fot. D. Kuśnierz-Krupa, 03.2016 r.

Fig. 4. The St. Martin church in Grywałd, view from the north. Present state. Photo by D. Kuśnierz-Krupa, 03.2016

Kościół z kolei datowany jest na wiek XV, co czyni go jednym z najcenniejszych tego typu zabytków w Polsce. Sama świątynia w wieku XX i na początku XXI (ryc. 4-8) przeszła kilka remontów konserwatorskich w związku z czym jest w dobrym stanie technicznym. W znacznie gorszej kondycji jest otoczenie kościoła, na które składają się: mur ogrodzeniowy z dzikiego kamienia; schody terenowe prowadzące na wzniesienie kościelne od południa (również wykonane z dzikiego kamienia); dwie pary filarów tworzące symboliczne bramy (od północy i zachodu) w murze ogrodzeniowym; schody terenowe prowadzące do kościoła od północy oraz dojścia do świątyni (od północy i zachodu). W związku z powyższym postuluje się przeprowadzenie na terenie wokół ko-

ścioła (który także podlega ochronie) pilnych prac konserwatorskich, polegających przede wszystkim na zahamowaniu degradacji wyżej wymienionych kamiennych elementów.



Ryc. 5. Kościół pw. św. Marcina w Grywałdzie. Widok od południa na fragment muru ogrodzeniowego oraz schodów terenowych. Fot. D. Kuśnierz-Krupa, 03.2016

Fig. 5. The St. Martin church in Grywałd. View from the south onto fragment of the surrounding wall and outside stone steps. Photo by D. Kuśnierz-Krupa, 03.2016



Ryc. 6. Kościół pw. św. Marcina w Grywałdzie. Widok na filary z dzikiego kamienia tworzące symboliczną bramy (od strony północnej) w murze ogrodzeniowym. Fot. D. Kuśnierz-Krupa, 03.2016

Fig. 6. The St. Martin church in Grywałd. View onto columns from rough stone creating symbolic gates (from the north) in the surrounding wall. Photo by D. Kuśnierz-Krupa, 03.2016



Ryc. 7. Kościół pw. św. Marcina w Grywałdzie. Widok od północnego-wschodu na fragment muru ogrodzeniowego oraz filary. Fot. D. Kuśnierz-Krupa, 03.2016

Fig. 7. The St. Martin church in Grywałd. View from the north-east onto a fragment of the surrounding wall and columns. Photo by D. Kuśnierz-Krupa, 03.2016



Ryc. 8. Kościół pw. św. Marcina w Grywałdzie. Widok od wschodu na schody terenowe poprowadzone od bramy północnej. Fot. D. Kuśnierz-Krupa, 03.2016

Fig.8. The St. Martin church in Grywałd. View from the east onto outside stone steps running from the north gate. Photo by D. Kuśnierz-Krupa, 03.2016

## 2. Rys historyczny obiektu oraz opis prac rewaloryzacyjnych prowadzonych przy obiekcie w przeszłości

Pierwsza parafia w Grywałdzie powstała przed 1330 rokiem, co potwierdza zapis w akcie lokacyjnym wsi Kamienica, w którym wymieniono Filipa, plebana z Grywałdu. Jak pisze, M. Kornecki okręg parafialny był pierwotnie niewielki i obejmował samą wieś [2].

Przedmiotowy kościół jest obiektem drewnianym wzniesionym w 2 połowie XV wieku. Kościół początkowo uważany był przez badaczy (K. i T. Mokłowskich) za cerkiew unicką. Także jego datowanie podlegało wielu weryfikacjom. T. Spiss datował go na równi z kościołem z Dębna na wiek XIII [3], a F. Kopera na 2 połowę XVIII wieku [4]. Dopiero po wielu analizach obiektu oraz po skonfrontowaniu jego kształtu z innymi kościołami z terenu Podhala ustalono okres jego powstania na 2 połowę XV wieku [5].

Badania architektoniczne kościoła pod kątem zachowania jego pierwotnej struktury przeprowadzono w połowie XX wieku. Wykazały one, że jedynie zrąb ścian nawy i prezbiterium oraz wschodnia ściana zakrystii są jednorodne, a pozostałe elementy pochodzą z okresu późniejszego. R. Brykowski, jeden z największych badaczy zabytkowej architektury drewnianej, a szczególnie obiektów sakralnych, twierdzi, że elementy te powstały w 1 połowie wieku XVII, kiedy to kościół został gruntownie przebudowany [6]. Przebudowa ta musiała nastąpić zapewne przed 1618 rokiem, kiedy to miała miejsce realizacja kościelnej polichromii [7]. Podczas ówczesnych prac budowlanych przy obiekcie zmieniono więźbę dachową, stropy, a także, jak pisze Brykowski, obniżono zrąb ścian i zlikwidowano zaskrzynienia [8].

Kościół pw. św. Marcina reprezentuje starszy typ kościołów drewnianych w Małopolsce. Głównym akcentem budowli jest wieża, szeroko posadowiona, o ścianach silnie zwężających się ku górze, z wydatnie nadwieszoną izbicą. Malowniczość kościoła podkreślają oszalowane soboty [9]. Kościół posiada tradycyjny rzut, w którym zarówno nawa jak i prezbiterium oparte są na planie kwadratu. W prezbiterium i w nawie zachowała się polichromia z 1618 r. Do wyposażenia świątyni należą trzy ołtarze. W ołtarzu głównym umieszczono interesujący tryptyk późnogotycki z pocz. XVI wieku [10].

Prócz opisanych wyżej prac remontowych prowadzonych w 1 połowie XVII wieku, kolejne odnotowane w źródłach przeprowadzono dopiero w 1845 roku, kiedy powiększono zakrystię i wzniesiono kruchtę od strony południowej.

Na początku wieku XX kościół był zaniedbany, w związku z czym zaplanowano jego remont oraz rozbudowę. W roku 1930 opracowano w tym celu projekt architektoniczny (proj. arch. Zygmunt Gawlik), który oprócz remontu zakładał również dobudowę dwóch bocznych kaplic. Ostatecznie jednak nie został on zrealizowany. Remont świątyni rozpoczęto dopiero siedem lat później i objął on naprawę fundamentów, fragmentaryczną wymianę podwaliny i części bier-

wion ścian. Podczas przedmiotowych prac wzmocniono także konstrukcję sobót oraz wieży, która była wówczas w złym stanie technicznym. Kościół otrzymał także nowe pokrycie dachowe w postaci tradycyjnego gontu. Remont ten prowadzono stopniowo i trwał on także podczas II wojny światowej, kiedy to uporządkowano wzgórze, na którym zlokalizowana jest świątynia. Wykonano wówczas odwodnienie, a także poprawiono i uzupełniono ogrodzenie z dzikiego kamienia [11]. Kolejny remont kościoła został przeprowadzony w latach 60-tych XX wieku [12], zaś następny, obejmujący rozległe prace konserwatorskie we wnętrzu obiektu, w latach 2008-2010.

## 3. Kościół pw. św. Marcina obecnie

Kościół pw. św. Marcina w Grywałdzie w wieku XX oraz na początku XXI wieku przechodził kilka remontów konserwatorskich, z których większość została wymieniona wyżej. W związku z czym wydaje się on być w dobrym stanie technicznym. Natomiast elementy małej architektury, wykonane z dzikiego kamienia, takie jak schody terenowe prowadzące od południa na wzniesienie, na którym położony jest obiekt; dwie symboliczne bramy w murze ogrodzeniowym (w postaci filarów z dzikiego kamienia) oraz ciągi piesze prowadzące od bram do kościoła, są w złym stanie technicznym. Można zaryzykować stwierdzenie, że ostatni kompleksowy remont konserwatorski tych elementów zagospodarowania terenu wokół świątyni miał miejsce w połowie XX wieku, o czym wspomina w swoim opracowaniu M. Kornecki [13].

Prawdopodobnie w ciągu następnych 60 lat prowadzono jedynie drobne prace naprawcze polegające m.in. na założeniu metalowej balustrady przy schodach terenowych, na uzupełnieniu zaprawy oraz brakujących elementów schodów terenowych, muru kościelnego, bram oraz traktów pieszych. Część z tych prac, prowadzonych jeszcze w wieku XX, zapewne z powodu braku środków finansowych, była wykonywana nieprofesjonalnie, metodą gospodarczą. Toteż ich efekt był krótkotrwały, a stan techniczny przedmiotowych elementów zagospodarowania terenu wokół kościoła stale się pogarszał.

W związku z powyższym postuluje się przeprowadzenie pilnych prac rewaloryzacyjnych przy wymienionych elementach zagospodarowania terenu wokół świątyni, zgodnie ze sztuką konserwatorską oraz zasadami wiedzy technicznej.

## 4. Program prac konserwatorskich przy elementach zagospodarowania terenu wokół kościoła pw. św. Marcina w Grywałdzie

Program prac konserwatorskich otoczenia kościoła dotyczy rewaloryzacji wymienionych już wcześniej elementów zagospodarowania terenu takich jak: mur ogrodzeniowy; schody terenowe prowadzące na wzniesienie kościelne od

południa; dwie pary filarów tworzące w murze ogrodzeniowym dwie symboliczne bramy (od północy i zachodu); schody terenowe prowadzące do kościoła od północy oraz dojścia do świątyni (od północy i zachodu). Wszystkie te elementy wykonane zostały z dzikiego lokalnego kamienia (z granitu oraz piaskowca). W związku z tym procedura ich rewaloryzacji jest bardzo podobna. Przy ich konserwacji należy wykorzystać produkty dedykowane do renowacji naturalnego konserwacji.

Pierwszym krokiem w procesie konserwacji przedmiotowych elementów winno być usunięcie z ich powierzchni (poprzez skucie) pozostałości starych zapraw, będących skutkiem doraźnych remontów. Następnie elementy te należy wyczyścić na sucho, np. metodą strumieniowo-ścierną z wykorzystaniem urządzenia o stycznym kącie uderzenia ścierniwa do czyszczonej powierzchni, co redukuje ryzyko powstania uszkodzeń kamienia. Kolejnym krokiem w przedmiotowym procesie jest usunięcie (przy pomocy właściwego środka) z rewaloryzowanych obiektów soli, grzybów, pleśni, glonów i innych zabrudzeń, których nie usunięto podczas czyszczenia metodą strumieniowo-ścierną. Te kamienie, które są w szczególnie złym stanie należy wzmocnić. Zabieg wzmocnienia można podzielić na dwa etapy: wzmocnienie wstępne (przed czyszczeniem) i wzmocnienie zasadnicze. Do wzmocnienia należy użyć preparatu na bazie czystego (pozbawionego rozpuszczalników organicznych) krzemianu etylu z dodatkiem katalizatora, który zapewni doskonałą penetrację na dużą głębokość. Takie elementy jak schody terenowe czy dojścia do kościała wykonane z kamienia winny być przełożone i uzupełnione identycznym do oryginalnego materiałem (dziki kamień lokalny). Należy przy tym dążyć do otrzymania możliwie płaskiej powierzchni, wygodnej dla użytkowników. Z kolei w przypadku prac konserwacyjnych przy kamiennych filarach należy uzupełnić spoinowanie kamienia. Można tutaj zastosować zaprawę, która jest zarabianą emulsją żywicy epoksydowej w wodzie, dzięki czemu otrzymuje się elastyczny materiał, a spoiny nie wykruszają się przy naprężeniach [14].

Reasumując należy dodać, że z uwagi na prawdopodobne podciąganie kapilarne wilgoci nie jest wskazana impregnacja przedmiotowego kamienia. Zwężenie kapilar poprzez impregnację zmniejsza dyfuzję pary wodnej, co może w przyszłości doprowadzić do jego uszkodzeń.

## 5. Podsumowanie

W podsumowaniu niniejszego artykułu należy zwrócić uwagę na istotę problemu jakim jest zły stan techniczny elementów zagospodarowania wokół kościoła pw. św. Marcina w Grywałdzie, który jest jednym z najcenniejszych zabytków sakralnych Małopolski. Elementy tworzące otoczenie świątyni kreują krajobraz kulturowy wzgórza kościelnego. Są one, tak samo jak kościół, wpisane do Rejestru Zabytków Nieruchomych Województwa Małopolskiego, zatem winny podlegać ochronie. W związku z powyższym należy przeprowadzić tutaj

pilne prace konserwatorskie, zgodnie ze wskazaniami ujętymi w programu prac konserwatorskich, a także w uzgodnieniu z właściwym Urzędem Ochrony Zabytków.

## Literatura

[1] *Słownik geograficzny Królestwa Polskiego i innych krajów słowiańskich*, F. Sulimierski, B. Chlebowski, W. Walewski (red.), Wyd. Zakładem F. Sulimierskiego i W. Walewskiego, Warszawa 1880, T. XV cz. 1, s.v.

[2] Kornecki M., *Gotyckie kościoły drewniane na Podhalu*, Wyd. Literackie, Kraków 1987, s. 96.

[3] Spiss T., *Wykaz drewnianych kościołów i cerkwi w Galicji*, Lwów 1912, s. 49.

[4] Kopera F., *Kościoły drewniane w Galicji Zachodniej*, seria I, Kraków 1915, z. 2-3, ss. 101-105.

[5] Szydłowski T., *Zabytki sztuki w Polsce. Inwentarz topograficzny*, cz. III, woj. Krakowskie, T. 1, z. 1, Powiat nowotarski, Warszawa 1938, ss. 59-62.

[6] Brykowski R., *Drewniana architektura kościelna w Małopolsce w XV wieku*, Wyd. PAN, Wrocław, Warszawa, Kraków, Gdańsk, Łódź 1981, s. 214.

[7] Brykowski R., Kornecki M., *Drewniane kościoły w Małopolsce Południowej*, Wyd. Ossolineum, Wrocław-Warszawa-Kraków-Gdańsk-Łódź 1984, s.72.

[8] Brykowski R., op. cit, s. 214.

[9] Szydłowski T., op. cit, s. 8.

[10] M. Kornecki, op. cit., ss. 96-97.

[11] Ibidem.

[12] R. Brykowski, M. Kornecki, op. cit., s. 72.

[13] M. Kornecki, op. cit., s. 97.

[14] Katalog produktów firmy Remmers Polska.

## REMARKS ON REVALORISATION OF THE AREA AROUND HISTORIC CHURCH OF ST. MARTIN IN GRYWAŁD

**S u m m a r y**

The paper addresses the issues of revalorisation of the area around the historic St. Martin's in Grywałd. The history of the church with documented revalorization work in the object and its surroundings, the existing state of the complex and conservation guidelines for the revalorization process of the church premises were described here.

St. Martin's church was erected in the 15th century and is one of the most valuable examples of wooden church buildings in Poland. In connection with intensive revalorisation work carried out during the 20th century and the first part of the 21th century, the object itself is in good state of preservation. However, its surroundings which include: the surrounding stone wall, two pairs of columns creating symbolic gates in the surrounding wall, outside stone steps and stone-paved path to the church, are in the poor condition and require urgent conservation intervention. This intervention should be preceded by preparing conservation guidelines in the form of the Program of Conservation Work on the object, as well as a building project of future work. The revalorisation process of the discussed area should be carried out in agreement with

the Voivodeship Monument Conservator because the church and its premises are entered into the Lesser Poland Heritage Register.

**Keywords:** development of church premises, revalorisation, historic complex, stone conservation

DOI:10.7862/rb.2016.204

*Przesłano do redakcji: 06.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 227-238

**Przemysław LEŃ**[1]
**Ewa GŁOWIENKA**[2]

# ZASTOSOWANIE METOD GIS W ANALIZIE STRUKTURY PRZESTRZENNEJ OBSZARÓW WIEJSKICH GMINY SŁAWNO W POWIECIE OPOCZYŃSKIM

Celem pracy jest przedstawienie możliwości wykorzystania narzędzi GIS w analizie struktury przestrzennej obszarów wiejskich. Badania przeprowadzono w 34 wsiach gminy Sławno położonej w powiecie opoczyńskim, województwo łódzkie. W pracy przeprowadzono analizy dotyczące struktury władania gruntami, analizy użytkowania gruntami, jak również analizę rozdrobnienia gruntów gospodarstw indywidualnych. Otrzymane wyniki pozwolą określić stan struktury przestrzennej obszarów wiejskich Polski centralnej.

**Słowa kluczowe:** geodezja rolna, scalenia gruntów, struktura przestrzenna, GIS

## 1. Wprowadzenie

Każdy region Polski charakteryzuje się cechami, które mają bezpośredni wpływ na tempo i rozwój społeczno-gospodarczy [1]. Województwo łódzkie charakteryzuje się gorszymi niż przeciętne w kraju warunkami przyrodniczymi dla rozwoju rolnictwa, ale równocześnie ta forma działalności stanowi obok przemysłu główną specjalizację gospodarczą regionu. W województwie dominują małe i bardzo małe gospodarstwa o niskiej produktywności. Obszary wiejskie charakteryzują się niedostateczną aktywnością gospodarczą i słabą aktywizacją społeczną, niekorzystną sytuacją w zakresie wyposażenia w urządzenia sieciowe czy utrudnioną dostępnością do usług społecznych. Dlatego dla obszarów wiejskich i dominującego na nich rolnictwa tak ważna jest restrukturyzacja produkcji rolnej i podniesienie jej walorów jakościowych zmierzające do zwiększenia efektywności ekonomicznej, jak również poprawa warunków cywilizacyjnych mieszkańców.

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Przemysław Leń, Wyższa Szkoła Inżynieryjno-Ekonomiczna w Rzeszowie, ul. Miłocińska 40, 35-232 Rzeszów, tel. 178660430, plen@wsie.edu.pl

[2] Ewa Głowienka, Politechnika Świętokrzyska, Wydział Inżynierii Środowiska, Geomatyki i Energetyki, Al. Tysiąclecia Państwa Polskiego 7, 25-314 Kielce, eglo@interia.pl

Specyfika gospodarstw rolnych województwa łódzkiego oraz uwarunkowania środowiska wskazują na możliwość zbudowania silnego sektora rolniczego zorientowanego na ekorolnictwo, co poprawi sytuację ekologiczną województwa [2]. Użytki rolne badanego obszaru charakteryzują się dużym rozdrobnieniem, niewielką powierzchnią działek, często o niekształtnych formach. Układ sieci dróg bezpośredniej obsługi użytków rolnych, pochodzący z okresu osadnictwa wsi na tym terenie nie zapewnia dostępu drogowego do nich z siedliska. Natomiast stan techniczny tych dróg utrudnia, a niejednokrotnie uniemożliwia dostęp do działek maszyn rolniczych. Produkcja rolna w tych warunkach obciążona jest nadmiernymi kosztami, a rozwój gospodarstw rolnych jest utrudniony. Występujące wadliwości w rolniczej przestrzeni produkcyjnej można eliminować poprzez realizację kompleksowych prac scalenia i wymiany gruntów. Prace te maja na celu poprawę struktury przestrzennej obszarów wiejskich [3].

Proces scalania gruntów odgrywa istotną rolę w urządzaniu przestrzeni wiejskich, ponieważ stymuluje rozwój funkcji pełnionych przez te obszary m.in. w sferze gospodarczej, społecznej czy środowiskowej. Poprzez zmiany w strukturze własności i użytkowania daje możliwości wydzielenia obszarów funkcjonalno-przestrzennych, niwelując tym samym potencjalne konflikty przestrzenne, środowiskowe i społeczne. Korzystnie wpływa na rozwoju rolnictwa, w tym szczególnie produkcji ekologicznej oraz innych funkcji pozarolniczych. Scalanie gruntów wpisuje się w cel szczegółowy PROW 2014-2020, którym jest „*poprawa wyników gospodarczych wszystkich gospodarstw oraz ułatwianie restrukturyzacji i modernizacji gospodarstw, szczególnie z myślą o zwiększeniu uczestnictwa w rynku i zorientowania na rynek, a także zróżnicowania produkcji rolnej*". Przeprowadzenie procesu scalenia ułatwia prowadzenie produkcji rolnej poprzez ograniczenie kosztów ponoszonych w gospodarstwie, otwiera drogę do wprowadzenia nowoczesnych technologii. Pomaga w racjonalnym wykorzystaniu zasobów ziemi uprawnej poprzez dostosowanie rozłogu gruntów i istniejącej infrastruktury do potrzeb gospodarstw [4].

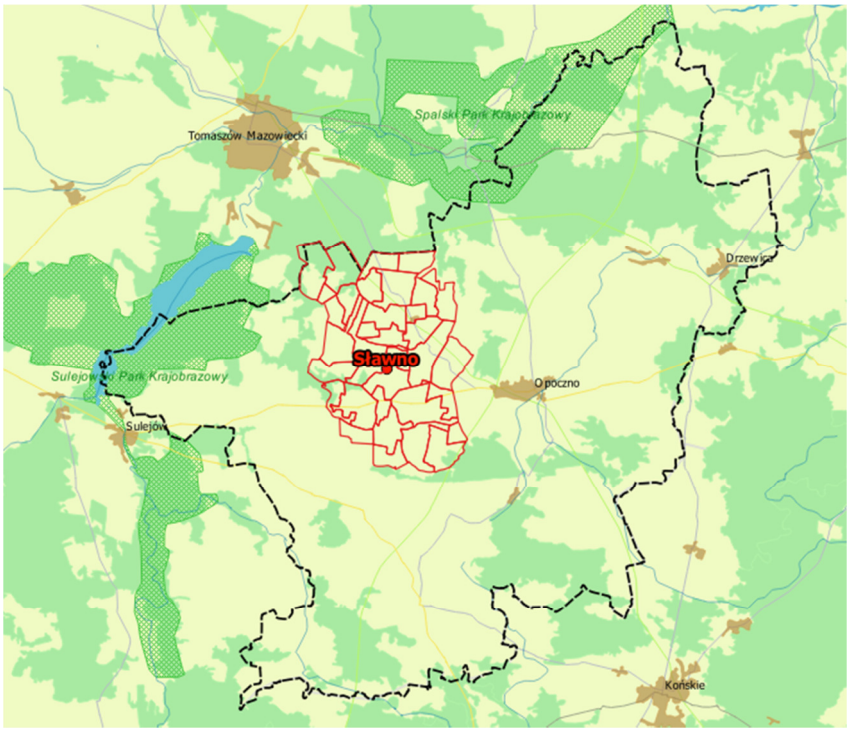
Podjęcie prac przekształcających wadliwe układy gruntowe na całym obszarze jest niemożliwe ze względów technicznych jak i finansowych. Dlatego też prace scalenia i wymiany gruntów powinny być podejmowane w tych wsiach, w których występują najpilniejsze potrzeby. Wynika stąd konieczność oceny stopnia wadliwości struktury przestrzennej gruntów dla określenia zapotrzebowania na prace scalenia i wymiany gruntów, a przede wszystkim ustalenia kolejności ich wykonywania[1]. Aby dokonać tej oceny koniecznym jest przeprowadzenie szeregu analiz charakteryzujących strukturę przestrzenną badanego obszaru. Biorąc pod uwagę charakter analiz oraz zestaw danych potrzebny do ich wykonania niewątpliwie bardzo skutecznym sposobem uzyskania szybkiego i dokładnego wyniku w postaci mapy i tabel, może być zastosowanie narzędzi Geograficznych Systemów Informacji/Systemów Informacji Przestrzennej (GIS/SIP). Dlatego też w niniejszym artykule przedstawiono rezultaty analiz dotyczących struktury władania, użytkowania, jak również rozdrobnienia gruntów gospodarstw indywidualnych przeprowadzone za pomocą metod GIS.

Do przeprowadzenia analiz wykorzystano dane EGiB pozyskane w Powiatowym Ośrodku Dokumentacji Geodezyjnej i Kartograficznej w Opocznie. Dane ewidencyjne zostały zapisane w formacie ESRI SHAPE. Do badania struktury przestrzennej analizowanego obszaru zastosowano narzędzia Systemów Informacji Przestrzennej (SIP/GIS) zaimplentowane w oprogramowaniu Geomedia Professional oraz QGIS. Obydwa programy wykorzystują dane przestrzenno-atrybutowe do zbudowania odpowiednich zapytań do bazy danych, umożliwiających wyselekcjonowanie obiektów o określonych cechach lub relacjach przestrzennych. Wybór oprogramowania miał na celu sprawdzenie funkcjonalności darmowego oprogramowania QGIS w zadaniach analiz struktury przestrzennej nakierowanej na prace scaleniowe, w stosunku do profesjonalnego oprogramowania Geomedia.

Do określenia stosunków prawno-własnościowych oraz sposobu użytkowania posłużyły dane opisowe zapisane w bazie jako odpowiednie atrybuty, dla których przygotowane zostały zapytania typy SQL. Na podstawie danych wektorowych dla wyselekcjonowanych grup obliczona została powierzchnia w poszczególnych obrębach gminy Sławno. W trakcie analiz wykorzystano narzędzia łączenia danych zewnętrznych zapisanych w arkuszach kalkulacyjnych Excel. Takie operacje pozwoliły na wzbogacenie bazy danych o dodatkowe atrybutowe wykorzystane do analizy władania i użytkowania. W przypadku analizy rozdrobnienia wykorzystano typowe zapytania przestrzenne umożliwiające obliczenie powierzchni wszystkich działek, natomiast automatyczne narzędzia do tworzenia map tematycznych i klasyfikowania umożliwiły przyporządkowanie ich do odpowiedniej grupy.

## 2. Analiza badanego obiektu

Gmina Sławno położona jest we wschodniej części województwa łódzkiego, na Wzgórzach Opoczyńskich będących północnym obszarem Wyżyny Kielecko–Sandomierskiej, w odległości 80 km od Łodzi, 20 km od Tomaszowa Mazowieckiego oraz 10 km od Opoczna. Zajmuje powierzchnię 128 km$^2$, co klasyfikuje ją w grupie gmin średnich pod względem powierzchni. Graniczy od północy z gminą Tomaszów Mazowiecki i Inowłódz, od wschodu z gminą Opoczno, od południa z gminami Białaczów i Paradyż, od zachodu z Mniszkowem. Teren gminy zamieszkuje 7.872 mieszkańców w 33 sołectwach. Przez obszar gminy przebiega droga krajowa Nr 12 relacji Piotrków Trybunalski-Radom, droga wojewódzka Nr 713 Opoczno-Łódź [5]. Położenie gminy Sławno ilustruje rys. 1.




Rys. 1. Położenie gminy Sławno

Fig. 1. Localization of community

## 3. Analiza struktury przestrzennej obszarów wiejskich

### 3.1. Stosunki prawno-własnościowe do gruntów

Jak wynika z danych tabeli 1, dominującym sektorem jest indywidualna własność do gruntów, która stanowi 78.2% ogólnej powierzchni badanego obszaru. W poszczególnych obrębach jest ona różna. W 17 obrębach procentowa powierzchnia gruntów indywidualnych przekracza 90.0% a najwyższym odsetkiem charakteryzują się wsie Ludwninów (98.2%), Wincentów (96.4%), Dąbrowa (96.3%), Popławy (96.2%).

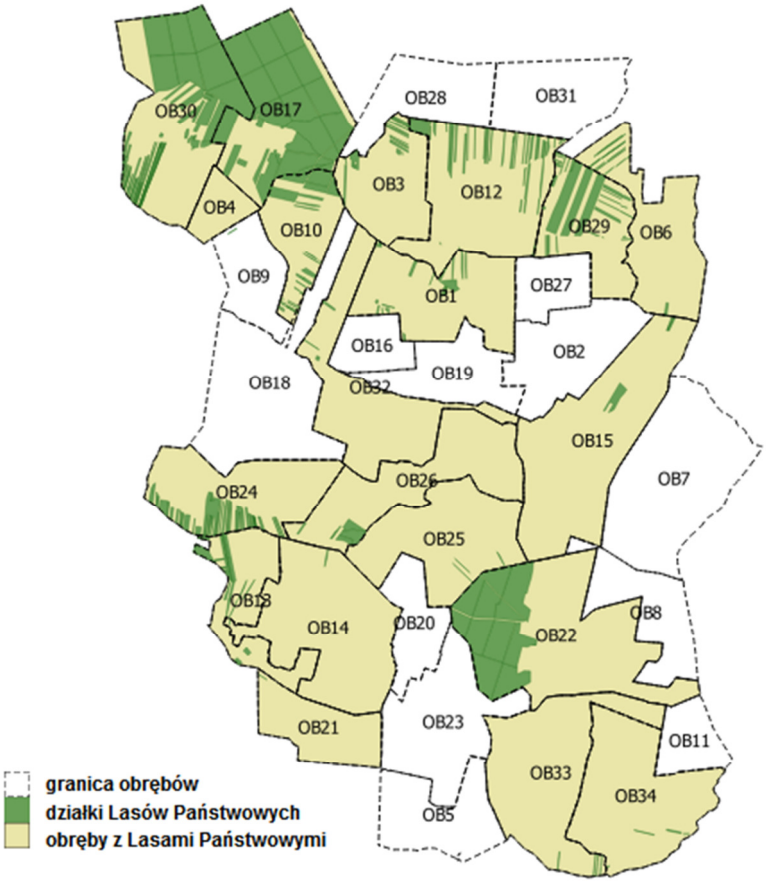
Jak wynika z przeprowadzonych badań w trzech wsiach procentowy udział gruntów indywidualnych jest niewielki i stanowi: we wsi Olszewice (1.2%), Grudzień Las (25.1%) oraz Unewal (32.4%).

Jak wynika z przeprowadzonych badań Lasy Państwowe stanowią 9.6% ogólnej powierzchni badanego terenu. Grunty badanego sektora występują w 20 obrębach, co stanowi 58.8% badanych wsi (rys. 2). Ich procentowy udział waha się od 0.1% we wsiach Zachorzów, Kolonia Grudzień i Popławy do 74.8% we wsi Olszewice.

Tabela 1. Stosunki prawno-własnościowe na badanym terenie

Table 1. Legal and ownership relations in the site

| Lp. | Nazwa obrębu | Powierzchnia ogólna | Udział gruntów gospodarstw indywidualnych | | Udział Lasów Państwowych | | Udział gruntów Agencji Własności Rolnej Skarbu Państwa | | Udział gruntów gminnych | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Pow. | % | Pow. | % | Pow. | % | Pow. | % |
| 1 | Antoninów | 408,7 | 294,5 | 72,1 | 12,7 | 3,1 | 8,5 | 2,1 | 9,5 | 2,3 |
| 2 | Antoniówka | 346,2 | 317,0 | 91,6 | 0,0 | 0,0 | 20,2 | 5,9 | 0,6 | 0,2 |
| 3 | Bratków | 288,3 | 244,6 | 84,8 | 14,1 | 4,9 | 18,5 | 6,4 | 8,1 | 2,8 |
| 4 | Celestynów | 95,0 | 76,3 | 80,4 | 0,0 | 0,0 | 6,9 | 7,2 | 1,4 | 1,5 |
| 5 | Dąbrowa | 280,0 | 269,5 | 96,3 | 0,0 | 0,0 | 2,1 | 0,7 | 6,0 | 2,1 |
| 6 | Dąbrówka | 370,3 | 348,3 | 94,1 | 6,0 | 1,6 | 9,9 | 2,7 | 1,1 | 0,3 |
| 7 | Gawrony | 607,6 | 568,0 | 93,5 | 0,0 | 0,0 | 18,9 | 3,1 | 13,1 | 2,2 |
| 8 | Grążowice | 264,7 | 252,1 | 95,2 | 0,0 | 0,0 | 4,2 | 1,6 | 6,2 | 2,3 |
| 9 | Kolonia Grudzień | 209,3 | 133,1 | 63,6 | 0,2 | 0,1 | 2,0 | 1,0 | 1,3 | 0,6 |
| 10 | Grudzień las | 247,5 | 62,2 | 25,1 | 45,5 | 18,4 | 15,2 | 6,2 | 6,2 | 2,5 |
| 11 | Józefów | 136,4 | 127,4 | 93,4 | 0,0 | 0,0 | 1,6 | 1,2 | 0,0 | 0,0 |
| 12 | Kamień | 550,8 | 447,5 | 81,3 | 44,1 | 8,0 | 25,4 | 4,6 | 27,0 | 4,9 |
| 13 | Kamilówka | 259,2 | 224,0 | 86,4 | 24,1 | 9,3 | 3,7 | 1,4 | 3,9 | 1,5 |
| 14 | Kozenin | 584,2 | 547,0 | 93,6 | 1,1 | 0,2 | 10,8 | 1,9 | 10,4 | 1,8 |
| 15 | Kunice | 683,8 | 623,2 | 91,1 | 8,5 | 1,3 | 26,1 | 3,8 | 3,8 | 0,6 |
| 16 | Ludwinów | 135,1 | 132,7 | 98,2 | 0,0 | 0,0 | 2,3 | 1,7 | 0,1 | 0,1 |
| 17 | Olszewice | 559,2 | 6,6 | 1,2 | 418,2 | 74,8 | 34,2 | 6,1 | 1,7 | 0,3 |
| 18 | Olszowiec | 588,1 | 516,7 | 87,9 | 0,0 | 0,0 | 11,2 | 1,9 | 4,8 | 0,8 |
| 19 | Ostrożyna | 252,1 | 240,8 | 95,5 | 0,0 | 0,0 | 2,0 | 0,8 | 1,5 | 0,6 |
| 20 | Owadów | 195,5 | 148,3 | 75,9 | 0,0 | 0,0 | 4,0 | 2,1 | 2,8 | 1,4 |
| 21 | Popławy | 232,0 | 223,2 | 96,2 | 0,3 | 0,1 | 1,6 | 0,7 | 4,5 | 2,0 |
| 22 | Prymusowa Wola | 755,3 | 467,3 | 61,9 | 245,6 | 32,5 | 11,2 | 1,5 | 12,9 | 1,7 |
| 23 | Janków Psary | 425,4 | 407,9 | 95,9 | 0,0 | 0,0 | 5,2 | 1,2 | 6,8 | 1,6 |
| 24 | Sepno Radonia | 410,2 | 270,8 | 66,0 | 43,2 | 10,5 | 12,9 | 3,2 | 2,9 | 0,7 |
| 25 | Sławno | 439,3 | 391,4 | 89,1 | 0,8 | 0,2 | 7,9 | 1,8 | 10,5 | 2,4 |
| 26 | Sławno Kolonia | 442,7 | 366,3 | 82,8 | 15,0 | 3,4 | 8,9 | 2,0 | 10,6 | 2,4 |
| 27 | Szadkowice | 149,1 | 134,6 | 90,3 | 0,0 | 0,0 | 8,6 | 5,8 | 1,7 | 1,1 |
| 28 | Tomaszówek | 275,4 | 259,8 | 94,3 | 0,0 | 0,0 | 6,0 | 2,2 | 0,5 | 0,2 |
| 29 | Trojanów | 313,9 | 223,2 | 71,1 | 72,7 | 23,2 | 11,9 | 3,8 | 1,9 | 0,6 |
| 30 | Unewal | 638,5 | 207,0 | 32,4 | 286,9 | 44,9 | 4,1 | 0,6 | 36,4 | 5,7 |
| 31 | Wincentów | 303,1 | 292,0 | 96,4 | 0,0 | 0,0 | 5,6 | 1,8 | 0,4 | 0,1 |
| 32 | Wygnanów | 454,6 | 315,3 | 69,4 | 1,6 | 0,4 | 5,8 | 1,3 | 7,1 | 1,6 |
| 33 | Zachorzów | 535,3 | 505,5 | 94,4 | 0,7 | 0,1 | 7,0 | 1,3 | 15,3 | 2,9 |
| 34 | Kolonia Zachorzów | 512,0 | 487,7 | 95,2 | 1,2 | 0,2 | 13,5 | 2,6 | 7,2 | 1,4 |
| **Razem:** | | **12948,8** | **10131,9** | **78,2** | **1242,5** | **9,6** | **337,8** | **2,6** | **228,2** | **1,8** |




Rys.2. Przestrzenne rozmieszczenie gruntów Lasów Państwowych

Fig.2. Spatial distribution of land National Forests

Równie duże zróżnicowanie wsi zaobserwowano dla gruntów Agencji Nieruchomości Rolnej Skarbu Państwa, które kształtują się od 0.6% we wsi Unewal do 7.2% we wsi Celestynów oraz w gruntach gminnych, których ogólna powierzchnia stanowi 1.8% ogólnej powierzchni badanego terenu i waha się ona od 0.1% we wsiach Wincentów, Ludwinów do 5.7% we wsi Unewal. We wsi Józefów grunty gminne nie występują.

Reasumując analizę stosunków prawno-własnościowych gruntów należy stwierdzić dominujący udział sektora indywidualnego zajmujący powyżej 78.0% powierzchni w badanych 34 wsiach. Grunty Lasów Państwowych stanowią 9.6% ogólnej powierzchni i występują one w 20 badanych obrębach. We wsi Olszewice stanowią one prawie 75%. Udział gruntów Agencji Własności Rolnej Skarbu Państwa stanowi 2.6%, zaś udział gruntów gminnych stanowi zaledwie 1.6% ogólnej powierzchni gminy Sławno.

## 3.2. Struktura użytków gruntowych

Na sposób użytkowania gruntów w badanych wsiach decydujący wpływ miała indywidualna własność gruntów. Wielkość tej formy jak wykazano w przeprowadzonej analizie władania stanowi podstawową formę zagospodarowania powierzchni badanego obszaru. Ten fakt sprawił, że od chwili osiedlenia się na tym terenie, ludność przysposabiała go sobie dla celów egzystencjonalnych.

Jak wynika z danych tabeli 2 najwyższy odsetek na badanym terenie stanowią grunty orne, których powierzchnia stanowi 61.3% ogólnej powierzchni gmi-

Tabela 2. Struktura użytków gruntowych

Table 2. Structure of land use

| Lp. | Nazwa obrębu | Ogólna powierzchnia obrębu | Grunty orne | | Lasy | | Pastwiska | | Łąki | | Tereny rolne budowlane | | Tereny komunikacyjne | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | Pow. | % | Pow. | % | Pow. | % | Pow. | % | Pow. | % | Pow. | % |
| 1 | Antoninów | 408,7 | 263,8 | 64,5 | 73,8 | 18,1 | 38,2 | 9,4 | 10,6 | 2,6 | 9,0 | 2,2 | 4,3 | 1,1 |
| 2 | Antoniówka | 346,2 | 227,2 | 65,6 | 44,4 | 12,8 | 28,4 | 8,2 | 22,7 | 6,6 | 7,3 | 2,1 | 6,3 | 1,8 |
| 3 | Bratków | 288,3 | 188,5 | 65,4 | 45,2 | 15,7 | 7,0 | 2,4 | 18,7 | 6,5 | 7,9 | 2,7 | 4,3 | 1,5 |
| 4 | Celestynów | 95,0 | 52,7 | 55,5 | 13,7 | 14,4 | 7,6 | 8,0 | 4,9 | 5,1 | 4,0 | 4,2 | 1,4 | 1,5 |
| 5 | Dąbrowa | 280,0 | 225,4 | 80,5 | 15,6 | 5,6 | 10,1 | 3,6 | 15,3 | 5,5 | 5,1 | 1,8 | 4,3 | 1,6 |
| 6 | Dąbrówka | 370,3 | 218,0 | 58,9 | 78,0 | 21,1 | 20,0 | 5,4 | 27,8 | 7,5 | 5,8 | 1,6 | 8,1 | 2,2 |
| 7 | Gawrony | 607,6 | 418,2 | 68,8 | 15,3 | 2,5 | 114,3 | 18,8 | 0,0 | 0,0 | 18,4 | 3,0 | 12,7 | 2,1 |
| 8 | Grążowice | 264,7 | 211,7 | 80,0 | 10,9 | 4,1 | 17,5 | 6,6 | 3,9 | 1,5 | 8,1 | 3,1 | 6,5 | 2,4 |
| 9 | Kolonia Grudzień | 209,3 | 165,6 | 79,1 | 15,3 | 7,3 | 9,9 | 4,7 | 0,0 | 0,0 | 4,8 | 2,3 | 4,2 | 2,0 |
| 10 | Grudzień las | 247,5 | 104,6 | 42,3 | 101,4 | 41,0 | 21,2 | 8,6 | 0,0 | 0,0 | 3,2 | 1,3 | 3,6 | 1,5 |
| 11 | Józefów | 136,4 | 113,9 | 83,5 | 1,9 | 1,4 | 7,6 | 5,6 | 6,0 | 4,4 | 3,6 | 2,7 | 1,9 | 1,4 |
| 12 | Kamień | 550,8 | 301,2 | 54,7 | 152,4 | 27,7 | 46,7 | 8,5 | 11,8 | 2,1 | 9,5 | 1,7 | 8,6 | 1,6 |
| 13 | Kamilówka | 259,2 | 164,3 | 63,4 | 77,4 | 29,9 | 6,9 | 2,7 | 0,0 | 0,0 | 1,9 | 0,7 | 4,7 | 1,8 |
| 14 | Kozenin | 584,2 | 426,1 | 72,9 | 51,8 | 8,9 | 30,4 | 5,2 | 30,6 | 5,2 | 14,4 | 2,5 | 22,1 | 3,8 |
| 15 | Kunice | 683,8 | 465,1 | 68,0 | 38,5 | 5,6 | 111,8 | 16,3 | 7,4 | 1,1 | 15,1 | 2,2 | 15,2 | 2,2 |
| 16 | Ludwinów | 135,1 | 97,6 | 72,2 | 9,2 | 6,8 | 21,0 | 15,5 | 0,0 | 0,0 | 3,1 | 2,3 | 2,3 | 1,7 |
| 17 | Olszewice | 559,2 | 70,5 | 12,6 | 430,3 | 76,9 | 6,9 | 1,2 | 0,0 | 0,0 | 1,4 | 0,2 | 5,9 | 1,1 |
| 18 | Olszowiec | 588,1 | 449,4 | 76,4 | 84,0 | 14,3 | 25,2 | 4,3 | 1,3 | 0,2 | 10,8 | 1,8 | 15,6 | 2,6 |
| 19 | Ostrożyna | 252,1 | 201,2 | 79,8 | 3,0 | 1,2 | 28,2 | 11,2 | 3,2 | 1,3 | 5,6 | 2,2 | 4,3 | 1,7 |
| 20 | Owadów | 195,5 | 140,6 | 71,9 | 10,2 | 5,2 | 19,9 | 10,2 | 0,0 | 0,0 | 5,7 | 2,9 | 5,3 | 2,7 |
| 21 | Popławy | 232,0 | 175,5 | 75,6 | 9,6 | 4,1 | 15,0 | 6,5 | 14,8 | 6,4 | 5,7 | 2,4 | 4,4 | 1,9 |
| 22 | Prymusowa Wola | 755,3 | 391,8 | 51,9 | 246,0 | 32,6 | 47,7 | 6,3 | 6,8 | 0,9 | 13,6 | 1,8 | 24,6 | 3,3 |
| 23 | Janków Psary | 425,4 | 300,0 | 70,5 | 29,0 | 6,8 | 41,3 | 9,7 | 22,2 | 5,2 | 12,5 | 2,9 | 11,1 | 2,6 |
| 24 | Sepno Radonia | 410,2 | 276,0 | 67,3 | 98,2 | 23,9 | 14,8 | 3,6 | 0,0 | 0,0 | 5,5 | 1,3 | 12,4 | 3,0 |
| 25 | Sławno | 439,3 | 259,6 | 59,1 | 68,9 | 15,7 | 60,6 | 13,8 | 13,9 | 3,2 | 12,3 | 2,8 | 9,9 | 2,3 |
| 26 | Sławno Kolonia | 442,7 | 270,3 | 61,1 | 49,6 | 11,2 | 34,1 | 7,7 | 10,7 | 2,4 | 13,8 | 3,1 | 10,7 | 2,4 |
| 27 | Szadkowice | 149,1 | 91,1 | 61,1 | 3,2 | 2,2 | 29,1 | 19,5 | 0,4 | 0,3 | 9,0 | 6,0 | 4,3 | 2,9 |
| 28 | Tomaszówek | 275,4 | 179,1 | 65,0 | 25,4 | 9,2 | 19,9 | 7,2 | 28,0 | 10,2 | 9,4 | 3,4 | 4,2 | 1,5 |
| 29 | Trojanów | 313,9 | 130,7 | 41,6 | 143,7 | 45,8 | 13,6 | 4,3 | 13,5 | 4,3 | 3,6 | 1,2 | 6,4 | 2,0 |
| 30 | Unewal | 638,5 | 76,3 | 12,0 | 386,1 | 60,5 | 23,7 | 3,7 | 11,3 | 1,8 | 9,7 | 1,5 | 6,4 | 1,0 |
| 31 | Wincentów | 303,1 | 193,7 | 63,9 | 25,6 | 8,5 | 54,3 | 17,9 | 8,1 | 2,7 | 9,0 | 3,0 | 5,5 | 1,8 |
| 32 | Wygnanów | 454,6 | 324,1 | 71,3 | 49,6 | 10,9 | 19,0 | 4,2 | 15,8 | 3,5 | 15,2 | 3,3 | 10,9 | 2,4 |
| 33 | Zachorzów | 535,3 | 419,8 | 78,4 | 41,7 | 7,8 | 25,9 | 4,8 | 12,8 | 2,4 | 13,0 | 2,4 | 12,3 | 2,3 |
| 34 | Kolonia Zachorzów | 512,0 | 344,4 | 67,3 | 65,6 | 12,8 | 20,0 | 3,9 | 47,8 | 9,3 | 10,6 | 2,1 | 9,5 | 1,8 |
| **Razem:** | | **12948,8** | **7937,7** | **61,3** | **2514,4** | **19,4** | **997,8** | **7,7** | **370,4** | **2,9** | **287,5** | **2,2** | **274,2** | **2,1** |

ny Sławno i waha się ona od 12.0% we wsi Unewal do 83.5% we wsi Józefów. W 30 wsiach procentowy udział gruntów ornych stanowi ponad 50.0% powierzchni poszczególnych wsi. Przeprowadzone badania wykazały także, iż lasy stanowią 19.4% ogólnej powierzchni wsi. Przy czym, we wsi Olszewice stanowią one aż 76.9% powierzchni tego obrębu. Natomiast w przypadku obrębów 11 i 19 (Józefów i Ostrożyna) stanowią niewiele ponad 1.0% ich powierzchni. Kolejnym użytkiem pod względem wielkości powierzchni są pastwiska, które stanowią 7.7% ogólnej powierzchni badanej gminy. Ich powierzchnia waha się od 1.2% we wsi Olszewice do 19.5% we wsi Szadkowice. Użytki typu „Łąki" stanowią 2.9% powierzchni całkowitej gminy Sławno. Ich powierzchnia waha się od 0.2% we wsi Olszowiec do 10.2% we wsi Tomaszówek. Ponadto, przeprowadzone analizy wykazały, iż bardzo niewielki udział w powierzchni całkowitej badanego obszaru gminy stanowią tereny rolne budowlane i tereny komunikacyjne (odpowiednio 2.2% i 2.1%).

### 3.3. Rozdrobnienie gruntów gospodarstw indywidualnych

#### 3.3.1. Rozdrobnienie ze względu na liczbę działek ewidencyjnych

Jak wynika z danych tabeli 3 w gminie Sławno, 22.6% wszystkich działek, to działki, których powierzchnia nie przekracza 0.10 ha. Jednak liczba działek o tak małej powierzchni, w poszczególnych wsiach jest bardzo zróżnicowana. Waha się ona 1.1.% we wsi Popławy aż do 54.2% we wsi Grążowice.

W przedziale powierzchni 0.11÷0.30 ha, w badanej gminie znajduje się 7846 działek, co stanowi 32.9% ogólnej liczby działek. W poszczególnych wsiach liczba działek w analizowanym przedziale jest różna. Waha się ona od 13.9% we wsi Popławy do 43.3% we wsi Szadkowice. W przedziale od 0.31÷0.60 liczba działek wynosi 5467, co stanowi 22.9% ogólnej liczby działek w gminie Sławno. Ich procentowy udział waha się od 10.8% we wsi Grążowice do 43.8% we wsi Celestynów. Należy zaznaczyć, że jedynie we wsi Olszewice nie odnotowano działek w badanym przedziale powierzchniowym. Na podstawie analizy przedziału od 0.61-1.0ha uzyskano 2817 działek ewidencyjnych, co stanowi 11.8% ogólnej powierzchni gminy. Procentowy udział w wydzielonym przedziale waha się od 3.1% we wsi Owadów do 25.1% we wsi Popławy. Działek powyżej 1.01ha odnotowano 2354, co stanowi 9.9% ogólnej powierzchni badanego terenu. Procentowy udział tych działek waha się od 1.5% we wsi Ostrożyna do 32.2% we wsi Popławy.

Tabela 3. Rozdrobnienie działek ze względu na ich liczbę

Table 3. Fragmentation of farmland due to their number

| Lp. | Nazwa obrębu | Ogólna liczba działek | Przedziały powierzchniowe | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0÷0.10ha | | 0.11÷0.30 ha | | 0.31÷0.60 ha | | 0.61÷1,00 ha | | >1.01 ha | |
| | | | Liczba | % | Liczba | % | Liczba | % | Liczba | % | Liczba | % |
| 1 | Antoninów | 678 | 137 | 20,2 | 205 | 30,2 | 164 | 24,2 | 110 | 16,2 | 62 | 9,1 |
| 2 | Antoniówka | 847 | 161 | 19,0 | 288 | 34,0 | 248 | 29,3 | 104 | 12,3 | 46 | 5,4 |
| 3 | Bratków | 545 | 123 | 22,6 | 200 | 36,7 | 114 | 20,9 | 48 | 8,8 | 60 | 11,0 |
| 4 | Celestynów | 153 | 12 | 7,8 | 36 | 23,5 | 67 | 43,8 | 23 | 15,0 | 15 | 9,8 |
| 5 | Dąbrowa | 756 | 147 | 19,4 | 292 | 38,6 | 171 | 22,6 | 110 | 14,6 | 36 | 4,8 |
| 6 | Dąbrówka | 764 | 220 | 28,8 | 182 | 23,8 | 163 | 21,3 | 106 | 13,9 | 93 | 12,2 |
| 7 | Gawrony | 1726 | 385 | 22,3 | 641 | 37,1 | 453 | 26,2 | 176 | 10,2 | 71 | 4,1 |
| 8 | Grążowice | 1180 | 639 | 54,2 | 301 | 25,5 | 128 | 10,8 | 71 | 6,0 | 41 | 3,5 |
| 9 | Kolonia Grudzień | 323 | 38 | 11,8 | 110 | 34,1 | 105 | 32,5 | 44 | 13,6 | 26 | 8,0 |
| 10 | Grudzień Las | 238 | 92 | 38,7 | 83 | 34,9 | 34 | 14,3 | 19 | 8,0 | 10 | 4,2 |
| 11 | Józefów | 407 | 68 | 16,7 | 169 | 41,5 | 117 | 28,7 | 45 | 11,1 | 8 | 2,0 |
| 12 | Kamień | 886 | 127 | 14,3 | 283 | 31,9 | 250 | 28,2 | 131 | 14,8 | 95 | 10,7 |
| 13 | Kamilówka | 504 | 49 | 9,7 | 196 | 38,9 | 130 | 25,8 | 83 | 16,5 | 46 | 9,1 |
| 14 | Kozenin | 862 | 64 | 7,4 | 208 | 24,1 | 260 | 30,2 | 159 | 18,4 | 171 | 19,8 |
| 15 | Kunice | 1426 | 306 | 21,5 | 441 | 30,9 | 318 | 22,3 | 194 | 13,6 | 167 | 11,7 |
| 16 | Ludwinów | 242 | 28 | 11,6 | 47 | 19,4 | 84 | 34,7 | 48 | 19,8 | 35 | 14,5 |
| 17 | Olszewice | 17 | 5 | 29,4 | 7 | 41,2 | 0 | 0,0 | 4 | 23,5 | 1 | 5,9 |
| 18 | Olszowiec | 835 | 88 | 10,5 | 234 | 28,0 | 208 | 24,9 | 148 | 17,7 | 157 | 18,8 |
| 19 | Ostrożyna | 995 | 331 | 33,3 | 378 | 38,0 | 213 | 21,4 | 58 | 5,8 | 15 | 1,5 |
| 20 | Owadów | 777 | 351 | 45,2 | 298 | 38,4 | 88 | 11,3 | 24 | 3,1 | 16 | 2,1 |
| 21 | Popławy | 267 | 3 | 1,1 | 37 | 13,9 | 74 | 27,7 | 67 | 25,1 | 86 | 32,2 |
| 22 | Prymusowa Wola | 1291 | 405 | 31,4 | 522 | 40,4 | 206 | 16,0 | 71 | 5,5 | 87 | 6,7 |
| 23 | Janków Psary | 1211 | 285 | 23,5 | 458 | 37,8 | 285 | 23,5 | 120 | 9,9 | 63 | 5,2 |
| 24 | Sepno Radonia | 324 | 6 | 1,9 | 51 | 15,7 | 98 | 30,2 | 67 | 20,7 | 102 | 31,5 |
| 25 | Sławno | 847 | 150 | 17,7 | 313 | 37,0 | 189 | 22,3 | 94 | 11,1 | 101 | 11,9 |
| 26 | Sławno Kolonia | 465 | 26 | 5,6 | 108 | 23,2 | 128 | 27,5 | 88 | 18,9 | 115 | 24,7 |
| 27 | Szadkowice | 436 | 84 | 19,3 | 189 | 43,3 | 95 | 21,8 | 50 | 11,5 | 18 | 4,1 |
| 28 | Tomaszówek | 295 | 18 | 6,1 | 60 | 20,3 | 68 | 23,1 | 60 | 20,3 | 89 | 30,2 |
| 29 | Trojanów | 488 | 58 | 11,9 | 172 | 35,2 | 147 | 30,1 | 61 | 12,5 | 50 | 10,2 |
| 30 | Unewal | 580 | 138 | 23,8 | 233 | 40,2 | 123 | 21,2 | 43 | 7,4 | 43 | 7,4 |
| 31 | Wincentów | 534 | 89 | 16,7 | 145 | 27,2 | 122 | 22,8 | 86 | 16,1 | 92 | 17,2 |
| 32 | Wygnanów | 451 | 15 | 3,3 | 161 | 35,7 | 122 | 27,1 | 49 | 10,9 | 104 | 23,1 |
| 33 | Zachorzów | 1309 | 355 | 27,1 | 438 | 33,5 | 265 | 20,2 | 143 | 10,9 | 108 | 8,3 |
| 34 | Kolonia Zachorzów | 1212 | 384 | 31,7 | 360 | 29,7 | 230 | 19,0 | 113 | 9,3 | 125 | 10,3 |
| | **Razem:** | **23871** | **5387** | **22,6** | **7846** | **32,9** | **5467** | **22,9** | **2817** | **11,8** | **2354** | **9,9** |

### 3.3.2. Rozdrobnienie ze względu na powierzchnię działek ewidencyjnych

Jak wynika z przeprowadzonych badań (tabela 4) działki o powierzchni 0÷0.10 ha wynoszą 279.5 ha, co stanowi 2.8% ogólnej powierzchni badanej gminy. Procentowy udział w badanym przedziale jest bardzo zróżnicowany, gdyż tylko w 2 wsiach procentowy udział przekracza 10.0%: Owadów (13.0%) i Grążowice (11.6%), z kolei w 29 wsiach nie przekracza on 5.0% ogólnej po-

wierzchni badanych wsi. W kolejnym przedziale 0.11÷0.30 ha grunty zajmują 1485,1ha, co stanowi 15.0% badanej gminy. Ich powierzchnia waha się od 3.7% we wsi Popławy do 36.9% we wsi Prymusowa Wola. W 11 obrębach procentowy udział wyniósł ponad 20.0%.

W trzecim badanym przedziale powierzchniowym 0.31÷0.60 powierzchnia działek stanowi 23.4% ogólnej powierzchni. I waha się ona od 11.2% we wsi Tomaszówek do 37.9% we wsi Józefów. W 8 wsiach gminy Sławno procentowy udział w wydzielonym przedziale przekroczył 30.0%. W przedziale od 0.61÷1.00 ha powierzchnia działek wyniosła 2150.8 ha, co stanowi 21.7% ogólnej powierzchni gminy. Procentowy udział waha się od 12.1% we wsi Owadów aż do 54.4% we wsi Olszewice. W ostatnim badanym przedziale powyżej 1.01 ha, powierzchnia działek gruntów gospodarstw indywidualnych wyniosła 3684.4 ha, co stanowi 37.1% całkowitej powierzchnie gruntów indywidualnych. Powierzchnia ta waha się od 0.9% we wsi Prymusowa Wola do 66.3% we wsi Tomaszówek. W 6 wsiach procentowy udział w badanym przedziale wyniósł ponad 50.0% ogólnej powierzchni gruntów indywidualnych.

## 4. Podsumowanie

Zastosowane narzędzia analiz, którymi dysponują Systemy Informacji Przestrzennej umożliwia bardzo sprawną i wnikliwą analizę struktury przestrzennej pod kątem użytkowania, władania, jak również rozdrobnienia działek. W przypadku gminy Sławno dzięki wykorzystanym narzędziom zaimplementowanym w oprogramowaniu QGIS uzyskano mapy i tabelaryczne zestawienia powierzchni lub liczby działek dla zadanych grup władania, użytkowania lub rozdrobnienia, które pozwoliły na dokładne przeanalizowanie warunków prawno-własnościowych i oraz struktury użytkowej występujących w badanej gminie Sławno.

Jak wynika z przeprowadzonych badań w gminie Sławno rozdrobnienie gruntów gospodarstw indywidualnych jest dość duże, jednak zdecydowanie mniejsze a niżeli we wsiach położonych w południowo-wschodniej Polsce, gdzie działki do 0.10 ha stanowiły aż 34.6% ogólnej liczby działek, a powierzchnia przez nie zajmowaną (3467.3ha), stanowiła 6.5% powierzchni badanego terenu [6]. W gminie Sławno działki te zajmowały 22.6% a ich powierzchnia stanowiła zaledwie 2.8% ogólnej powierzchni gruntów indywidualnych. Działki o powierzchni większej od 1.01 ha stanowiły aż 9.9% ogólnej liczby działek, co stanowi 37.1% ogólnej powierzchni badanego terenu.

Tabela 4. Rozdrobnienie działek ze względu na ich powierzchnię

Table 4. Fragmentation of plots at intervals of surface

| Lp. | Nazwa obrębu | Ogólna powierzchnia gruntów gospodarstw indywidualnych | Przedziały powierzchniowe | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | 0÷0.10ha | | 0.11÷0.30 ha | | 0.31÷0.60 ha | | 0.61÷1,00 ha | | >1.01 ha | |
| | | | Pow. | % | Pow. | % | Pow. | % | Pow. | % | Pow. | % |
| 1 | Antoninów | 294,5 | 7,3 | 2,5 | 38,1 | 12,9 | 70,8 | 24,1 | 86,2 | 29,3 | 92,0 | 31,2 |
| 2 | Antoniówka | 317,0 | 8,4 | 2,7 | 56,6 | 17,9 | 107,0 | 33,7 | 79,4 | 25,1 | 65,6 | 20,7 |
| 3 | Bratków | 244,6 | 6,7 | 2,7 | 39,1 | 16,0 | 48,8 | 20,0 | 37,8 | 15,4 | 112,2 | 45,9 |
| 4 | Celestynów | 76,3 | 0,7 | 0,9 | 7,1 | 9,3 | 28,3 | 37,0 | 17,4 | 22,9 | 22,8 | 29,8 |
| 5 | Dąbrowa | 269,5 | 8,3 | 3,1 | 55,8 | 20,7 | 72,0 | 26,7 | 83,2 | 30,9 | 50,3 | 18,6 |
| 6 | Dąbrówka | 348,3 | 9,1 | 2,6 | 34,1 | 9,8 | 71,7 | 20,6 | 83,3 | 23,9 | 150,1 | 43,1 |
| 7 | Gawrony | 568,0 | 19,3 | 3,4 | 123,7 | 21,8 | 191,6 | 33,7 | 130,9 | 23,0 | 102,5 | 18,0 |
| 8 | Grążowice | 252,1 | 29,1 | 11,6 | 54,2 | 21,5 | 54,0 | 21,4 | 52,8 | 21,0 | 61,9 | 24,5 |
| 9 | Kolonia Grudzień | 133,1 | 2,5 | 1,8 | 21,8 | 16,4 | 44,0 | 33,1 | 32,8 | 24,6 | 32,0 | 24,0 |
| 10 | Grudzień Las | 62,2 | 4,6 | 7,3 | 15,9 | 25,6 | 14,9 | 23,9 | 14,0 | 22,5 | 12,9 | 20,7 |
| 11 | Józefów | 127,4 | 4,1 | 3,2 | 33,2 | 26,0 | 48,3 | 37,9 | 32,9 | 25,8 | 9,0 | 7,0 |
| 12 | Kamień | 447,5 | 6,6 | 1,5 | 54,0 | 12,1 | 107,0 | 23,9 | 99,8 | 22,3 | 180,1 | 40,2 |
| 13 | Kamilówka | 224,0 | 2,6 | 1,2 | 38,3 | 17,1 | 55,0 | 24,6 | 60,8 | 27,2 | 67,2 | 30,0 |
| 14 | Kozenin | 547,0 | 4,2 | 0,8 | 39,0 | 7,1 | 109,6 | 20,0 | 123,1 | 22,5 | 271,2 | 49,6 |
| 15 | Kunice | 623,2 | 13,3 | 2,1 | 83,5 | 13,4 | 135,6 | 21,8 | 149,0 | 23,9 | 241,7 | 38,8 |
| 16 | Ludwinów | 132,7 | 1,4 | 1,1 | 9,6 | 7,3 | 36,0 | 27,1 | 36,7 | 27,6 | 49,0 | 36,9 |
| 17 | Olszewice | 6,6 | 0,3 | 4,6 | 0,9 | 14,0 | 0,0 | 0,0 | 3,6 | 54,4 | 1,8 | 27,0 |
| 18 | Olszowiec | 516,7 | 5,5 | 1,1 | 45,3 | 8,8 | 89,3 | 17,3 | 113,7 | 22,0 | 262,8 | 50,9 |
| 19 | Ostrożyna | 240,8 | 16,3 | 6,8 | 73,8 | 30,6 | 90,4 | 37,5 | 40,9 | 17,0 | 19,4 | 8,1 |
| 20 | Owadów | 148,3 | 19,3 | 13,0 | 52,9 | 35,7 | 35,8 | 24,2 | 18,0 | 12,1 | 22,3 | 15,0 |
| 21 | Popławy | 223,2 | 0,2 | 0,1 | 8,1 | 3,7 | 33,5 | 15,0 | 50,0 | 22,4 | 131,4 | 58,9 |
| 22 | Prymusowa Wola | 259,9 | 23,1 | 8,9 | 95,8 | 36,9 | 84,3 | 32,4 | 54,4 | 20,9 | 2,4 | 0,9 |
| 23 | Janków Psary | 407,9 | 15,2 | 3,7 | 86,3 | 21,2 | 122,3 | 30,0 | 91,8 | 22,5 | 92,3 | 22,6 |
| 24 | Sepno Radonia | 270,8 | 0,3 | 0,1 | 10,9 | 4,0 | 43,7 | 16,1 | 51,7 | 19,1 | 164,2 | 60,6 |
| 25 | Sławno | 391,4 | 9,5 | 2,4 | 56,8 | 14,5 | 79,2 | 20,2 | 74,2 | 19,0 | 171,6 | 43,8 |
| 26 | Sławno Kolonia | 366,3 | 1,7 | 0,5 | 21,3 | 5,8 | 54,8 | 15,0 | 66,2 | 18,1 | 222,4 | 60,7 |
| 27 | Szadkowice | 134,6 | 4,4 | 3,3 | 34,5 | 25,6 | 36,5 | 27,1 | 39,1 | 29,1 | 20,1 | 14,9 |
| 28 | Tomaszówek | 259,8 | 1,1 | 0,4 | 12,1 | 4,7 | 29,0 | 11,2 | 45,1 | 17,4 | 172,3 | 66,3 |
| 29 | Trojanów | 223,2 | 3,9 | 1,8 | 32,9 | 14,7 | 62,6 | 28,0 | 46,7 | 20,9 | 77,0 | 34,5 |
| 30 | Unewal | 207,0 | 8,6 | 4,2 | 42,9 | 20,7 | 52,2 | 25,2 | 33,8 | 16,3 | 69,5 | 33,6 |
| 31 | Wincentów | 292,0 | 5,2 | 1,8 | 27,9 | 9,6 | 51,3 | 17,6 | 67,6 | 23,2 | 140,0 | 47,9 |
| 32 | Wygnanów | 315,3 | 1,0 | 0,3 | 32,0 | 10,1 | 52,4 | 16,6 | 38,8 | 12,3 | 191,1 | 60,6 |
| 33 | Zachorzów | 505,5 | 18,7 | 3,7 | 79,2 | 15,7 | 114,5 | 22,7 | 108,0 | 21,4 | 185,0 | 36,6 |
| 34 | Kolonia Zachorzów | 487,6 | 16,9 | 3,5 | 67,2 | 13,8 | 98,2 | 20,1 | 87,1 | 17,9 | 218,3 | 44,8 |
| **Razem:** | | **9924,5** | **279,5** | **2,8** | **1485,1** | **15,0** | **2324,6** | **23,4** | **2150,8** | **21,7** | **3684,4** | **37,1** |

## Literatura

[1] Leń P.: Sposób określenia pilności potrzeb scalenia i wymiany gruntów. Rozprawa doktorska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków, 2013.

[2] Strategia Rozwoju Województwa Łódzkiego na lata 2007-2020.

[3] Szczepanik B. 2005, Scalenia gruntów niezbędnym zabiegiem w procesie przekształcania rolniczej przestrzeni produkcyjnej. Scalenia gruntów podstaw rozwoju obszarów wiejskich rozdrobnionego rolnictwa południowo-wschodniej Polski. Rzeszów 2005.

[4] Bielska A., Leń P., (red), Balawejder M., Bielska A., Gniadek J., Król Ż., Kupidura A., Leń P., Oleniacz G., Sobolewska-Maikulska K., Turek A., 2015. Scalenia gruntów determinantem wielofunkcyjnego rozwoju obszarów wiejskich. WSIE, Rzeszów, 2015.

[5] www.ugslawno.pl/portal.php?aid=120411304547c54e9568f2c, data dostępu 20.07.2015 r.

[6] Leń P. 2010. Analiza rozdrobnienia gruntów indywidualnych na przykładzie powiatu Brzozów. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, Kraków, Nr 2010/ 01.

## THE GIS METHODS APPLICATION IN ANALYSIS OF SPATIAL STRUCTURE OF RURAL AREAS MUNICIPALITY SLAWNO, IN THE DISTRICT OPOCZNO

**S u m m a r y**

The aim of the paper is to present the possibilities of using GIS methods in analyzing the spatial structure of rural areas. The study was conducted in 34 villages of the municipality Sławno located in the district of Opoczno, Lodz province. The study was carried out analysis of the structure possession of land, land use, and analysis of land fragmentation of individual farms. The results will determine the status of the spatial structure of rural Polish central.

**Keywords:** agricultural land surveying, land consolidation, spatial structure, GIS

DOI:10.7862/rb.2016.205

*Przesłano do redakcji: 25.08.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 239-246

**Zofia LUBAŃSKA**[1]
**Tomasz GRUDNIEWSKI**[2]
**Marta CHODYKA**[3]
**Jerzy NITYCHORUK**[4]

# RODZAJE METOD SEKWESTRACJI $CO_2$

Z pojęciem ochrony środowiska wiąże się bardzo szeroko w ostatnim czasie omawiane zagadnienie dotyczące ograniczenia emisji $CO_2$. Konsekwencją globalnych zmian klimatu wywołanego przez ludzi jest wzrost stężenia atmosferycznego gazów cieplarnianych, które powodują nasilający się efekt cieplarniany. Wzrasta na świecie liczba ludności, a co za tym idzie wzrasta konsumpcja na jednego mieszkańca, szczególnie w krajach szeroko rozwiniętych gospodarczo. Protokół z Kioto ściśle określa działania jakie należy podjąć w celu zmniejszenia stężenia dwutlenku węgla w atmosferze. Pomimo maksymalnej optymalizacji procesu spalania paliw kopalnianych wykorzystywanych do produkcji energii, zastosowania odnawialnych źródeł energii zmiana klimatu jest nieunikniona i konsekwentnie będzie postępować przez kolejne dekady.

Prognozuje się, że duże znaczenie odegra nowoczesna technologia, która ma za zadanie wychwycenie $CO_2$ a następnie składowanie go w odpowiednio wybranych formacjach geologicznych (CCS- Carbon Capture and Storage). Eksperci są zgodni, że ta technologia w niedalekiej przyszłości stanie się rozwiązaniem pozwalającym ograniczyć ogromną ilość emisji $CO_2$ pochodzącą z procesów wytwarzania energii z paliw kopalnych. Z analiz Raportu IPCC wynika, iż technologia CSS może się przyczynić do ok. 20% redukcji emisji dwutlenku węgla przewidzianej do 2050 roku [3]. Zastosowanie jej napotyka na wiele barier, nie tylko technologicznych i ekonomicznych, ale także społecznych.

Inną metodą dającą ujemne źródło emisji $CO_2$ jest możliwość wykorzystania obszarów leśnych o odpowiedniej strukturze drzewostanu. Środkiem do tego celu, oprócz ograniczenia zużycia emisjogennych paliw kopalnych (przy zachowaniu

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Zofia Lubańska, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Zakład Informatyki, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; tel. 833449989 w. 255; z.lubanska@dydaktyka.pswbp.pl

[2] Tomasz Grudniewski, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Zakład Informatyki, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; tel. 833449989 w. 909; gisbourne2@gmail.com

[3] Marta Chodyka, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Zakład Informatyki, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; tel. 833449989 w. 286; m.chodyka@dydaktyka.pswbp.pl

[4] Jerzy Nitychoruk, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Zakład Budownictwa, ul. Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska; tel. 833449989 w. 907; wnet.dziekan@pswbp.pl

zasad zrównoważonego rozwoju) może być intensyfikacja zalesień. Zwiększanie lesistości i prawidłowa gospodarka leśna należy do najbardziej efektywnych sposobów kompensowania antropogenicznej emisji $CO_2$.
W pracy omówiono najważniejsze metody sekwestracji $CO_2$ i przedstawiono krótką charakterystykę

**Słowa kluczowe:** pochłanianie, utylizacja $CO_2$, ograniczenie emisji $CO_2$

## 1. Wstęp

Większość naukowców przyznaje, że faktem jest zaobserwowane ocieplanie się klimatu na Ziemi, które jest łączone z coraz częstszym występowaniem zjawisk ekstremalnych w różnych częściach świata. Niewątpliwie należy tu podkreślić często używany zwrot jakim jest globalne ocieplenie klimatu. Zmiany klimatu nie są zjawiskiem nowym, proces ten przebiega od początku istnienia świata. Obserwując ich pochodzenie, możemy je podzielić na zmiany naturalne i antropogeniczne, czyli takie, które są kształtowane przez wpływ człowieka. W historii istnienia globu zdarzały się okresy, gdy po zlodowaceniu następowało ocieplenie. Skoro w przeszłości klimat zmieniał się kilkakrotnie, można zadać pytanie, dlaczego istniejące zjawisko globalnego ocieplenia jest uważane za zagrożenie? Odpowiedź jest prosta, obserwowane zmiany, zachodzą zdecydowanie szybciej niż powinny. Potwierdzają to badacze z IPCC (Intergoverment Panel on Climate Change), którzy informują, że w wyniku uwalniania się do atmosfery dużej ilości gazów cieplarnianych obserwujemy wzrost temperatury powietrza, jak i wody w oceanach, co prowadzi do globalnego ocieplenia. Prognoza na przyszłość nie jest obiecująca, przewiduje się coraz większe ocieplenie, które można ograniczyć poprzez zastosowanie różnych metod. W publikacji autorzy przedstawili krótką charakterystykę metody dotyczącej utylizacji dwutlenku węgla jaką jest sekwestracja.

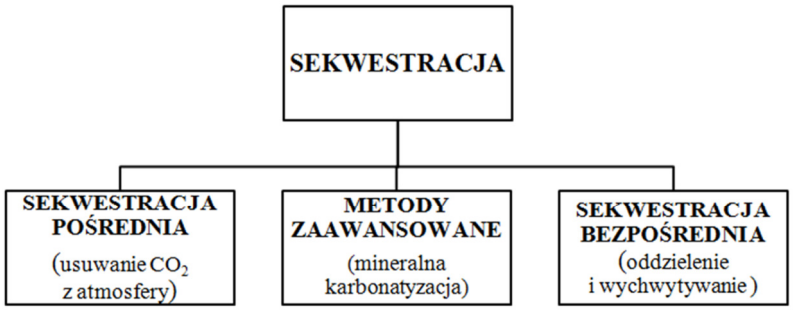
## 2. Metody sekwestracji

Ze względu na sposób przechowywania dwutlenku węgla oraz formy chemiczne, w jakich występuje węgiel w tych środowiskach, metody sekwestracji dzielimy na:

- uwięzienie w ekosystemach ziemskich – roślinach, które magazynują $CO_2$ poprzez proces fotosyntezy,
- sekwestracja morska,
- sekwestracja mineralna (karbonizacja),
- sekwestracja geologiczna.

Metody sekwestracji dzieli się na bezpośrednie, pośrednie oraz zaawansowane (rys.1). Sekwestracja bezpośrednia polega na wychwytywaniu dwutlenku węgla jeszcze przed jego emisją do atmosfery, następnym etapem jest składowanie go w bezpiecznych dla środowiska warunkach, w głębokich formacjach geo-

logicznych [1]. Natomiast sekwestracja pośrednia polega na usuwaniu dwutlenku węgla z atmosfery z wykorzystaniem roślin, które w procesie fotosyntezy przekształcają go w tlen, zapewniając utrzymanie równowagi gazowej atmosfery.




Rys. 1 Metody sekwestracji, na podstawie [2]

Fig.1 Sequestration Method, based on [2]

## 3. Sekwestracja pośrednia

Sekwestracja pośrednia jest jedną z metod, która zasługuje na szczególną uwagę. Opisane poniżej metody znajdują zastosowanie w redukcji emisji dwutlenku węgla, pomimo tego, że wymagają zakupu nowoczesnych technologii do wychwytywania $CO_2$ z atmosfery oraz płacenia za jego magazynowanie np. w pokładach geologicznych. Zbyt mały natomiast nacisk kładzie się na rozwój naturalnych mechanizmów pochłaniania $CO_2$, jakim może być intensyfikacja zalesień. Ekosystem (las) jest konserwowany, wzbogacany (uzupełniany) lub manipulowany w celu zwiększenia jego zdolności do magazynowania dwutlenku węgla. Sekwestracja przez biosferę jest szacowana na około 2 mln ton metrycznych na rok [1]. Zbiorowiska leśne pokrywają około 30% lądów, zajmując nieco ponad 4 mld ha, dalsze 24% przypada na grunty uprawne, pozostałe 46% to obszary bezleśne, pustynie, zurbanizowane.

## 4. Mineralna karbonizacja

Mineralna karbonatyzacja jako proces charakteryzuje się wieloma zaletami. Należy podkreślić, że jest to naturalny proces występujący w przyrodzie, w wyniku którego powstają termodynamicznie stabilne produkty, obojętne dla środowiska, a wiązanie jest trwałe, przez co nie ma zagrożenia dla środowiska; reakcja karbonatyzacji jest egzotermiczna, a powstała energia może być potencjalnie wykorzystana [6, 10].

Proces mineralnej karbonatyzacji poprzez wiązanie $CO_2$ w naturalnych surowcach mineralnych takich jak talk czy serpentyn jest zjawiskiem występującym w przyrodzie. Jest to jedna z reakcji, w wyniku której następuje starzenie

się skał w warunkach atmosferycznych [8]. Jest to jednak reakcja przebiegająca bardzo wolno. Zastosowanie surowców mineralnych występujących w przyrodzie znalazło uzasadnienie w procesie karbonatyzacji, jednej z metod sekwestracji dwutlenku węgla. Minerałami naturalnymi, które mogą być stosowane do sekwestracji $CO_2$ na drodze mineralnej karbonatyzacji są m.in.: serpentyn ($Mg_3Si_2O_5(OH)_4$), talk ($Mg_3Si_4O_{10}(OH)_2$), oliwin ($Mg_2SiO_4$). Wśród odpadów, które można stosować wymienić należy: popioły lotne, krzemiany wapniowe i magnezowe, odpady azbestowe, żużle hutnicze, masę Bayera [9, 7, 11].

Mineralna karbonatyzacja może być przeprowadzana dwiema podstawowymi metodami [12]:

- metodą bezpośrednią, w której minerał poddawany jest karbonatyzacji (metoda jednoetapowa),
- metodą pośrednią, w której składniki reaktywne są wstępnie ekstrahowane z matrycy mineralnej (pierwszy etap), a następnie są poddawane reakcji z $CO_2$ (drugi etap) − (metoda dwuetapowa).

W jednym i drugim przypadku może być stosowana wstępna obróbka materiałów, mająca na celu przyspieszenie reakcji $CO_2$. Biorąc pod uwagę zastosowanie mineralnej karbonatyzacji jako metody sekwestracji $CO_2$ istnieją trzy możliwości jej aplikacji [12]:

- in−situ: podziemna mineralna sekwestracja $CO_2$ połączona z geologicznym magazynowaniem $CO_2$,
- ex−situ: naziemny proces przemysłowy:
  - technologia końca rurociągu ($CO_2$ jest przetwarzane w stałe węglany, które są składowane w celu jego sekwestracji),
  - technologia zintegrowana z procesem (dotyczy to np. zastosowania $CO_2$ do produkcji materiałów budowlanych).

## 5. Sekwestracja bezpośrednia

### 5.1. Składowanie geologiczne

Istnieją dwie możliwości sekwestracji bezpośredniej dwutlenku węgla, są to: składowanie geologiczne oraz składowanie w oceanach. Potencjał magazynowania skorupy ziemskiej i oceanów jest bardzo ogromny [Tab.1] Wychwytywanie i składowanie dwutlenku węgla w strukturach geologicznych ma być przejściowe, do momentu opracowania technologii pozwalających na produkcję energii z paliw kopalnych, z jednoczesną redukcją lub eliminacją emisji $CO_2$. Technologia CSS- Carbon Capture and Storage polega na wychwytywaniu dwutlenku węgla powstającego w wyniku spalania paliw kopalnych w procesach wytwarzania energii i innych procesach przemysłowych, a następnie jego długoterminowemu składowaniu w podziemnych formacjach geologicznych. Wychwycony, odseparowany z gazów spalinowych dwutlenek węgla musi zostać oczyszczony, następnie sprężony i przetransportowany do miejsca składowania.

Wśród technologii wychwytu i usuwania $CO_2$, w zależności od umiejscowienia technologii w procesie spalania, wyróżnia się następujące rodziny procesów [4]:

- wyłapywanie i usuwanie $CO_2$ z gazów spalinowych (post- combustion),
- separacja CO2 z paliwa gazowego lub gazu syntezowego przed procesem spalania (pre-combustion),
- spalanie paliw w atmosferze tlenu z recyrkulacją $CO_2$,
- separacja węgla z paliwa przed procesem spalania, np. proces Hydrocarb,
- wyłapywanie i usuwanie $CO_2$ w procesach wykorzystujących ogniwa paliwowe.

Najczęściej stosowaną metodą separacji $CO_2$ jest technologia z grupy post-combustion, między innymi absorpcja chemiczna i fizyczna, adsorpcja, separacja kriogeniczna lub membranowa. Zasadniczym problemem, wynikającym z sekwestracji dwutlenku węgla, jest sam proces wychwytywania, zarówno pod względem technicznym i finansowym (około 80% kosztów), pozostałe 20% kosztów związane jest z transportem oraz magazynowaniem $CO_2$ w strukturach geologicznych. Jako całość, proces technologiczny CCS jest rozwiązaniem nowym (etap demonstracyjny), ciągle jeszcze badanym. Praktycznie w mniejszej skali poszczególne etapy CCS znalazły już komercyjne zastosowanie w przemyśle chemicznym (wychwytywanie) i naftowym – transport i zatłaczanie dwutlenku węgla [5].

## 5.2.Składowanie w oceanach

Istnieją dwie możliwości oceanicznego składowania dwutlenku węgla. Pierwsza zakłada wtłaczanie gazu na małe odległości, aby ulegał on rozpuszczeniu (do 1000m). W drugiej metodzie $CO_2$ jest wtłaczany na głębokość 3000 m, w taki sposób, aby utworzyć jeziorko dwutlenku węgla. Pierwsza metoda powoduje wzrost zakwaszenia wody i tym samym negatywnie wpływa na lokalny ekosystem. Drugi sposób pozwala na zmagazynowanie gazu na znacznie dłuższy okres i odizolowanie go od środowiska morskiego (wokół „jeziora dwutlenku węgla" powstaje warstwa hydratu, który znacznie spowalnia proces rozpuszczania). Istnieje jednak niebezpieczeństwo uwalniania zmagazynowanego dwutlenku węgla w przypadku stopniowego ogrzewania się oceanów. W związku z tym, poza badaniami związanymi z opracowaniem nowych technologii separacji $CO_2$ ze strumieni gazów spalinowych, transportu oraz składowania, prowadzonych jest szereg prac nad konwersją $CO_2$ do paliw (lekkie węglowodory, takie jak metan czy metanol).

Tabela 1. Potencjał magazynowania oraz unieszkodliwiania $CO_2$ wg Kohlmanna
Table 1. Potential storage and disposal of $CO_2$ by Kohlmann

| Miejsce składowania | Pojemność węgla [Gt] |
|---|---|
| Oceany, morza | >1000[4] |
| Kawerny solne | 100-1000 |
| Wyeksploatowane zbiorniki gazu | >140 |
| Wyeksploatowane zbiorniki ropy | >40 |
| Wyeksploatowane pokłady węgla | 10-100 |
| Zatłaczanie z jednoczesnym odzyskiem ropy | 65 |
| Zalesianie | 50-100 |

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono i krótko omówiono metody sekwestracji dwutlenku węgla. Technologia wychwytywania i sekwestracji węgla CCS może stać się ważną metodą redukcji emisji gazów cieplarnianych, jeżeli bariery technologiczne i regulacyjne zostaną przełamane. Sekwestracja dwutlenku węgla (CCS, Carbon Capture and Storage) to obiecująca technologia, która oferuje znaczny potencjał redukcji emisji gazów cieplarnianych w sektorach elektroenergetyki i przemysłu.

Mineralna karbonatyzacja jest interesującą alternatywą dla geologicznej sekwestracji $CO_2$. Wśród wad mineralnej karbonatyzacji przy zastosowaniu surowców naturalnych należy wymienić: wysokie koszty procesu związane z wydobyciem, przeróbką surowca naturalnego, jak również ze znaczącymi odległościami złóż od dużych emitentów $CO_2$.

Na szczególne pokreślenie natomiast zasługuje pochłanianie dwutlenku węgla przez ekosystemy leśne. Priorytetem w działaniu na rzecz ochrony klimatu, nie tylko w bieżącym usuwaniu dwutlenku węgla, ale również w już zmagazynowanym, powinna być ochrona istniejących lasów. Koszty inwestycji technologii CCS, składowania w oceanach czy mineralnej karbonatyzacji są o wiele wyższe niż inwestycja w rozwój naturalnego mechanizmu jakim jest zalesianie terenów. Zalesianie terenów jest bardziej przyjazną środowisku metodą redukcji $CO_2$, a lasy stanowią źródło biomasy.

## Literatura

[1] www.fe.doe.gov {dostęp 2016-05-14}.

[2] Klara S.M.: Pathways to suistainable use of fossil energy. Carbon sequestration "The Path Forward", Energy for the New Millenium, 2002, www.netl.doe.gov {dostęp 2016-05-14}.

[3] IPCC: report:"Energy Technology Perspectives. Scenarios & Strategies to 2050", ODCE 2008.

[4] Dubiński J., Solik–Heliasz E., Uwarunkowania geologiczne dla składowania dwutlenku węgla [w:] Uwarunkowania wdrożenia zeroemisyjnych technologii węglowych w energetyce. Praca zbiorowa pod red. M. Ściążko. Wyd. IChPW, Zabrze 2007.

[5] Gąsiorowska E.: Technologia CCS –szansa czy ślepa uliczka? Studia BAS Nr 1(21), s. 219– 236, 2010.

[6] Goldberg i in. 2001 – Goldberg, P., Chen, Z.Y., O'Connor, W., Walters, R. i Ziock, H. 2001. CO2 mineral sequestration studies in US. First National Conference on Carbon Sequestration. Washington, USA p. 14– 17 May 2001.

[7] HUIJGEN W.J.J., COMANS R.N.J., − Carbon dioxide sequestration by mineral carboantion. ECN−Publications, 2003.

[8] Huijgen W.J.J., Comans R.N.J.: Carbon dioxide sequestration by mineral carboantion. ECN-Publications, 2003.

[9] FAUTH J.D., GOLDBERG P.M., KNOER J.P., SOONG Y., O`CONNOR W.K., DAHLIN D.C., NILSEN D.N., WALTERS R.P., LACKNER K.S., ZIOCK H.J., MCKELVY M.J., CHEN Z.Y., − Carbon dioxide storage as mineral carbonates. Division Fuel Chemistry, Vol. 45, No 4, 2000, p. 708−712.

[10] Huijgen W.J.J. Carbon dioxide sequestration by mineral carbonation. feasibility of enhanced natural weathering as a CO2 emission reduction technology. Thesis, Energy Research Centre of The Netherlands, 232 p., 2007.

[11] MAZURKIEWICZ M., PIOTROWSKI Z., POMYKAŁA R., Zawiesina popiołowo−wodna jako środek transportu CO2 do zrobów kopalni podziemnych. Materiały Szkoły Gospodarki Odpadami, Kraków, 2004.

[12] KAKIZAWA M., YAMASAKI A., YANAGISAWA Y., A new CO2 disposal process using artificial rock weathering of calcium silicate accelerated by acetic acid. Energy, Vol. 26, 2001, p. 341−354.

## TYPES OF METHODS OF $CO_2$ SEQUESTRATION

**S u m m a r y**

The concept of environmental protection involves very widely discussed issue concerning the reduction of $CO_2$ emissions. The consequence of global climate change caused by humans is an increase of atmospheric concentrations of greenhouse gases which cause the intensifying greenhouse effect. The world population is increasing , and hence the consumption per capita i salso increasing, especially in economically developed countries. The Kyoto Protocol sets out strict measures to be taken to reduce the concentration of carbon dioxide in the atmosphere. Despite maximum optimization of combustion of fossil fuels used for energy production, the use of

renewable energy, the climate change is inevitable and consequently will proceed over the next decades.

It is predicted that the modern technology which aims to capture $CO_2$ and store it in well-selected geological formations (CCS- Carbon Capture and Storage) will play an important role. Experts agree that in the near future this technology will become a solution to reduce the enormous amount of $CO_2$ emissions coming from energy production from fossil fuels. The analyses of the IPCC report show that the CSS technology can contribute to approximately 20% reduction in emissions of carbon dioxide by 2050 [3]. Its application faces obstacles, not only technological and economic, but also social.

Another method of giving a negative source of $CO_2$ emissions is the ability to use forest areas with suitable structure stand. The means to reach the aim, in addition to limited consumption of emission-generating fossil fuels (while maintaining the principles of sustainable development) may be the intensification of afforestation. Increasing afforestation and proper management of forests is one of the most effective ways to compensate of anthropogenic $CO_2$ emissions.

The paper discusses the main methods of $CO_2$ sequestration and presents a short overview.

**Keywords:** absorption, disposal of $CO_2$, carbon sequestration, $CO_2$ emissions

DOI:10.7862/rb.2016.206

*Przesłano do redakcji: 27.05.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 247-254

**Maria Teresa MAŁEK**[1]
**Halina KOCZYK**[2]

# WPŁYW ROZWIĄZANIA ŚCIANY ZEWNĘTRZNEJ NA ROZKŁADY TEMPERATUR W PRZEGRODZIE

W referacie porównano rozkład temperatur w przegrodach zewnętrznych bez oraz z barierą termiczną zlokalizowanymi w II strefie klimatycznej z projektową temperaturą zewnętrzną wynoszącą -18°C oraz temperaturą wewnętrzną w pomieszczeniu równą 20°C. Do analiz przyjęto ścianę zewnętrzną o konstrukcji betonowej zaizolowaną z obu stron styropianem. W przypadku przegrody z barierą termiczną, utworzono barierę za pomocą polipropylenowych przewodów wypełnionych niskotemperaturowym czynnikiem zawartych centralnie w warstwie betonu. W obliczeniach wariantowano temperaturę otoczenia zewnętrznego oraz temperaturę bariery termicznej, przy czym temperaturę wewnętrzną w pomieszczeniu latem przyjęto równą 24°C, a w pozostałych miesiącach 20°C. Do symulacji przepływu ciepła w przegrodzie posłużono się jedną z metod numerycznych, metodą bilansów elementarnych, która opiera się na podziale rozpatrywanego elementu na podobszary i określeniu temperatur na końcu kroku czasowego. Zastosowaną metodę opisano krok po kroku, prezentując jednocześnie tok obliczeń dotyczących analizowanych wariantów. Równania temperatur w komórkach bilansowych dla odpowiednich warunków brzegowych zestawiono w formie tabelarycznej. Wspomagająco posłużono się modelem utworzonym w programie MS Excel, dla którego wykonano obliczenia iteracyjne z krokiem czasowym równym 5 s. Otrzymane rezultaty zaprezentowano w postaci rozkładu temperatury. Na ich podstawie stwierdzono np. w warunkach obliczeniowych przesunięcie izotermy 0°C w kierunku środowiska zewnętrznego oraz większą temperaturę w pomieszczeniu na powierzchni przegrody dla rozwiązania z barierą termiczną w porównaniu do wariantu klasycznego. Czynniki te wpływają na zmniejszenie ryzyka wystąpienia wykroplenia wewnątrz przegrody oraz odczucia nagłego spadku temperatury w pobliżu ścian zewnętrznych, a także podwyższenia temperatury odczuwalnej w pomieszczeniu.

**Słowa kluczowe:** bariera termiczna, metoda bilansów elementarnych, metody numeryczne, rozkład temperatury

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Maria Teresa Małek, Politechnika Poznańska, Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza, ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań; tel. 616652534; maria.malek@put.poznan.pl

[2] Halina Koczyk, Politechnika Poznańska, Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza, ul. Berdychowo 4, 61-131 Poznań; tel. 616652532; halina.koczyk@put.poznan.pl

# 1. Wprowadzenie

Rozkład temperatur w przegrodzie wyznacza się za pomocą metod matematycznych: analitycznych (dokładnych) bądź numerycznych (przybliżonych) [1]. Metody analityczne opierają się na rozwiązaniu równań różniczkowych przy danych warunkach brzegowych i zastosowaniu niezbędnych uproszczeń. W wyniku tego zwiększa się trudność znalezienia rozwiązania, a czasem nawet następuje wykluczenie metody, stąd zainteresowanie metodami numerycznymi [1, 2]. Podstawowym założeniem w analizie zmiennych przestrzennych i czasu jest założenie o układzie dyskretnym, a nie ciągłym [2]. Kolejnym krokiem jest kwantyzacja obszaru, czyli podział go na określoną liczbę elementów dyskretnych [3]. Klasyfikację metod przeprowadza się na podstawie rozpatrzenia kwestii dyskretyzacji:

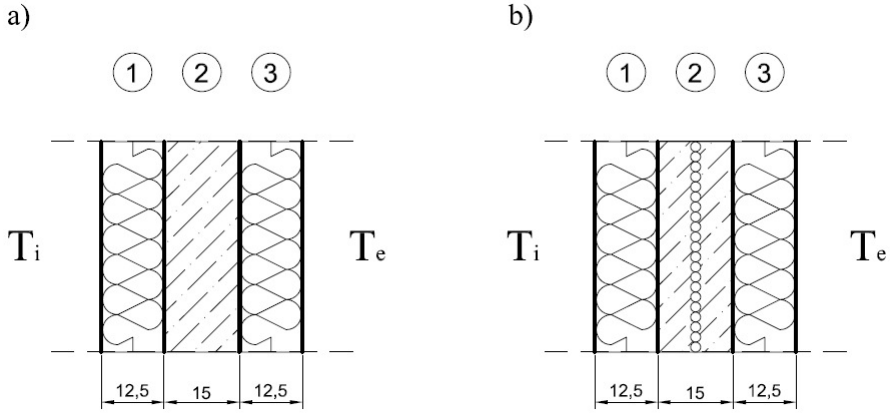
- metoda bilansów elementarnych (MBE), nazywana też metodą bilansów różnicowych (MBR) – dyskretyzacja przed zbudowaniem modelu matematycznego,
- metoda różnic skończonych (MRS) oraz metoda elementów brzegowych (MEB) – dyskretyzacja modelu matematycznego utworzonego zakładając ciągłość przestrzenną i czasową [2].

W poniższym referacie do analizy przepływu ciepła wybrano metodę bilansów elementarnych ze względu na, jak podaje autor [2]: „prostą interpretację fizyczną tej metody". Rozwiązaniu poddano ścianę zewnętrzną bez oraz z barierą termiczną, która w sposób pośredni wykorzystuje promieniowanie słoneczne. Bariera termiczna w przegrodzie wykonana jest za pomocą polipropylenowych przewodów prowadzących niskotemperaturowy czynnik z gruntowego systemu magazynowania ciepła, który natomiast ładowany jest z kolektorów słonecznych.

# 2. Metoda i zakres obliczeń

## 2.1. Charakterystyka przegród

Analizie numerycznej poddano ścianę zewnętrzną bez bariery oraz z barierą termiczną, której konstrukcję zaczerpnięto z danych producenta – firmy ISOMAX [4]. Konstrukcja przegród składa się z dwóch warstw styropianu o gęstości ($\rho$) 30 kg/m$^3$, cieple właściwym (c) równym 1460 J/(kg·K) oraz współczynniku przewodzenia ciepła ($\lambda$) wynoszącym 0,04 W/(m·K), pomiędzy którymi znajduje się warstwa Bio-Poren-Betonu o właściwościach termofizycznych: $\rho$ = 1200 kg/m$^3$, c = 840 J/(kg·K) $\lambda$ = 0,38 W/(m·K). Barierę termiczną stanowią tworzywowe rurki o średnicy 20 mm. Kolejność i grubość warstw przedstawiono na rysunku 1.




Rys. 1. Schemat przegrody: a) bez bariery termicznej, b) z barierą termiczną:
1,3–styropian, 2–Bio-Poren-Beton, $T_i$–temperatura wewnętrzna, $T_e$–temperatura zewnętrzna. Grubości warstw podane w cm

Fig. 1. The scheme of the wall: a) without thermal barrier, b) with thermal barrier:
1,3–styrofoam, 2–Bio-Poren-Concrete, $T_i$–internal temperature, $T_e$–external temperature. The thickness of layer in cm

## 2.2. Równania bilansowe podobszarów

Przegrodę potraktowano jako 2D układ odniesienia, który podzielono na kwadratowe pola o wymiarach $\Delta x=\Delta y=d=0{,}01$m i rozpatrywano $\Delta z$ = 1m (wymiar prostopadły do płaszczyzny rysunku) o nieustalonym przepływie ciepła. Kolejnym elementem jest określenie warunku stabilności modelu, który jest niezbędny do zastosowania metody numerycznej [1, 2, 6]. Dla schematu jawnego dopuszczalna wartość kroku czasowego określona jest zależnością 1 [1, 3].

$$\Delta\tau_{max} = \frac{1}{2a\left(\frac{1}{\Delta x^2}+\frac{1}{\Delta y^2}\right)} \tag{1}$$

gdzie: $a$ – współczynnik wyrównania temperatury, [$m^2$/s],
$\Delta x$ – krok przestrzenny w kierunku osi x, [m],
$\Delta y$ – krok przestrzenny w kierunku osi y, [m].

Stosując zależności odnoszące się do strumienia ciepła (wzór 2) oraz entalpii w węźle przy kroku czasowym $\Delta\tau$ (wzór 3) wyprowadzono równania na temperaturę $T^{+}_{x,y}$ w komórce bilansowej dla odpowiednich typów na końcu kroku czasowego (tabela 1) [3].

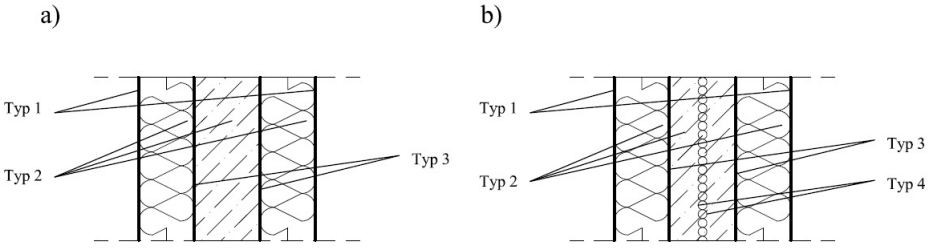
$$\dot{Q} = \sum_{j=1}^{4}\left(\frac{1}{R}\cdot A\cdot \Delta T_j\right) \tag{2}$$

gdzie: $R$ – opór cieplny między danymi segmentami, [$m^2 \cdot K/W$],
$A$ – powierzchnia wymiany ciepła pomiędzy danymi segmentami, [$m^2$]
$A = d \cdot 1m$,
$\Delta T_j$ – różnica temperatur między segmentami, [K].

$$\dot{Q} \cdot \Delta\tau = m \cdot c \cdot \Delta T \tag{3}$$

gdzie: $m$ – masa komórki bilansowej, [kg],
$c$ – ciepło właściwe komórki bilansowej, [J/(kg·K)],
$\Delta T$ – przyrost temperatury w komórce bilansowej, [K].

Położenie punktów węzłowych w komórkach bilansowych przedstawiono na rys. 2, zestawiając 4 charakterystyczne typy elementów dla odpowiednich warunków brzegowych. Typ 1 komórki odnosi się do warunku brzegowego III rodzaju, typ 2 do komórek wewnętrznych, typ 3 do warunku brzegowego IV rodzaju z idealnym stykiem materiałów, natomiast typ 4 do warunku brzegowego I rodzaju. Dla warunku początkowego przyjęto stałą i jednakową temperaturę w przegrodzie dla wszystkich 3 warstw, w przypadku bariery termicznej temperaturę początkową ustalono stałą: 18˚C dla warunków obliczeniowych, a do obliczeń wariantowych średnią arytmetyczną średniej miesięcznej temperatury dla miasta Poznania pobranej ze strony Ministerstwa Infrastruktury i Budownictwa [5] i temperatury wewnętrznej. Temperaturę wewnętrzną założono 24˚C (dla okresu letniego) oraz 20˚C (dla pozostałych miesięcy). Współczynniki przewodzenia ciepła, ciepła właściwego opisano w rozdziale 2.1. Opór przejmowania ciepła na wewnętrznej stronie przegrody przyjęto 0,13 $m^2 \cdot K/W$, natomiast na zewnętrznej równy 0,04 $m^2 \cdot K/W$. Wykonano obliczenia iteracyjne za pomocą programu MS Excel, aż do momentu, gdy temperatura pozostanie niezmienna z dokładnością 0,0001˚C.

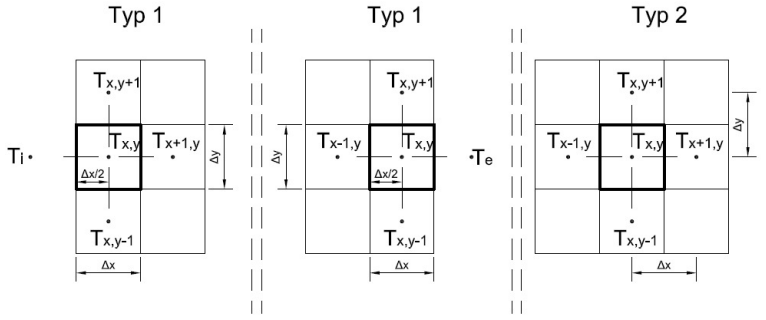
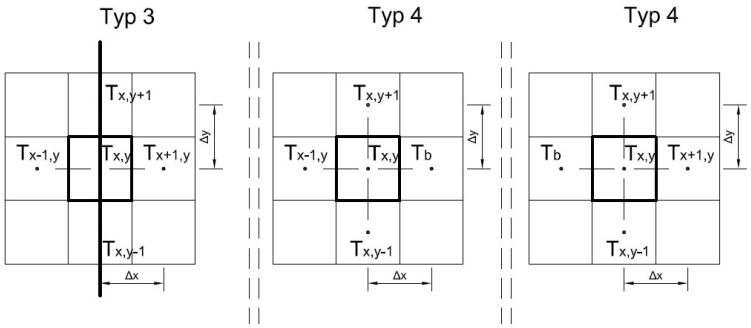



Rys. 2. Przegroda z zaznaczonymi warunkami brzegowymi

Fig. 2. The wall with the indication of boundary conditions

Tabela 1. Równania temperatury na końcu kroku czasowego

Table 1. The temperature's equations at the end of the time step

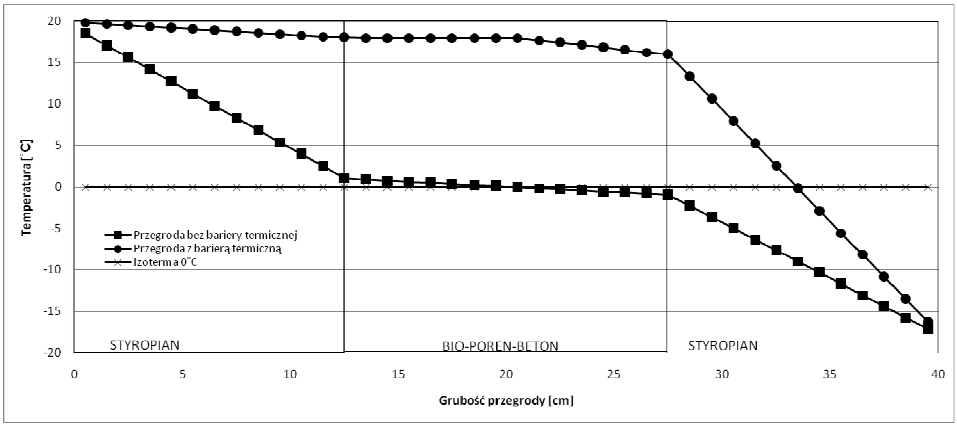
| Typ | Temperatura w komórce bilansowej na końcu kroku czasowego |
|---|---|
| 1 | $T^{+}_{x,y} = T_{x,y} + \frac{1}{\rho_s \cdot c_s} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \left[ \frac{d}{R_{si} + \frac{d}{2\lambda_s}} \left( T_i - T_{x,y} \right) + \lambda_s \left( T_{x+1,y} + T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 3T_{x,y} \right) \right]$<br>$T^{+}_{x,y} = T_{x,y} + \frac{1}{\rho_s \cdot c_s} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \left[ \frac{d}{R_{se} + \frac{d}{2\lambda_s}} \left( T_e - T_{x,y} \right) + \lambda_s \left( T_{x-1,y} + T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 3T_{x,y} \right) \right]$ |
| 2 | $T^{+}_{x,y} = T_{x,y} + \frac{\lambda_s}{\rho_s \cdot c_s} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \left( T_{x-1,y} + T_{x+1,y} + T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 4T_{x,y} \right)$<br>$T^{+}_{x,y} = T_{x,y} + \frac{\lambda_b}{\rho_b \cdot c_b} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \left( T_{x-1,y} + T_{x+1,y} + T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 4T_{x,y} \right)$ |
| 3 | $T^{+}_{x,y} = T_{x,y} + \frac{2}{\rho_s \cdot c_s + \rho_b \cdot c_b} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \left[ \lambda_s \left( T_{x-1,y} - T_{x,y} \right) + \lambda_b \left( T_{x+1,y} - T_{x,y} \right) + \frac{\lambda_s + \lambda_b}{2} \left( T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 2T_{x,y} \right) \right]$<br>$T^{+}_{x,y} = T_{x,y} + \frac{2}{\rho_b \cdot c_b + \rho_s \cdot c_s} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \left[ \lambda_b \left( T_{x-1,y} - T_{x,y} \right) + \lambda_s \left( T_{x+1,y} - T_{x,y} \right) + \frac{\lambda_b + \lambda_s}{2} \left( T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 2T_{x,y} \right) \right]$ |
| 4 | $T^{+}_{x,y} = T_{x,y} + \frac{\lambda_b}{\rho_b \cdot c_b} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \left( T_{x-1,y} + T_b + T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 4T_{x,y} \right)$<br>$T^{+}_{x,y} = T_{x,y} + \frac{\lambda_b}{\rho_b \cdot c_b} \cdot \frac{\Delta\tau}{d^2} \left( T_b + T_{x+1,y} + T_{x,y+1} + T_{x,y-1} - 4T_{x,y} \right)$ |
| |  |
| |  |

Objaśnienia do tabeli 1:
$c_b$ – ciepło właściwe betonu, [J/(kg·K)];
$c_s$ – ciepło właściwe styropianu, [J/(kg·K)];
d – krok przestrzenny, [m];
$T_e$ – temperatura zewnętrzna, [K];
$T_i$ – temperatura wewnętrzna, [K];
$T_b$ – temperatura bariery termicznej, [K];
$T_{x,y}$ – temperatura w węźle o współrzędnych x,y, [K];
$R_{se}$ – opór przejmowania ciepła na zewnętrznej stronie przegrody, [$m^2$·K/W];
$R_{si}$ – opór przejmowania ciepła na wewnętrznej stronie przegrody, [$m^2$·K/W];
$\Delta\tau$ – krok czasowy, [s];
$\lambda_s$ – współczynnik przewodzenia ciepła styropianu, [W/(m·K)];
$\lambda_b$ – współczynnik przewodzenia ciepła betonu, [W/(m·K)];
$T^{+}_{x,y}$ – temperatura w węźle na końcu kroku czasowego, [K].

## 3. Uzyskane rezultaty

### 3.1. Pola temperatur dla warunków obliczeniowych

Wyniki obliczeń przedstawiono na wykresie (rys. 3). Dla rozwiązania z barierą termiczną izoterma 0°C wystąpiła w warstwie izolacji, natomiast w przypadku tradycyjnej przegrody w warstwie konstrukcyjnej ściany.




Rys. 3. Rozkład temperatur w przegrodzie

Fig. 3. The graph of the thermal gradient in the wall

### 3.2. Wyniki obliczeń dla średnich miesięcznych temperatur zewnętrznych

W tabeli 2 zestawiono różnice temperatur powietrza wewnętrznego oraz temperatury na powierzchni przegrody pomieszczenia w zależności od analizowanego miesiąca. Dodatkowo przedstawiono średnie miesięczne temperatury

Tabela 2. Zestawienie temperatur przyjętych do obliczeń spadku temperatury na powierzchni przegrody i uzyskanych rezultatów

Table 2. The summary of temperature taken for the calculations of the temperature fall on the surface and obtained results

| Miesiąc | Średnia temperatura zewnętrzna $T_{m,e}$ [˚C] | Temperatura wewnętrzna $T_{int}$ [˚C] | Różnica temperatur po stronie wewnętrznej przegrody | |
|---|---|---|---|---|
| | | | Bez bariery termicznej ΔT [˚C] | Z barierą termiczną ΔT [˚C] |
| 1 | 0,2 | 20,0 | 0,92 | 0,74 |
| 2 | -1,8 | 20,0 | 0,97 | 0,81 |
| 3 | 2,7 | 20,0 | 0,85 | 0,64 |
| 4 | 8,3 | 20,0 | 0,69 | 0,44 |
| 5 | 13,0 | 20,0 | 0,55 | 0,26 |
| 6 | 16,8 | 24,0 | 0,63 | 0,27 |
| 7 | 18,3 | 24,0 | 0,59 | 0,21 |
| 8 | 18,4 | 24,0 | 0,58 | 0,21 |
| 9 | 13,5 | 20,0 | 0,54 | 0,24 |
| 10 | 7,0 | 20,0 | 0,72 | 0,48 |
| 11 | 2,2 | 20,0 | 0,86 | 0,66 |
| 12 | -0,1 | 20,0 | 0,93 | 0,75 |

zewnętrzne oraz przyjęte temperatury wewnętrzne niezbędne do wykonania obliczeń. We wszystkich miesiącach spadek temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody był mniejszy dla konstrukcji z barierą termiczną w porównaniu do konstrukcji bez niej.

## 4. Wnioski

Dla warunków obliczeniowych stwierdzono, że ściana zewnętrzna z barierą termiczną o temperaturze 18°C powoduje przesunięcie izotermy 0°C w kierunku środowiska zewnętrznego. Temperatura na powierzchni przegrody w pomieszczeniu jest mniejsza o 0,2°C od temperatury wewnętrznej, natomiast dla przypadku bez bariery termicznej różnica wspomnianych temperatur wynosi 1,5°C.

W przypadku obliczeń wariantowych zależnych od analizowanego miesiąca również zaobserwowano zmniejszenie różnic temperatur po stronie wewnętrznej przegrody dla konstrukcji z barierą termiczną. Największe odchyłki pomiędzy typami przegród zanotowano w miesiącach letnich, wiąże się to z temperaturą bariery termicznej, co w konsekwencji powoduje równomierny rozkład temperatury wewnątrz przegrody.

Zatem dla rozwiązania z barierą termiczną efekt wychłodzonej ściany jest mniejszy niż bez niej, co zmniejsza również ryzyko wystąpienia wykroplenia wilgoci w przegrodzie.

Przedstawiony w niniejszym referacie model obliczeniowy został przygotowany pod kątem dalszych prac i modelowania numerycznego pól temperatur

w przegrodach budynku w warunkach roku porównawczego. Planuje się dokładniejsze modelowanie bariery termicznej (układ rurek grzejnych) oraz stworzenie modelu obudowy pomieszczenia do analizy wpływu pojemności cieplnej przegród na rozwiązanie instalacji ogrzewania i wentylacji.

## Literatura

[1] Nagórski Z.: Modelowanie przepływu ciepła metodą KM3R: MBE + Excel = KM3R, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2014.

[2] Szargut J.: Modelowanie numeryczne pól temperatury, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 1992.

[3] Koczyk H.: Ogrzewnictwo: podstawy projektowania cieplnego i termomodernizacji budynków, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.

[4] http://www.isomax.com.pl {dostęp 14.05.2016 r.}.

[5] http://mib.gov.pl {dostęp 14.05.2016 r.}.

[6] Leciej-Pirczewska D.: Przykłady rozwiązań konstrukcji budynków w aspekcie OZE. Przegroda zewnętrzna z barierą termiczną, Budownictwo energooszczędne w Polsce – stan i perspektywy, Bydgoszcz 2015, pp. 205-216.

## THE IMPACT OF THE SOLUTION FOR THE SOLAR WALL ON THE COURSE OF THE TEMPERATURE IN THE WALL

**S u m m a r y**

The paper shows the distribution of thermal gradient in the external walls with the thermal barrier and without the thermal barrier. The walls construction are made with the concrete and the polystyrene on the both sides. The thermal barrier are the polipropylene tubes filled by the low temperature medium. The calculations are prepared for two variants. One of them used the external temperature equals -18°C (the II climatic zone), the internal temperature in a room equals 20°C and the temperature of the thermal barrier equals to 18°C. The second used the internal temperature in a room equals 24°C (in summer), 20°C (in others months) and the mean monthly temperature. For the purpose to simulate the heat transfer in the wall are used one of the numerical methods, by elemental balances, which is based on a division of the element into sub-areas and determining the temperature at the end of the time step. To support the calculations it was prepared the spreadsheet in MS Excel , for which calculations were performed iteratively with a time step equal to 5 s for both walls. The results obtained are presented in the form of a thermal gradient. The isotherm 0°C was displaced towards to the external environment and the higher temperature at the surface of the wall in the room for the solutions with the thermal barrier compared to the classical variant. These factors affect the reduction of the risk of condensation inside constructions and feeling that the temperature falls near the external walls.

**Keywords:** thermal barrier, elemental balances, numerical technique, thermal gradient

DOI:10.7862/rb.2016.207

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 255-262

**Michał MARCHACZ**[1]
**Antonina ŻABA**[2]

# PILOTAŻOWE BADANIA AKUSTYCZNE ZABYTKOWYCH KOŚCIOŁÓW DREWNIANYCH NA TERENIE GÓRNEGO ŚLĄSKA

Praca przedstawia badania akustyczne wybranych zabytkowych kościołów drewnianych będących częścią materialnego dziedzictwa kulturowego. Rozpatrywane obiekty przynależą do obszarów województwa śląskiego i opolskiego. Ich umiejscowienie powiązane jest z dwoma górnośląskimi szlakami architektury drewnianej. Zawarte w obrębie szlaków obiekty stanowiące zabytki architektury drewnianej to nie tylko kościoły ale również chałupy, dzwonnice, kaplice, karczmy, leśniczówki, młyn wodny, skanseny, spichlerze. Rozpatrywane w artykule obiekty to kościół świętej Barbary w Strzelcach Opolskich, kościół Narodzenia Najświętszej Maryi Panny w Szałszy oraz kościół świętego Jerzego w Ostropie. Pomiary akustyczne wnętrz zostały zrealizowane w ramach szerszego cyklu prac dotyczących zagadnień związanych z eksploatacją i utrzymaniem obiektów o charakterze zabytkowym. Opracowanie zawiera, we wstępie, zarys historyczny przedstawianych obiektów wraz z krótką informacją o ich budowie. W dalszej kolejności przedstawiona została metodyka pomiarowa związana z wyznaczeniem czasu pogłosu wnętrz rozpatrywanych obiektów jako podstawowego parametru akustycznego charakteryzującego dane wnętrza. Zgodnie z wytycznymi normowymi przeprowadzono szereg pomiarów czasu pogłosu. Pomiary te były podstawą do opracowania charakterystyk czasu pogłosu w funkcji częstotliwości oraz wartości uśrednionych czasu pogłosu dla poszczególnych punktów pomiarowych dla każdego z wnętrz w omawianych obiektach. Przedstawione charakterystyki czasu pogłosu w funkcji częstotliwości oraz wartości uśrednione stanowiły punkt wyjścia do dalszej oceny badanych wnętrz pod kątem ich jakości akustycznej. W podsumowaniu pracy zawarto omówienie wybranych kryteriów oceny akustycznej wnętrz opracowanych na podstawie wyników pomiarów.

**Słowa kluczowe:** akustyka wnętrz, czas pogłosu, badania czasu pogłosu, zabytkowa architektura drewniana

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Michał Marchacz, Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice; tel. 322371567; michal.marchacz@polsl.pl

[2] Antonina Żaba, Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice; tel. 322371567; antonina.zaba@polsl.pl

## 1. Wprowadzenie

Zabytkowa architektura drewniana na terenie Górnego Śląska stanowi jeden z ciekawszych zbiorów obiektów zabytkowych stanowiących istotną część dziedzictwa kulturowego i historycznego tego regionu. Rozpatrywane obiekty rozmieszczone są przy obecnym stanie podziału administracyjnego w obrębie województwa śląskiego i opolskiego. Objęte są działaniami o charakterze popularyzatorskim, którego przejawem jest funkcjonowanie drogowych szlaków architektury drewnianej w województwie śląskim i opolskim. Oficjalne nazwy szlaków to Szlak Architektury Drewnianej województwa śląskiego i Szlak Drewnianych Kościołów Opolszczyzny.

Zabytkowe obiekty mają zróżnicowany charakter. Wszystkie są obiektami wpisanymi do Rejestru Zabytków, a więc są to obiekty, które mają znaczenie dla dziedzictwa, nie tylko regionu, ale też kraju. Zaletą szlaków jest ich różnorodność. Napotkać tam można nie tylko kościoły ale również chałupy, dzwonnice, kaplice, karczmy, leśniczówki, młyn wodny, skanseny, spichlerze i inne [1]. Cały obszar, na którym rozproszone są poszczególne obiekty w sumie stanowi wielokilometrowe wyzwanie dla osób zainteresowanych odkrywaniem i obcowaniem z historią w takiej formie [2].

W ramach działań prowadzonych przez Katedrę Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli na Wydziale Budownictwa Politechniki Śląskiej prowadzone są liczne prace związane z szeroko rozumianą eksploatacją i utrzymaniem obiektów budowlanych w tym również zabytkowych. Stan techniczny omawianych obiektów Szlaku Architektury Drewnianej lub ich części jest często bardzo zróżnicowany. Istnieje potrzeba nie tylko działań doraźnych mających na celu zachowanie fizycznej substancji obiektów ale również szeregu prac związanych z prowadzeniem opisu stanu technicznego i estetycznego tych obiektów. Prace dotyczą inwentaryzacji obiektów, określenia stanu elementów konstrukcji, wystroju i wyposażenia, określenia parametrów fizykalnych, w tym rozkładu zmian temperatury i wilgotności oraz rozpoznania podstawowych parametrów akustycznych rozpatrywanych obiektów. Działania takie były i są przeprowadzane m.in. w kościołach w Ostropie i Sierotach [3; 4]. Podjęty, pilotażowy program przedstawionych powyżej działań stopniowo ma obejmować kolejne obiekty będące częścią historycznego dziedzictwa Śląska.

Artykuł obejmuje swym zakresem opis działań podjętych celem określenia parametrów akustycznych wnętrz trzech wybranych zabytkowych kościołów drewnianych. Podstawowe informacje o tych obiektach w tym o ich lokalizacji, pełnionej funkcji, obecnym statusie i sposobie użytkowania, zależnościach geometrycznych, danych materiałowych oraz informacje o konstrukcji, zestawiono w tab. 1. Zgromadzone w niej dane są wynikiem przestudiowania opracowań [5; 6; 7; 8; 9; 10] i wizji lokalnych przeprowadzonych w badanych zabytkach. Rys. 1 przedstawia zdjęcia badanych wnętrz wraz z rozmieszczoną w nich aparaturą badawczą.

## 2. Metodyka prowadzonych pomiarów i obliczeń

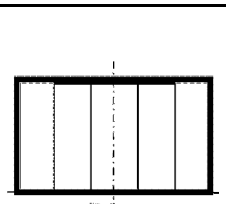
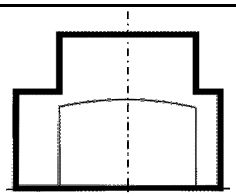
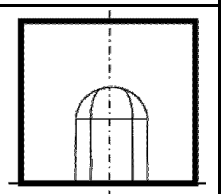
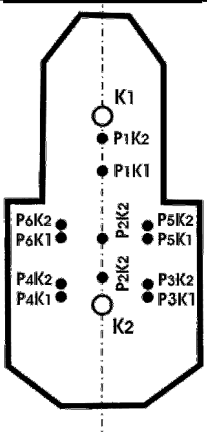
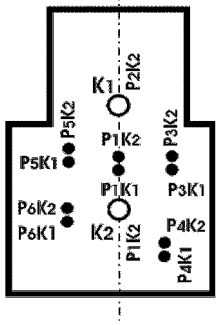
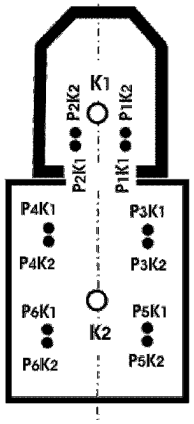
Pomiary akustyczne wraz z wizją lokalną przeprowadzono w kolejności we wszystkich przedstawionych powyżej obiektach (odpowiednio 10.07.2015 r., 11.07.2015 r. oraz 9.05.2015 r.). Badania prowadzono w oparciu o ustalenia i wytyczne zawarte w normie [11]. Zastosowano metodę szumu przerywanego. Zestaw pomiarowy składał się z kuli głośnikowej o dookolnej charakterystyce propagacji dźwięku wraz z generatorem oraz zestawu odbiorczego w postaci miernika poziomu dźwięku Svan 958 wraz z osprzętem. Źródło dźwięku wytwarzało poziom ciśnienia akustycznego wystarczający do tego, aby krzywa zaniku rozpoczynała się przynajmniej 35 dB powyżej tła akustycznego w odpowiednim zakresie częstotliwości. W opisywanych badaniach źródło dźwięku umiejscowiono dla kolejnych obiektów w dwu różnych miejscach. Pierwsze umiejscowienie źródła zlokalizowane było w prezbiteriach, przed ołtarzem. Drugie umiejscowienie było przewidziane w nawie głównej. Dla każdego umiejscowienia źródła dźwięku przyjęto po 6 zróżnicowanych umiejscowień mikrofonów pomiarowych jako punktów odbiorczych. W każdym z niezależnych punktów pomiarowych wykonano po 6 powtórzeń pomiarów celem zminimalizowania wpływu losowości sygnału pobudzającego. Schematy pomieszczeń wraz ze sposobem ustawienia źródła dźwięku i mikrofonów pokazano na szkicach zamieszczonych w tab. 1. Oznaczenia od P1K1 do P6K1 obrazują umiejscowienie kolejnych punktów pomiarowych dla pierwszego ustawienia źródła dźwięku natomiast P1K2 do P6K2 dla drugiego ustawienia. Zarówno umiejscowienie źródeł dźwięku jak i punktów pomiarowych spełniało minimalne wytyczne normowe co do odległości od powierzchni odbijających i odległości punktów pomiarowych w stosunku do źródła dźwięku. Na podstawie uzyskanych wyników pomiarów dokonano wyznaczenia czasów pogłosu T20. Zmierzone krzywe zaniku dźwięku oceniano w zakresie od 5 dB do 25 dB poniżej ustalonego poziomu dźwięku. Wyniki w postaci charakterystyk częstotliwościowych czasu pogłosu przedstawiono w opracowaniu w formie graficznej.

## 3. Wyniki pomiarów i podsumowanie

Porównanie uśrednionych czasów pogłosów trzech zbadanych pomieszczeń w funkcji częstotliwości zobrazowano na rys. 2. Poniższe wartości uzyskano w wyniku uśrednienia zmierzonych czasów pogłosów w poszczególnych punktach pomiarowych dla kolejnych pomiarów w punkcie i kolejnych ustawień kuli głośnikowej. Ponadto na wykres naniesiono obszar przyjmowanego zakresu tolerancji dla czasów pogłosu w funkcji częstotliwości. W artykule przywołano niektóre z wyznaczonych na podstawie badań czasu pogłosu cech obrazujących szerzej charakter akustyczny rozpatrywanych wnętrz. Wskaźnik zrozumiałości mowy STI wyznaczono w oparciu o [12], pozostałe na podstawie [13].

Tabela 1. Zestawienie podstawowych informacji o rozpatrywanych obiektach

Table 1. Sheet of bases information about considering objects

| Lokalizacja kościoła | | Strzelce Opolskie | Szałsza | Ostropa |
|---|---|---|---|---|
| | | woj. opolskie | woj. śląskie | woj. śląskie |
| Wezwanie | | św. Barbary | Narodzenia NMP | św. Jerzego |
| Funkcja | | cmentarny | filialny | filialny |
| Użytkowany | | tak | tak | nie |
| Data powstania w obecnym kształcie | | XVII w. | XV w. odbudowa w XX w. | XVII w. |
| Schematy wnętrz | przekrój poprzeczny przez nawę |  |  |  |
| | rzut |  |  |  |
| Prezbiterium | materiał | drewno | drewno | cegła |
| | konstr. ścian | zrąb szalowany | zrąb | mur ceglany z przyporami |
| | przekrycie | strop płaski | drewniane sklepienie pozorne kolebka odcinkowa | sklepienie ceglane kolebka pełna klasztorne z lunetami |
| | posadzka | drewniana | drewniana | kamienna |
| | długość [m] | 6,5 | 6 | 6,2 |
| | szerokość [m] | 5,7 | 5,5 | 5 |
| | wysokość [m] | 5.3 | 4,1 (max) | 6,7 (max) |
| Nawa | drewno | drewno | drewno | drewno |
| | konstr. ścian | zrąb szalowany | zrąb | zrąb |
| | przekrycie | strop płaski | strop z zaskrzynieniami | strop płaski |
| | posadzka | drewniana | drewniana | kamienna |
| | długość [m] | 9,7 | 7,8 | 9,9 |
| | szerokość [m] | 9,2 | 9 | 9,4 |
| | wysokość h1 [m] | 5,4 | 7 | 7,65 |
| | wysokość h2 [m] | ---- | 4,4 | ---- |
| Kubatura wnętrza [$m^3$] | | 612 | 550 | 975 |



a)



b)



c)



d)



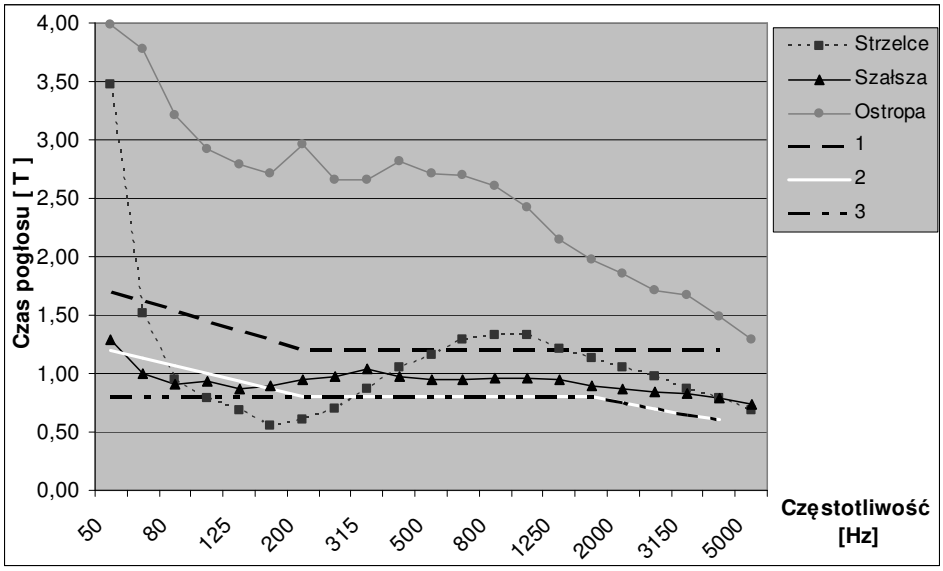
e)



f)

Rys. 1. Wnętrza badanych kościołów: św. Barbary w Strzelcach Opolskich (a, b); Narodzenia NMP w Szałszy (c, d) i św. Jerzego w Ostropie (e, f)

Fig. 1. Interiors of investigating churches: Saint Barbara's in Strzelce Opolskie (a, b); Birth Blessed Virgin Mary's in Szałsza (c, d) and Saint George's in Ostropa (e, f)




Rys. 2. Uśrednione wartości czasów pogłosu w funkcji częstotliwości dla rozpatrywanych obiektów. 1 do 2 – obszar tolerancji czasów pogłosu dla dźwięku muzycznego, 1 do 3 – obszar tolerancji czasów pogłosu dla słowa mówionego

Fig. 2. Average values of reverberation times as a frequency function for considering churches. 1 to 2 – area of reverberation's time tolerance for musical sound. 1 to 3 – area of reverberation's time tolerance for verbalized sound

Średni czas pogłosu dla badanych pomieszczeń kształtował się dla kościoła w Strzelcach Opolskich na poziomie 1,09 s, dla kościoła w Szałszy 0,93 s oraz 2,55 s dla kościoła w Ostropie. Przebieg wartości czasów pogłosu w funkcji częstotliwości dla kościoła w Ostropie wydaje się być dość charakterystyczny dla pomieszczeń o stosunkowo pustym wnętrzu, podobnym kształcie, kubaturze. Obecnie wykonany pomiar różni się tylko nieznacznie od przeprowadzonego w 2008 roku jeśli chodzi o średnie wartości czasu pogłosu. Inny jest jednak przebieg krzywej czasów pogłosu dla częstotliwości niskich. W wyniku działań konserwatorskich w stosunku do warunków pomiarowych z 2008 roku zmieniony został sufit przykrywający nawę główną, a także odnowiono powierzchnie ołtarza w prezbiterium. Długi czas pogłosu ulegnie skróceniu w związku ze stopniowym zapełnianiem wnętrza elementami wyposażenia wraz z przywracaniem normalnej funkcji użytkowej kościoła.

Najbardziej równomierny rozkład czasu pogłosu można zaobserwować dla krzywej reprezentującej kościół w Szałszy. Płaski przebieg tej krzywej dla niskich i średnich częstotliwości owocuje tzw. stosunkiem basów na poziomie 0,97, co przekładać się może pozytywnie na cechę określaną jako ciepło brzmienia. Ze względu na charakter wnętrza (użytkowany kościół) krótki, średni czas pogłosu nie do końca predestynuje to wnętrze do odbioru muzyki (w tym

liturgicznej organowej – kościół wyposażony jest w działające organy). W zakresie niskich częstotliwości czas pogłosu nieco wykracza poza przyjęte optimum.

Z drugiej strony może to oznaczać dobre warunki do odbioru słowa mówionego. Wstępnie określony wskaźnik zrozumiałości mowy dla tego wnętrza przyjmuje wartość około 0,66. Przekłada się to w ogólnej klasyfikacji na ocenę dobry z zakresu od zły do doskonały. Cecha określana jako klarowność kształtuje się dość równomiernie dla całego rozpatrywanego zakresu częstotliwości i przyjmuje wartości z zakresu 3-4 dB. Wskazuje to na dobrą dla takiego wnętrza rozróżnialność dźwięków i ich pochodzenia.

Krzywa obrazująca uśrednione wartości czasu pogłosu dla wnętrza kościoła w Strzelcach Opolskich przyjmuje dość ciekawy układ. Zastanawiające jest znaczne obniżenie czasów pogłosu dla częstotliwości pomiędzy około 125 a 315 Hz. Uzyskane wyniki są znacznie niższe niż dla częstotliwości średnich. Taki przebieg krzywej skutkuje znacznie obniżonym stosunkiem basów (0,55). Jednocześnie klarowność dla zakresu niskich częstotliwości jest duża. Średnio cecha ta przyjmuje wartość około 3,8 dB. Jest to wynik podobny do uzyskanego w kościele w Szałszy.

Przeprowadzone do tej pory badania wskazują na celowość dalszych działań mających na celu zobrazowanie szeregu parametrów fizykalnych w tym związanych z akustyką dla rozpatrywanego zasobu obiektów zabytkowych.

*Opracowano w Politechnice Śląskiej w ramach pracy BKM-504/RB3/2015.*

## Literatura

[1] Ruszczyk G.: Architektura drewniana w Polsce. Muza, Warszawa 2009.

[2] http://www.slaskie.pl/sad/ {dostęp 5.05.2016 r.}.

[3] Kościół św. Jerzego. Ostropa, z serii: Spotkanie z Zabytkiem. Monografia. ISSN 1898-7168; R. (II) 2008, nr 1, Majewski S. (red.), Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice.

[4] Marchacz M. Dulak L.: Badania akustyczne wnętrza zabytkowego kościoła pw. Wszystkich Świętych w Sierotach. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury - Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, t. XXXI, z. 61 (3/II/14), 2014, s. 339-346, DOI:10.7862/rb.2014.100.

[5] Chrzanowski T., Kornecki M.: Sztuka Śląska Opolskiego; Od średniowiecza do końca w. XX. Wydawnictwo Literackie, Kraków 1974, s. 424.

[6] Żaba A. (red.): Projekt Strzelce Opolskie_2014: Kościół cmentarny pw. św. Barbary. Opracowanie studentów specjalności N2_IPB_EOB, Gliwice: Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2014, (opracowanie niepublikowane).

[7] Gadomski S.: Drewniane kościoły województwa śląskiego. Italis, Chorzów 2001, s. 44.

[8] Żaba A. (red.): Projekt Szałsza_2015: Kościół Narodzenia Najświętszej Marii Panny. Opracowanie studentów specjalności S1_CKI_AB, Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015, (opracowanie niepublikowane).

[9] Żaba A. (red.): Projekt Ostropa_2015: Kościół pw. św. Jerzego w Ostropie. Opracowanie studentów specjalności S1_CKI_BA, Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015, (opracowanie niepublikowane).

[10] Żaba A. Restytucja stropu nawy kościoła pw. św. Jerzego w Ostropie i jego polichromii. W: Malowidła kościoła św. Jerzego. Ostropa, z serii: Spotkanie z Zabytkiem. Monografia. ISSN 1898-7168; R. (V) 2011, nr 4, Majewski S. (red.): Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice, s. 113-125.

[11] PN-EN ISO 3382-2:2010 – Akustyka – Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń – Część 2: Czas pogłosu w zwyczajnych pomieszczeniach.

[12] Nowoświat A.: Model logarytmiczny wyznaczania wskaźnika zrozumiałości mowy. W: Materiały z konferencji Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, tom 2, Łódź 2007, s. 215-218.

[13] Springer Handbook of Acoustics: Charter 9, s. 308-310. e-ISBN: 0-387-30425-0.

## PRELIMINARY ACOUSTIC INVESTIGATIONS OF THE WOODEN HISTORIC CHURCHES ON THE UPPER SILESIA AREA

**S u m m a r y**

The paper presents acoustic investigations of selected wooden monumental churches which are part of material cultural heritage. Selected objects belong to areas of Silesian province and Opole province. Their placing are connected with both Upper Silesian wooden architecture routes. Contained in route's area objects it's not only churches but also shanties, belfries, chapels, taverns, forester lodges, water mill, antique building museums, garners. Investigated in paper objects, it is Saint Barbara's church in Strzelce Opolskie, Birth Blessed Virgin Mary's church in Szałsza and Saint George's church in Ostropa. Acoustic measurements of interiors was realized as a part of broader series of works concerning issues connected with operation and maintenance historic objects. The paper contains in introduction historic basic description for presenting object with short information about construction. In the next part was shown measurement methodology linked with reverberation time's determining for interiors of considering objects. Reverberation time is presenting as a main acoustic parameter describing investigated interiors. Based on the standards, a number of acoustic measurements were done. This measurements were a base for evolving of reverberation time's characteristics as function of frequency and average values of reverberation time for each of the measurement points in each of considering interiors. Showed reverberation time characteristics as a function of frequency and average values were a starting point to further evaluation of acoustic quality for considering interiors. In resume of this work showed discussion about selected acoustic criterions of acoustic evaluation for interiors based on measurements results.

**Keywords:** Interior acoustics, reverberation time, measurements of reverberation time, historic wooden architecture

DOI:10.7862/rb.2016.208

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 263-270

**Robert MARCINKOWSKI**[1]

# INTENSYWNA ZABUDOWA A OCHRONA WALORÓW KRAJOBRAZU

Czy za pomocą ustaw da się wymusić dobrą architekturę? Zestawione w tytule dwa pojęcia postrzega się powszechnie jako stojące w opozycji. Ochrona krajobrazu polega bowiem głównie na ograniczeniach stawianych zabudowie, zaś zabudowa intensywna jest pojmowana jako zjawisko wobec niej (ochrony) przeciwstawne. Chciałbym poniżej omówić kilka aspektów architektury, które nie dają się łatwo (a może wcale) wymusić za pomocą formalno-prawnych ograniczeń. Zależy mi na nie traceniu z oka kwestii zasadniczej: jaki jest cel wprowadzania restrykcji? W jaki sposób mogą wpłynąć na jakość życia? Kwestię tę można też ująć następująco: jak mogłaby wyglądać architektura, gdyby jej barierą był (tylko) stan dostępnych technologii budowlanych? Postawienie sprawy w ten sposób nie daje doraźnych łatwych recept na dobre projektowanie. Jednak uważam je za celowe, gdyż skłania do szerszego widzenia problemu, w sposób łączący podejścia humanistyczne i techniczne. Mimo prowadzonej obecnie ochrony krajobrazu postępuje zanik punktów widokowych. Przynajmniej w tym przypadku jest ona nieskuteczna. Nie istnieje ochrona widoku z okna, mogącego jednak zniweczyć walory skądinąd dobrej architektury. Zabudowa o zwiększonej intensywności niekoniecznie jest dla krajobrazu złem, o ile może stanowić alternatywę dla zaśmiecania terenu wszechobecną zabudową rozproszoną.

**Słowa kluczowe:** intensywność zabudowy, uciążliwość sąsiedztwa, restrykcje prawne, ochrona krajobrazu, walory widokowe

## 1. Wprowadzenie

Czy za pomocą ustaw da się wymusić dobrą architekturę? Tempo i intensywność zmian w prawie budowlanym powodują, że wiara w celowość restrykcji wydaje się zwłaszcza u nas powszechna. Reakcją na niedostatki architektury jest mnożenie aktów prawnych i nowelizacji nakładających budynkom (i ich projektantom) nowe i nowe ograniczenia. Tymczasem stan realizacji wciąż ograniczeniom tym się wymyka. Chciałbym poniżej omówić kilka aspektów architektury, które nie dają się łatwo (a może wcale) ująć za pomocą formalno-prawnych ograniczeń. Stąd zestawienie w tytule dwóch pojęć postrzeganych

[1] Robert Marcinkowski, Politechnika Krakowska, Instytut A-4, Zakład Budownictwa Ogólnego, ul. Warszawska 24; kontakt: 601489044, 126282459, rob500@gazeta.pl

powszechnie jako stojące w opozycji. Ochrona krajobrazu polega bowiem głównie na ograniczeniach stawianych zabudowie, zaś zabudowę intensywną pojmuje się jako zjawisko wobec niej (ochrony) przeciwstawne.

## 2. Uwagi metodologiczne

W klasycznych podejściach zawartych w literaturze [1], [2], [7], [8][2], jakość architektury analizuje się głównie jako jakość obiektów, określając także warunki jakim powinno odpowiadać ich usytuowanie [3]. Natomiast walory widokowe dotyczą często nie tyle budynków co **przerw między nimi.** Za podjęciem tematu przemawiają także poglądy na temat ochrony krajobrazu, spotykane zarówno na konferencjach naukowych jak i w środowisku projektujących architektów, w którym ochronę krajobrazu wiąże się z zakazami i eliminacją zabudowy. Za zasadniczą uważam natomiast kwestię: jaki jest **cel** tej ochrony, oraz wprowadzania ograniczeń? W jaki sposób mogą wpłynąć na jakość życia? Kwestię tę można też (na innej płaszczyźnie) ująć następująco: jak **mogłaby wyglądać** architektura, gdyby jej barierą był (tylko) stan dostępnych technologii budowlanych? Postawienie sprawy w ten sposób nie daje doraźnych łatwych recept na dobre projektowanie. Jednak (najbardziej w dydaktyce akademickiej) uważam je za celowe, gdyż skłania do szerszego widzenia problemu, w sposób łączący podejścia humanistyczne i techniczne.

## 3. Ochrona krajobrazu a zagłada walorów widokowych

Jeszcze niedawno położenie punktów widokowych w terenie było na tyle trwałe, że oznaczano je na mapach turystycznych (np. w znanych mi okolicach Krakowa [6]). Powstawanie nowych obiektów rzecz jasna ingeruje w sylwetę miasta (w Krakowie dominuje od dawna kontrast Wawelu z Elektrociepłownią Łęg widoczny z Kopca Kościuszki, rys. 1.), lecz znacznie gorsza jest systematyczna likwidacja miejsc, z których panoramy miasta *można by jeszcze oglądać.* Korony drzew zarastających okolice wymienionego Kopca to w sumie najmniejsze zło, choć i tu „ochrona zieleni" ukazuje swe absurdalne oblicze, likwidując walory widokowe pozornie chronionego terenu. Lecz wierzę, że zadrzewienie da się gabarytowo kontrolować przy odrobinie (chwilowo nieobecnego) rozsądku. Okolice Krakowa wymieniam jednak tylko jako egzemplifikację. Chodzi mi bowiem o postępujący bardzo szybko proces „urbanizacji", czy też „dewelopingu"[3] jak eufemistycznie nazywa się marnowanie walorów terenu.

[2] Wybór jedynie przykładowy, obrazujący zróżnicowanie możliwych podejść do tematu.

[3] „Dewelopingiem" nazywam skrótowo całość niefortunnych interakcji między zleceniodawcą, projektantem i urzędnikiem, których efekt w praktyce nie satysfakcjonuje żadnej ze stron [5].



Rys 1. Kontrasty w panoramie miasta są mniejszym złem, niż zanik miejsc z których miasto to można by jeszcze oglądać

Fig. 1. Contrasts in the panorama of the city is a lesser evil than the disappearance of places from which this city could still be seen

## 4. Zabudowa rozproszona i uciążliwości sąsiedztwa

Natomiast prawdziwą plagą wydają mi się formy zabudowy w których budynki przeszkadzają sobie wzajemnie, pokrywając zarazem cały uprzednio cenny widokowo teren[4]. „Było ładnie, ale ktoś się tu wybudował i nic nie dało się zrobić" – to może najczęstsza lecz i najmniej prawdziwa z możliwych konkluzji. Niezwykle podobne wypowiedzi usłyszeć można od urzędników a nawet samych architektów, co ilustruje sytuację jako patową, ze szkodą dla wszystkich stron. Gdyby jednak faktycznie „się nie dało" klincz taki musiałby panować (a nie panuje) na całym świecie.

Istnieją osiedla, czy też ich fragmenty, gdzie walory widokowe zostały zachowane (np. rys. 2). Chciałbym choćby najkrócej opisać nie poszczególne projekty, ale zasadnicze cechy takiego zespołu. Dzięki starannemu rozmieszczeniu budynków walory widokowe da się bowiem uzyskać nie tylko z okien czy tarasów, lecz i z ciągów komunikacyjnych osiedla.

- Widok ponad dachem sąsiada można uzyskać przy większych spadkach terenu i płaskich dachach budynków. Płaskie dachy kolidują jednak z dążeniem do

[4] Przykłady podkrakowskie to okolice Zelkowa, Wielkiej Wsi, czy Mogilan

„regionalizacji" architektury. Trudny do zaakceptowania w warunkach polskich (przez „przeciętnego" użytkownika) jest dom z parkingiem w poziomie dachu, lub generalnie na wyższej kondygnacji.

- Na terenach o małym spadku możliwe jest wykorzystanie widoku nie w poprzek a wzdłuż drogi, dzięki wyposażeniu budynków w wykusze i przeszklenia narożne. Warto odejść w tym wypadku od jednej dla wszystkich linii zabudowy, co znów natrafia na przeszkodę nie w sferze technologii, lecz bezwładności myślenia.

## 5. Walory widokowe a wymogi „regionalne"

Użyty w cudzysłowie termin oznacza w skrócie komplet zapisów formalnoprawnych dążących do ochrony walorów lokalnej architektury i jej krajobrazowego otoczenia. Ochronę te realizuje się w praktyce poprzez ograniczenie powierzchni terenów przeznaczanych pod zabudowę, ustanowieniu limitów zabudowy za pomocą wskaźników, i wreszcie szczegółowo – przez ograniczenia w zakresie gabarytu i formy obiektów. Właśnie te ostatnie wymagają komentarza (nie tylko w kontekście zabudowy indywidualnej).

Cele ograniczeń stawianych budynkom określa się jako uporządkowanie przestrzenne zespołów mieszkaniowych oraz utrzymanie ciągłości kulturowej przez nawiązanie do regionalnej tradycji. I rzeczywiście następuje uporządkowanie, gdyż budynki zachwaszczające najbardziej wartościowe podmiejskie tereny są do siebie podobne. Pytanie jednak czy ciągłość kulturową regionu da się wymusić zakazami? Prawdziwie twórcze projekty wskazują, że nie.

I kolejne, bardziej istotne. Czy nie następuje wylanie dziecka z kąpielą? Czyli: czy restrykcje mają dodatnie przełożenie na jakość życia? Powierzchowna obserwacja osiedli może istotnie dostarczyć wrażenia pewnego „spokoju i ładu", lecz zarazem wartościowy widokowo teren jako całość jest już niedostępny, ogrodzony i prywatny. Walory widokowe dostępne są więc dla marginalnej ilościowo grupy, głównie mieszkańców przed oknami których z jakichś powodów szczęśliwie nie „wybudował się" następny sąsiad.

Negatywny wpływ na jakość architektury w krajobrazie mają też inne zjawiska. Kontakt architekta z użytkownikiem zanikł (zastąpiony sprzedażą „projektów gotowych"), lub został zredukowany do nieistotnych korekt mieszkań (w inwestycjach deweloperskich).

Tzw. „projekt gotowy" cechuje się zasadniczymi mankamentami:

- Projektant nigdy nie widział terenu na którym budynek ma być postawiony.
- Nie zna ludzi którzy mają w tym domu mieszkać, a więc ich potrzeb, których spełnienie stanowi o jakości zarówno projektu jak i życia przyszłych mieszkańców.

Ma jednak dla nabywcy zasadnicze zalety:

- Jest tani (w wersjach katalogowych rozdawany niekiedy za pół darmo), co sugeruje taniość inwestycji oraz, równie mylnie, nikłą wartość pracy projektantów.

- Łatwiej uzyskać pozwolenie na budowę, gdyż projekt zaaprobowany na danym terenie zmniejsza utrudnienia typu biurokratycznego.

Sytuacja ta powoduje „ujednolicenie" czyli po prostu zubożenie oferty (domów lecz także mieszkań) mimo pozornej różnorodności podaży.

## 6. Jakość życia mierzona „ucieczką z miast"

Wspomniana powyżej jakość życia użytkownika jest jednym z **najmniej istotnych elementów** procesu inwestycyjnego. Jakość ta to pojęcie obrazowe, a jako zjawisko – niełatwo mierzalne. Chciałbym jednak spróbować je skonkretyzować, stawiając pytanie: jakie są przyczyny zjawiska „ucieczki z miast"? lub przekorniej: po co nam ten cały krajobraz? Dom rozumiany jako poprawne technicznie mieszkanie da się przecież zrealizować także w środowisku miejskim, czy wręcz „blokowisku". Podobnie ma się rzecz z funkcjonalnością użytkową. W środowisku miejskim często brakuje nam natomiast:

- Kontaktu wzrokowego z krajobrazem, a najlepiej z choćby niewielkim fragmentem horyzontu. Co ważne, widok ten nie musi być (jak zazwyczaj odruchowo zakładamy) dookolny. Również horyzont nie musi być położony bardzo daleko. W gęstej tkance miejskiej wyobrażam sobie tę sytuację przestrzennie jako zespół zieleni parkowej widoczny z wielu usytuowanych wokół budynków.
- Choćby niewielkiej prywatnej przestrzeni ogrodowej niezagrożonej wglądem sąsiadów.

Dla wielu ludzi, gdyby mogli mieć to w bloku, ucieczka z miasta nie byłaby już potrzebna. Pogląd ten odnoszę zwłaszcza do starszego (mojego) pokolenia, statystycznie mniej widocznego w mediach społecznościowych[5].

## 7. Intensywność zabudowy bez uszczerbku dla zieleni

Intensywność zabudowy nie jest sama w sobie żadnym dobrodziejstwem, co widać na terenach o zabudowie przegęszczonej, generującej dla mieszkańców / użytkowników narastającą uciążliwość wzajemnego sąsiedztwa. Dla naprawy tej sytuacji ustanawia się więc wskaźniki ograniczające gęstość i intensywność nowoprojektowanej zabudowy, oraz nakazujące pozostawienie wolnych od zabudowy powierzchni terenów zieleni miejskiej. Stopniowo w całym środowisku[6] uciera się pogląd, że wskaźniki dla zabudowy i dla terenów zielonych stoją wobec siebie w opozycji, a dyskusje koncentrują się jedynie wokół kwestii jakie wskaźniki uznać za właściwe dla terenów podmiejskich, miejskich etc. Za zaletę i składową jakości życia milcząco uznaje się tym samym niską intensywność

[5] Poglądy te niełatwo ująć statystycznie. Czynią to jednak w pewnej mierze media społecznościowe, podsuwając w wyszukiwarkach poglądy nazwane tu (z oczywistym uproszczeniem) stereotypowymi [9], [10]

[6] Tu: zarówno projektantów, urzędników, jak i twórców prawa budowlanego

zabudowy, a więc umieszczenie mieszkańców **na możliwie rozległym terenie**. Zarazem ubolewamy nad rozproszeniem zabudowy, niosącym innego rodzaju problemy, leżące zwłaszcza w sferze infrastruktury.

Tymczasem samo pojęcie „powierzchni terenu" na naszych oczach staje się anachroniczne[7]. W centrach dużych miast (lecz nie tylko) teren niełatwo sensownie definiować, kiedy np. centra komunikacyjne i handlowe zrastają się w ciągłą strukturę. Zabudowa nie musi więc składać się z osobnych budynków, lecz raczej ze stref funkcjonalnych. Z technicznego punktu widzenia najistotniejsze podziały wynikają w istocie ze stref pożarowych, czy szerzej, z wymagań dotyczących bezpieczeństwa i możliwości ewakuacji.

Zmierzam do pytania postawionego już w innych miejscach[8]: **czy odsetek terenów zielonych mógłby przekroczyć sto procent?** Jeśli budynki miałyby tylko stać obok siebie na powierzchni terenu jest to niemożliwe. Lecz powierzchnie zielone mogą przy obecnym stanie technologii **biec pionowo, a także wkraczać do wnętrz.**



Rys. 2. Zwarta zabudowa w krajobrazie otwartym. Jezioro Rożnowskie i zespół zabudowy apartamentowej w Gródku nad Dunajcem

Fig. 2. The dense building in the open landscape. Roznow Lake and the complex of apartamental buildings. Gródek nad Dunajcem, Poland

[7] To „odkrycie" bynajmniej nie nowe. Nawet w moim skromnym dorobku pierwsza publikacja na ten temat liczy dwadzieścia lat [4]

[8] Jako wykład – na studiach podyplomowych WAPK. Pisemnie – w „Deweloping" jako czynnik degradacji miasta" [5]. W tamtej konferencji dominowały jednak wątki socjologiczne

I druga kwestia wynikająca pośrednio z pierwszej: czy przy podobnie wysokim wskaźniku powierzchni zielonych nie jest do pomyślenia również **stuprocentowa gęstość zabudowy?**

Wreszcie kwestia najważniejsza, wiążąca powyższe rozważania ze sferą techniki. Otóż możliwy jest powszechny dostęp do domów / apartamentów o podobnych walorach przy istniejących już technologiach. Mam na myśli głównie takie oddzielenie od siebie sąsiadów, które zredukowałoby wzajemną uciążliwość. Zwarty zespół zabudowy przedstawiony przykładowo na rys. 2 zachowuje zarówno kontakt apartamentów z otwartym krajobrazem jak i prywatność tarasów. Zaznaczam, że poniższe uwagi nie odnoszą się jednak do wymienionego konkretnego obiektu, ale do zagadnień ogólniejszych:

- Zwrócenie wielu tarasów w tę samą stronę powoduje, że w wyglądzie budynku dominują formy „prostopadłościenne". Natomiast w postulowanym przeze mnie „bloku idealnym" widoczne elementy ścian i balustrad zostałyby przynajmniej częściowo przesłonięte przez miniaturowe ogrody umożliwiające mieszkańcom hodowlę roślin.
- Elewacja budynku mogłaby w percepcji przeciętnego obserwatora zniknąć. W istocie stanowiłyby ją jedynie powierzchnie przeszkleń skryte za (indywidualnie regulującą zacienienie) roślinnością. Technicznie a nawet ekonomicznie jest to całkowicie realne.
- Natomiast marzeniem mniej realnym jest „odchwaszczenie" sąsiednich połaci terenu, czy też podobne „ukrycie i zamaskowanie" rozproszonej na nim zabudowy.

## 8. Podsumowanie

- Mimo prowadzonej obecnie ochrony krajobrazu postępuje zanik punktów widokowych. Przynajmniej w tym przypadku ochrona jest nieskuteczna.
- Widok z okna to trudny do ochronienia czynnik, mogący jednak zniweczyć walory skądinąd dobrej architektury.
- Zabudowa o zwiększonej intensywności niekoniecznie musi być dla krajobrazu złem, o ile stanowi alternatywę dla zaśmiecania terenu (wszechobecną w Polsce) zabudową rozproszoną.
- Krajobraz można chronić przez różne formy działania, także nie wynikające wprost z wymogów prawa budowlanego.
- Oprócz alternatywy „pozwolić-zabronić" istnieją inne możliwe podejścia („zamaskowac-zasłonić") do form dysonansowych zarówno względem krajobrazu jak i urbanistycznego sąsiedztwa.

## Literatura

[1] Bogdanowski J., Kompozycja i planowanie w architekturze krajobrazu, Kraków 1976.

[2] Celadyn W., Architektura a systemy roślinne; studium relacji pomiędzy elementami architektonicznymi a roślinnymi, PK, Kraków 1992.

[3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 roku zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać budynki I ich usytuowanie.

[4] Marcinkowski R., Dokąd zmierza architektura XXI stulecia, Kraków, miesięcznik Arkada nr 1/1996.

[5] Marcinkowski R., „Deweloping" jako czynnik degradacji miasta, [w:] Zmiany w przestrzeni współczesnych miast, Uniwersytet Rzeszowski 2016.

[6] Okolice Krakowa, mapa turystyczna, wydawnictwo Compass, Kraków 2006.

[7] Peters P., Rosner R., Małe zespoły mieszkaniowe, Arkady 1983.

[8] Seruga W., Zrównoważone środowisko mieszkaniowe w dydaktyce Katedry Kształtowania Środowiska Mieszkaniowego, Czasopismo Techniczne PK, 2007.

[9] http://wiadomosci.dziennik.pl/wydarzenia/artykuly/401093,mieszkancy-wsi-mlodsi-niz-mieszkancy-miast-kobietya-wsiach-rodza-wiecej-dzieci-ludzie-rzadziej-uciekaja-ze-wsi.html, wrzesień 2016.

[10] http://wiadomosci.onet.pl/kraj/rzeczpospolita-wielka-ucieczka-poza-miasto/md4mb, wrzesień 2016.

## HIGH DENSITY BUILDING VS PROTECTION OF LANDSCAPE

**S u m m a r y**

Can using laws force a good architecture? The two terms compared in the title are widely seen as standing in opposition. Landscape protection means mainly the limitations of the building, and the intensive building is conceived as a phenomenon acting against it. I would like to discuss below some aspects of architecture, which are not easily (or at all) to force through formal and legal constraints. I care for keeping in mind the fundamental question: what is the purpose of introducing restrictions? How can it affect the quality of life? This issue can also be summarized as follows: architecture could look like if the barrier was (only) the state of the available building technologies? Putting the matter in this way does not give immediate easy recipes for good design. However, I consider it expedient, since it leads to a broader view of the problem, a mix of human and technical approach. In spite of the current landscape protection numerous viewpoints still do disappeare. At least in this case, the protection it ineffective. There is no protection of the view from the window, which could, however, wreck the values of the (otherwise good) architecture. Building of increased intensity it is not necessarily a danger for the landscape, as that may be an alternative to cluttering the area by omnipresent dispersed housing.

**Keywords:** building intensity, neighborhood inconvenience, law restrictions, protection of landscape, sightseeing values

DOI:10.7862/rb.2016.209

*Przesłano do redakcji: 30.09.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 271-278

**Przemysław MARKIEWICZ** [1]

# ZINTEGROWANE PROJEKTOWANIE ENERGETYCZNE BUDYNKÓW ENERGOOSZCZĘDNYCH

Projektowanie budynków energooszczędnych staje się powszechną koniecznością, wynikającą ze względów środowiskowych, ekonomicznych i społecznych oraz z obowiązującego prawa.
Na ostateczny poziom zużycia energii końcowej w budynku wpływa wiele wzajemnie uzupełniających się i współzależnych, rozwiązań architektoniczno-budowlanych i instalacyjnych, które powinny być zweryfikowane odpowiednimi analizami i symulacjami wydajności energetycznej na możliwie wczesnym etapie projektowania. Im więcej takich rozwiązań zostanie zastosowanych, tym ostateczne parametry energetyczne budynku będą lepsze. Projektowanie budynków energooszczędnych wymaga w związku z tym reorganizacji procesu projektowego w kierunku tzw. Z*intergrowanego Projektowania Energetycznego*. Wiąże się to z koniecznością zastosowania odpowiednich narzędzi wspomagających projektowanie i przesunięcia głównego ciężaru decyzji projektowych na jak najwcześniejszy etap prac. Te narzędzia to oprogramowanie w standardzie BIM, powiązane z programami umożliwiającymi przeprowadzenie dla wirtualnego modelu budynku szeregu symulacji jego wydajności energetycznej.

**Słowa kluczowe:** modelowanie informacji o budynku, model energetyczny budynku, analizy wydajności energetycznej, zużycie energii końcowej

## 1. Wprowadzenie

Projektowanie budynków w standardzie energooszczędnym już wkrótce nie będzie ekskluzywną alternatywą dla znacznie mniej wymagających budynków normatywnych, lecz powszechną koniecznością, wynikającą ze względów środowiskowych, ekonomicznych i społecznych oraz z obowiązującego prawa.

Projektowanie budynków energooszczędnych jest trudne, gdyż są to budynki zaawansowane technicznie, wymagające przemyślanego powiązania rozwiązań architektonicznych i architektoniczno-budowlanych z rozwiązaniami

[1] Przemysław Markiewicz, Politechnika Krakowska, Wydział Architektury, Instytut Projektowania Budowlanego A-4, Katedra Budownictwa Ogólnego i Materiałów Budowlanych A-41, ul. Podchorążych 1, 30-084 Kraków; tel. 601-414-240; markiewiczprzem@gmail.com

instalacyjnymi oraz przeprowadzenia szczegółowych symulacji i obliczeń ich efektywności energetycznej. Praktycznie wszystkie rozwiązania projektowe, rekomendowane dla budynków energooszczędnych różnią się znacznie od dotychczasowych, powszechnie stosowanych rozwiązań standardowych. Zdeterminowane nadrzędnym problemem energooszczędności zmieniają się zasady kształtowania otoczenia, bryły budynku i układu funkcjonalnego, a zestaw energooszczędnych komponentów architektoniczno-budowlanych, z których składa się budynek, staje się w dużym stopniu współzależny od przyjętych rozwiązań instalacyjnych.

Projektowanie budynków energooszczędnych wymaga reorganizacji procesu projektowego w kierunku tzw. *Zintegrowanego Projektowania Energetycznego* [1], w którym szczególnie ważna jest wczesna faza projektowania oraz wprowadzenie odpowiednich narzędzi wspomagających projektowanie w postaci specjalistycznego oprogramowania komputerowego.

Zasady i standardy zintegrowanego projektowania energetycznego, wdrażane są już m.in. w Austrii, Francji, Wielkiej Brytanii i w Niemczech [2] a przez nieuchronną konieczność radykalnego zwiększenia efektywności energetycznej w sektorze budownictwa, wkrótce staną się powszechną europejską normą.

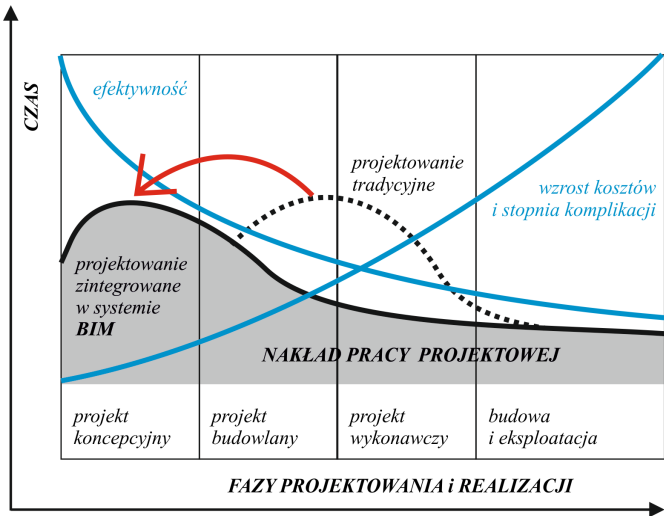
## 2. Opis procedury badawczej

### 2.1. Modelowanie informacji o budynku - BIM

BIM (*ang. Building Information Modeling*) [3] to w dosłownym przekładzie „*modelowanie informacji o budynku*", co oznacza tworzenie, przy pomocy odpowiedniego oprogramowania, ogromnej bazy danych, dokładnie definiującej każdą część budynku (konstrukcję, materiały i ich właściwości, wyposażenie, itp.) i uporządkowanej w trójwymiarowej przestrzeni w postaci wirtualnego modelu 3D. Projekt w standardzie BIM powstaje przy użyciu trójwymiarowych obiektów, takich jak ściany, stropy, dachy, sufity, okna, drzwi, itd., którym, poza wymiarami geometrycznymi, nadawane są odpowiednie parametry (właściwości fizyczne, techniczne, itp.). Integracja informacji w ramach jednej bazy danych umożliwia automatyczną identyfikację wprowadzanych zmian i rozpoznanie ewentualnych kolizji.

Zaprojektowanie budynku jako wirtualnego modelu przestrzennego, w którym wprowadzone są wszystkie parametry rzeczywistego obiektu, takie jak np. warstwy przegród z określonymi materiałami i ich właściwościami fizycznymi, parametrami technicznymi, cenami, itp. pozwala już na wczesnym etapie projektowania na przeprowadzanie różnego typu analiz i symulacji, zupełnie niedostępnych w tradycyjnych projektach, opracowywanych w programach typu CAD-2D *(ang. Computer Aided Design)* [4], w postaci zestawu płaskich rzutów, przekrojów i elewacji.

Charakterystycznym wyróżnikiem projektowania w programach wspomagających projektowanie w standardzie BIM jest przesunięcie głównego nakładu pracy na wczesne fazy procesu projektowego (etap koncepcji), dzięki czemu możliwości wpływania na efektywność są największe, przy najniższych kosztach i najmniejszych trudnościach z tym związanych (rys. 1).




Rys. 1. Porównanie nakładów pracy na różnych etapach projektowania w systemie BIM i CAD-2D

Fig. 1. Comparison of the effort for different phases of designing process in the BIM and CAD-2D

## 2.2. Model energetyczny budynku - BEM

Efektywność energetyczną projektowanego budynku można przetestować już we wczesnej fazie projektowania i na długo przed realizacją i zastosowaniem wszystkich rozwiązań w rzeczywistości, poprzez symulacje określane jako *„modelowanie energetyczne”*. Przeprowadzenie takich symulacji wymaga trójwymiarowego, wirtualnego modelu budynku w standardzie BIM, w którym wszystkie rozwiązania budowlane i instalacyjne są dokładnie sparametryzowane. Kiedy w wirtualnym modelu budynku wprowadzamy dane dotyczące projektowanych temperatur użytkowych, strefowania temperaturowego poszczególnych pomieszczeń, harmonogramów użytkowania, itp. to możemy powiedzieć, że przekształcamy model BIM w tzw. *Model Energetyczny Budynku* BEM (*ang. Building Energy Model*) [5].

W Modelu Energetycznym Budynku BEM możemy badać wpływ na efektywność energetyczną różnych wariantów projektowych [6] Model budynku BEM usytuowany jest w konkretnej lokalizacji geograficznej, dla której wykorzystuje się komplet danych meteorologicznych. Poza ilością energii w rozbiciu

na różne składowe (ogrzewanie, chłodzenie, wentylacja) i różne nośniki energii, można analizować komfort cieplny (PPD, PMV), badać pracę systemów odzysku energii, itp. Przeprowadzanie różnego typu wariantowych analiz i symulacji umożliwia osiągnięcie optymalnej efektywności energetycznej oraz weryfikację i korekty przyjętych rozwiązań.

### 2.3. Zintegrowane Projektowanie Energetyczne - IED

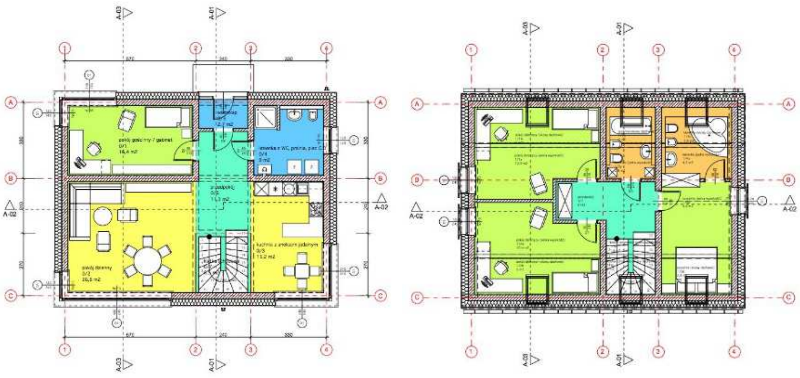
Metodologia i zasady tzw. *Zintegrowanego Projektowania Energetycznego* - IED (ang. *Integrated Energy Design*) stają się standardem nowoczesnego projektowania budynków [7], definiowanym jako:

- proces organizacji prac projektowych z przesunięciem punktu ciężkości na wczesne etapy projektowania, w celu osiągnięcia większej efektywności i zminimalizowania kosztów,
- priorytetowe traktowanie energooszczędnych, zintegrowanych rozwiązań architektonicznych, budowlanych i instalacyjnych,
- ścisła współpraca pomiędzy inwestorem / klientem i przyszłym użytkownikiem a architektem, konsultantami, ekspertami i projektantami branżowymi od samego początku procesu projektowania aż do realizacji.

## 3. Budynek referencyjny

Opracowany przez autora model energooszczędnego budynku referencyjnego to niewielki, jednorodzinny budynek mieszkalny (rys. 2), przewidziany dla potrzeb 4-osobowej rodziny, o łącznej powierzchni użytkowej 171,1 $m^2$.

Budynek ma orientację południową, jest bez podpiwniczenia i posiada użytkowe poddasze podniesione na ściankach kolankowych. W budynku zastosowano rozwiązania architektoniczno-budowlane rekomendowane dla budynków energooszczędnych w standardzie niskoenergetycznym NF40 i pasywnym NF15.



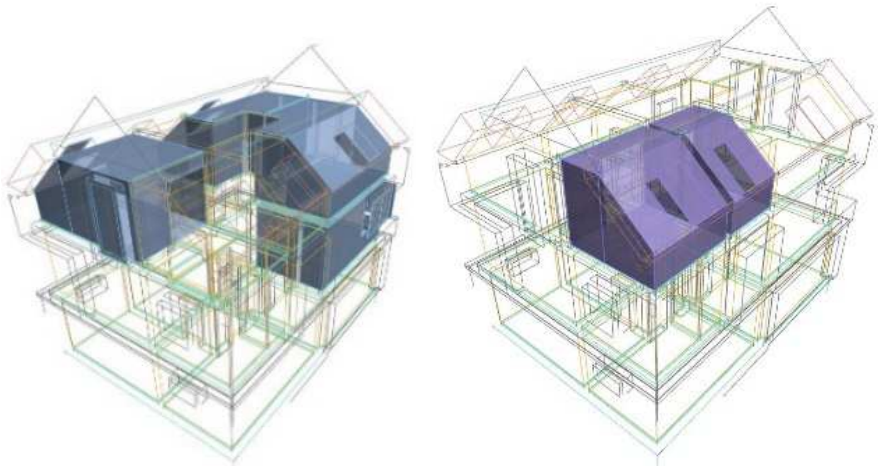
Rys. 2. Program funkcjonalny budynku referencyjnego

Fig. 2. The functional program of the reference building

Model budynku referencyjnego dzięki zastosowaniu BIM zawiera m.in.:

- dokładnie sparametryzowaną konstrukcję obudowy budynku w postaci struktur warstwowych z określonymi materiałami budowlanymi wraz z przypisanymi do nich parametrami fizycznymi,
- otwory z określonymi parametrami stolarki okiennej i drzwiowej,
- ważniejsze elementy wewnętrzne, stanowiące znaczącą masę kumulującą ciepło, zróżnicowane jako ciężkie (struktury betonowe), średnie (struktury murowane), lekkie (struktury szkieletowe),
- przyjęty poziom infiltracji powietrza przez przegrody w godzinnym bilansie energetycznym oraz całkowitego przenikania powietrza (ACH) o wartości 1,0 [l/s,m$^2$].

Analiza geometryczna modelu utworzona została na podstawie tzw. *stref* z określonymi temperaturami użytkowymi, zgrupowanych w tzw. *bloki termiczne*. Po skonfigurowaniu bloków termicznych (rys. 3), wirtualny model architektoniczny BIM zostaje zmieniony w Model Energetyczny Budynku (BEM).



Rys. 3. Bloki termiczne, tworzące użytkową kubaturę budynku referencyjnego

Fig. 3. Thermoblocks, forming a usable volume of the reference building

W projekcie budynku referencyjnego wprowadzono konkretną lokalizację (Kraków) ze ściśle określonymi parametrami środowiska, klimatu i otoczenia.

Do potrzeb oszacowania energetycznego określono ponadto typ instalacji (ogrzewanie, chłodzenie, CWU, wentylacja), źródła energii, profile użytkowania bloków termicznych , itp. parametry mające wpływ na wydajność energetyczną.

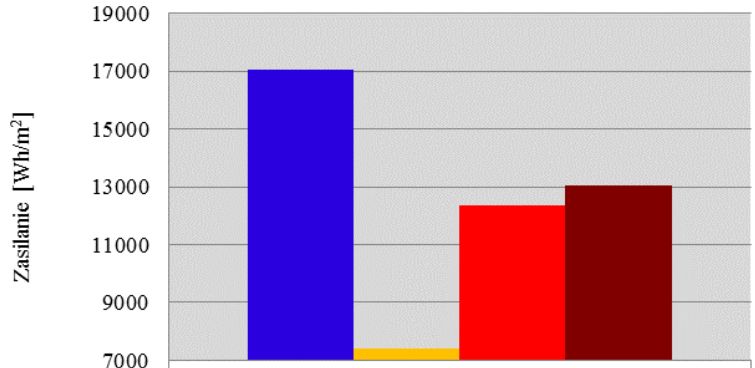
## 4. Analizy wydajności energetycznej i poziomu komfortu

Roczna analiza zużycia energii końcowej dowodzi (rys. 4), że budynek referencyjny jest budynkiem energooszczędnym, charakteryzującym się niskim zużyciem energii na ogrzewanie, na poziomie mieszczącym się pomiędzy wymaganiami stawianymi dla budynków niskoenergetycznych NF40 a dla budynków pasywnych NF15 [8].

Największą ilość energii pozyskiwanej w budynku referencyjnym (rys. 5) zapewniają zyski od słońca. Jest to spowodowane dużą powierzchnię przeszkleń, przypadającą na elewację południową.

W rocznej analizie strat energii należy zwrócić uwagę na relatywnie wysoką wartość strat energii przez wentylację. Należy jednak pamiętać, że jest ona spowodowana stratami energii przez wentylację w lecie, czyli wywiewaniem w porze nocnej nadmiaru ciepła zakumulowanego w budynku w ciągu upalnych dni.

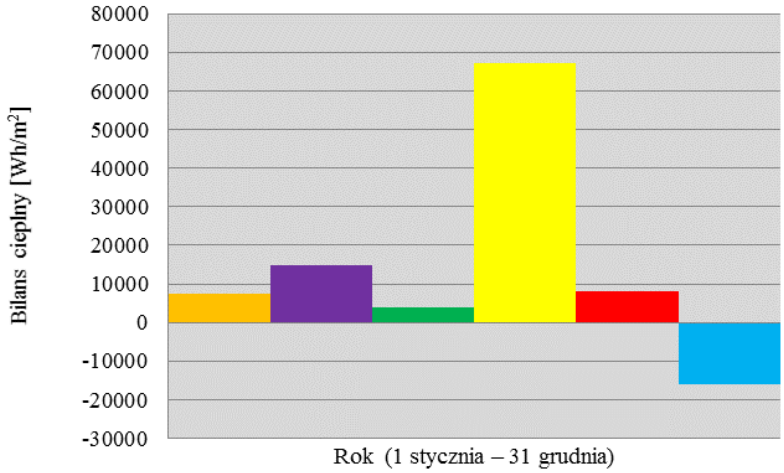
W budynkach energooszczędnych często występujący problem stanowi przegrzewanie wnętrz w okresie letnim. Z tego względu analizy energetyczne powinny być uzupełnione odpowiednimi analizami poziomu komfortu, ze szczególnie uważną analizą dla najcieplejszych dni w roku.




| | Rok (1 styczeń - 31 grudzień) |
|---|---|
| Urządzenia zasilane prądem | 17065,63 |
| Oświetlenie | 7414,3 |
| Ogrzewanie (gaz) | 12341,76 |
| Ciepła woda użytkowa (gaz) | 13042,05 |

Rys. 4. Zużycie energii końcowej na ogrzewanie

Fig. 4. Final energy consumption for heating




| | |
|---|---|
| Oświetlenie | 7410,98 |
| Komputer i wyposażenie | 14686,44 |
| Użytkowanie | 4011,36 |
| Zyski słoneczne od okien | 67159,41 |
| Ogrzewanie | 8144,22 |
| Chłodzenie | -15927,39 |

Rys. 5. Zyski wewnętrzne oraz zyski od słońca

Fig. 5. Internal energy profits and gains from the sun

## 5. Wnioski

Na ostateczny poziom wydajności energetycznej budynku wpływa wiele wzajemnie uzupełniających się i współzależnych, rozwiązań architektoniczno-budowlanych, które są rekomendowane dla budynków energooszczędnych. Im więcej takich rozwiązań zostanie zastosowanych w projekcie i podczas realizacji, tym ostateczne parametry energetyczne budynku będą lepsze.

Aby jednak można było zweryfikować projekt budynku pod kątem jego wydajności energetycznej konieczna jest zmiana w podejściu do dotychczasowych zasad projektowania w kierunku *Zintegrowanego Projektowania Energetycznego*. Wiąże się to z zastosowaniem odpowiednich narzędzi wspomagających projektowanie. Te narzędzia to po pierwsze oprogramowanie w standardzie BIM, pozwalające na stworzenie wirtualnego, dokładnie sparametryzowanego i zaprogramowanego budynku. Po drugie to odpowiednie oprogramowanie umożliwiające przeprowadzenie dla wirtualnego modelu budynku symulacji wydajności energetycznej, a więc analiz zużycia energii końcowej, zysków i strat energetycznych oraz poziomu komfortu i przegrzewania.

## Literatura

[1] Nordby A, *Przewodnik MaTrID - Zintegrowane projektowanie*, European Commission Executive Agency for Competitiveness and Innovation, 2013, str. 3.

[2] Miecznikowski P.: *BIM – wybór czy konieczność*, [w:] Materiały Budowlane 10/2013(494), str.59.

[3] *BIM Curriculum*, Graphisoft, 2013, [@:] http://www.graphisoft.com/learning/training-materials/bim-curriculum/ [dostęp: 21.03.2016].

[4] Sydor M.: *Wprowadzenie do CAD. Podstawy komputerowo wspomaganego projektowania*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2009, str.47.

[5] O'Donnell J. , Maile T., Rose C., *Transforming BIM to BEM: Generation of Building Geometry for the NASA Ames Sustainability Base BIM*, Lawrence Berkeley National Laboratory, 2013, str.8.

[6] *What is Energy-modeling and building simulation*, [@:] http://energy-models.com/what-is-energy-modeling-building-simulation, [dostęp: 21.03.2016].

[7] Norby A., *Integrated Energy Design - some principles of low energy building design*, Inteligent Energy Europe, 2009, [@:] http://www.intendesign.com/, [dostęp: 18.03.2016].

[8] *Określenie podstawowych wymogów, niezbędnych do osiągnięcia oczekiwanych standardów energetycznych dla budynków mieszkaniowych oraz sposobu weryfikacji projektów i sprawdzenia wykonanych domów energooszczędnych. ETAP I : Wytyczne do weryfikacji projektów budynków mieszkalnych, zgodnych ze standardem NFOŚiGW*, Krajowa Agencja Poszanowania Energii S.A., Warszawa, 2012.

## INTEGRATED ENERGY DESIGN OF AN ENERGY EFFICIENT BUILDINGS

**S u m m a r y**

Designing of a buildings as an energy-efficient buildings is a common necessity, resulting from an environmental, economic and social reasons as well as from the applicable law. The final level of the energy efficiency of the building affected by many complementary and interdependent, architectural and construction solutions that are recommended for energy efficient buildings. If more of such solutions will be used, the final energy performance of the building will be better.

Designing process of the energy efficient buildings requires a reorganization of the design process in the direction of the so-called Integrated Energy Design (IED). This is connected with the need to use appropriate tools to support the designing workshop and shift the main burden of decisions on the earliest design stage. These tools include computer software in a BIM standard and related programs, able to perform for the virtual model of the building a series of simulations of its energy efficiency.

**Keywords:** Building Information Modeling, Building Energy Model, analysis of energy efficiency, final energy consumption

DOI:10.7862/rb.2016.210

*Przesłano do redakcji: 17.05.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 279-286

**Paweł NOSZCZYK**[1]
**Henryk NOWAK**[2]

# TERMOGRAFIA AKTYWNA JAKO NOWOCZESNA METODA BADAŃ ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH

W pracy przedstawiono wykorzystanie termografii aktywnej do nieniszczących badań elementów żelbetowych. Głównym celem opracowania było zbadanie przydatności termografii aktywnej do lokalizacji wtrąceń materiałowych w postaci prętów stalowych w elemencie betonowym. Do pobudzenia cieplnego użyto promiennika podczerwieni ogrzewając badaną powierzchnię długim impulsem ciepła (long pulse thermography). Zastosowano indywidualnie dwa źródła ciepła. Pierwsze z nich składało się z sześciu podłużnych lamp grzejnych łącznie o mocy 6 kW, natomiast drugie źródło ciepła stanowiło szesnaście promienników podczerwieni emitujących energię podczerwoną (każdy o mocy 250 W). Przebadano cztery belki żelbetowe o zróżnicowanej średnicy zbrojenia głównego tj. 12, 16, 20 oraz 25 mm i strzemionach o średnicy 6 mm, w rozstawie co 200 mm. Badaniom poddano również płytę żelbetową o grubości 5 cm zbrojoną siatką z prętów zbrojeniowych o średnicy 8 mm i oczku zbrojenia 100 mm. Badanie składało się z dwóch etapów. Pierwszy polegał na nagrzewie badanej powierzchni, natomiast drugi na cyklicznej rejestracji termogramów. Uzyskane wyniki przedstawiono w postaci termogramów pokazujących różnicę temperatury na powierzchni badanego elementu w miejscu z prętem stalowym i bez pręta (sam beton) w czasie stygnięcia. Przy nagrzewie przez 30 minut, zbrojenie było najlepiej widoczne po około 1-10 minut od rozpoczęcia fazy stygnięcia. Wyniki potwierdzają przydatność użytej metody badań do lokalizacji zbrojenia w elementach żelbetowych przy założonych otulinach do 26 mm. Termografia aktywna jako badanie nieniszczące może być alternatywą dla innych znanych metod badawczych, jednakże musi być ona w dalszym ciągu udoskonalana.

**Słowa kluczowe:** badania nieniszczące, termowizja aktywna, lokalizacja zbrojenia, detekcja prętów stalowych

## 1. Wprowadzenie

W praktyce budowlanej często występuje potrzeba określenia struktury materiałowej wykonanych elementów budynku, do których można zaliczyć elemen-

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Paweł Noszczyk, Politechnika Wrocławska, Zakład Fizyki Budowli i Komputerowych Metod Projektowania, ul. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; tel. 71 320 32 03; pawel.noszczyk@pwr.edu.pl

[2] Henryk Nowak, Politechnika Wrocławska, Zakład Fizyki Budowli i Komputerowych Metod Projektowania, ul. Wyspiańskiego 27, 50-370 Wrocław; tel. 71 320 33 01; henryk.nowak@pwr.edu.pl

ty żelbetowe. W budynkach już istniejących, nieposiadających dokumentacji projektowej (budynki historyczne lub niepełna dokumentacja), gdy zachodzi potrzeba określenia rodzaju zbrojenia, należy wykonać odpowiednie badania inwentaryzacyjne. Mogą to być badania inwazyjne, np. odkrywkowe lub badania nieinwazyjne [1], do których można zaliczyć badania przy użyciu termografii aktywnej. Badania te są znane i rozwijane od lat 90' XX wieku [2]. Wykorzystują one zjawisko promieniowania cieplnego (podczerwonego) i polegają na pobudzeniu cieplnym (ogrzaniu lub ochłodzeniu) badanego elementu i cyklicznej rejestracji termogramów podczas stygnięcia lub ogrzewania się pobudzonej termicznie powierzchni. Występujące zmiany w strukturze materiałowej badanego elementu, tj. np. wtrącenia w postaci prętów stalowych czy pustek powietrznych, powodują zmiany przepływu strumieni ciepła, co skutkuje zaburzeniem rozkładu pola temperatury na powierzchni badanego elementu. Większość publikowanych prac naukowych, z obszaru detekcji wtrąceń materiałowych przy użyciu termografii aktywnej, dotyczy małowymiarowych płytek (grubości do kilku centymetrów) z drobnymi wtrąceniami [3-5].

Aktualnie badania elementów żelbetowych przy użyciu termografii aktywnej nie wyszły poza obszar badań naukowych. W literaturze można spotkać opracowania podobnych zagadnień dla bloków betonowych z dużymi wtrąceniami w postaci prostopadłościennych elementów [6-9], lokalizacją prętów stalowych w betonie z pobudzeniem mikrofalami [10] lub analizy numeryczne [11].

W pracy przedstawiono możliwość wykorzystania termografii aktywnej do lokalizacji prętów zbrojeniowych w belkach oraz płytach żelbetowych. Zaprojektowane stanowisko badawcze odwzorowywało rzeczywiste elementy żelbetowe spotykane w budynkach. Do pobudzenia cieplnego użyto promienników podczerwieni stymulując badany element długim impulsem cieplnym (long pulse thermography).

## 2. Opis procedury badawczej

### 2.1. Budowa stanowiska pomiarowego

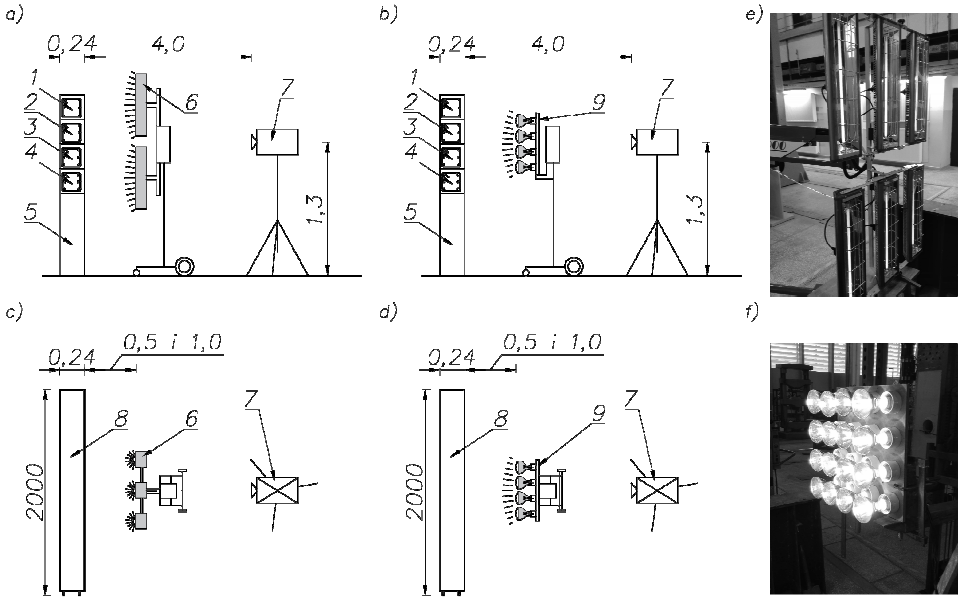
Przebadano cztery belki oraz jedną płytę żelbetową. Przyjęto belki o przekroju poprzecznym 240 x 240 mm i długości 2000 mm, każda z nich miała inne zbrojenie główne, tj. o średnicach 12, 16, 20 oraz 25 mm. Wszystkie belki posiadały strzemiona o średnicy 6 mm w rozstawie co 200 mm. Pobudzeniu cieplnemu i analizie termograficznej został poddany jeden bok, w którym znajdowały się 3 pręty zbrojenia głównego z otuliną 26 mm. Przebadana płyta żelbetowa miała wymiary 1550 x 1550 mm i grubość 50 mm z siatką zbrojeniową o oczku 100 mm i średnicy prętów 8 mm. Na rozkład pola temperatury wpływ miały wymiary geometryczne elementów oraz charakterystyki cieplne badanych materiałów, które zostały podane w tab. 1.

Budowa stanowiska badawczego oraz użytych promienników podczerwieni została przedstawiona na poniższym rys. 1.

Tabela 1. Wartości właściwości cieplnych badanych materiałów, na podstawie [12]

Table 1. The values of thermal properties of the materials tested, based on [12]

| **Nazwa materiału** | **Gęstość** $\rho$ [kg/m$^3$] | **Ciepło właściwe** $c_w$ [J / (kg·K)] | **Objętościowa pojemność cieplna** $C_{obj}$ ($\rho \cdot c_w$) [J / (m$^3$·K)] | **Współczynnik przewodzenia ciepła** $\lambda$ [W / (m·K)] |
|---|---|---|---|---|
| Beton | 2 000 | 1 000 | $2{,}00 \cdot 10^6$ | 1,35 |
| Stal | 7 900 | 500 | $3{,}95 \cdot 10^6$ | 17,0 |




Rys. 1. Stanowisko badawcze do lokalizacji zbrojenia w elementach żelbetowych przy użyciu termowizji aktywnej - źródło ciepła 6x1kW widok z boku (a) źródło ciepła 6x1kW widok z góry (b) źródło ciepła 16x250W widok z boku (c) źródło ciepła 16x250W widok z góry (d) zdjęcie źródła ciepła 6x1kW (e) zdjęcie źródła ciepła 16x250W (f): 1–belka ze zbrojeniem ⌀12mm, 2– belka ze zbrojeniem ⌀16mm, 3– belka ze zbrojeniem ⌀20mm, 4– belka ze zbrojeniem ⌀25mm, 5–podparcie belek, 6–promiennik podczerwieni 6x1kW, 7–kamera termowizyjna, 8–badane belki, 9–promiennik podczerwieni 16x250W

Fig. 1. The test stand for the location of steel bars in reinforced concrete elements using active thermography - source of heat 6x1kW side view (a) source of heat 6x1kW top view (b) source of heat 16x250W side view (c) source of heat 16x250W top view (d) image of heat source 6x1kW (e) and image of heat source 16x250W (f): 1– beam reinforcement ⌀12mm, 2– beam reinforcement ⌀16mm, 3– beam reinforcement ⌀20mm, 4– beam reinforcement ⌀25mm, 5–prop for beam, 6–infrared lamp 6x1kW, 7–thermovivion camera, 8–examined beams, 9– infrared lamp 16x250W

Głównymi elementami stanowiska pomiarowego była kamera termowizyjna, źródło ciepła oraz badane elementy żelbetowe. W pierwszym etapie badań wykorzystywano promiennik podczerwieni firmy Fobo składający się z sześciu podłużnych promienników podczerwieni, każdy o mocy 1kW (rys. 1e). Lampy

były ustawiane zarówno poziomo jak i pionowo względem belek żelbetowych oraz w dwóch różnych odległościach od ogrzewanej powierzchni tj. 0,5 m oraz 1,0 m. Dla uzyskania bardziej równomiernego ogrzania powierzchni w drugim etapie badań używano lampy grzewczej zbudowanej z 16 promienników podczerwieni, które łącznie miały moc 4kW. Nowe źródło ciepła również było ustawiane 0,5 m i 1,0 m od badanej powierzchni. Przebadana płyta żelbetowa była usytuowana w tym samym miejscu co belki żelbetowe, przy ich badaniach reszta stanowiska pozostawała bez zmian.

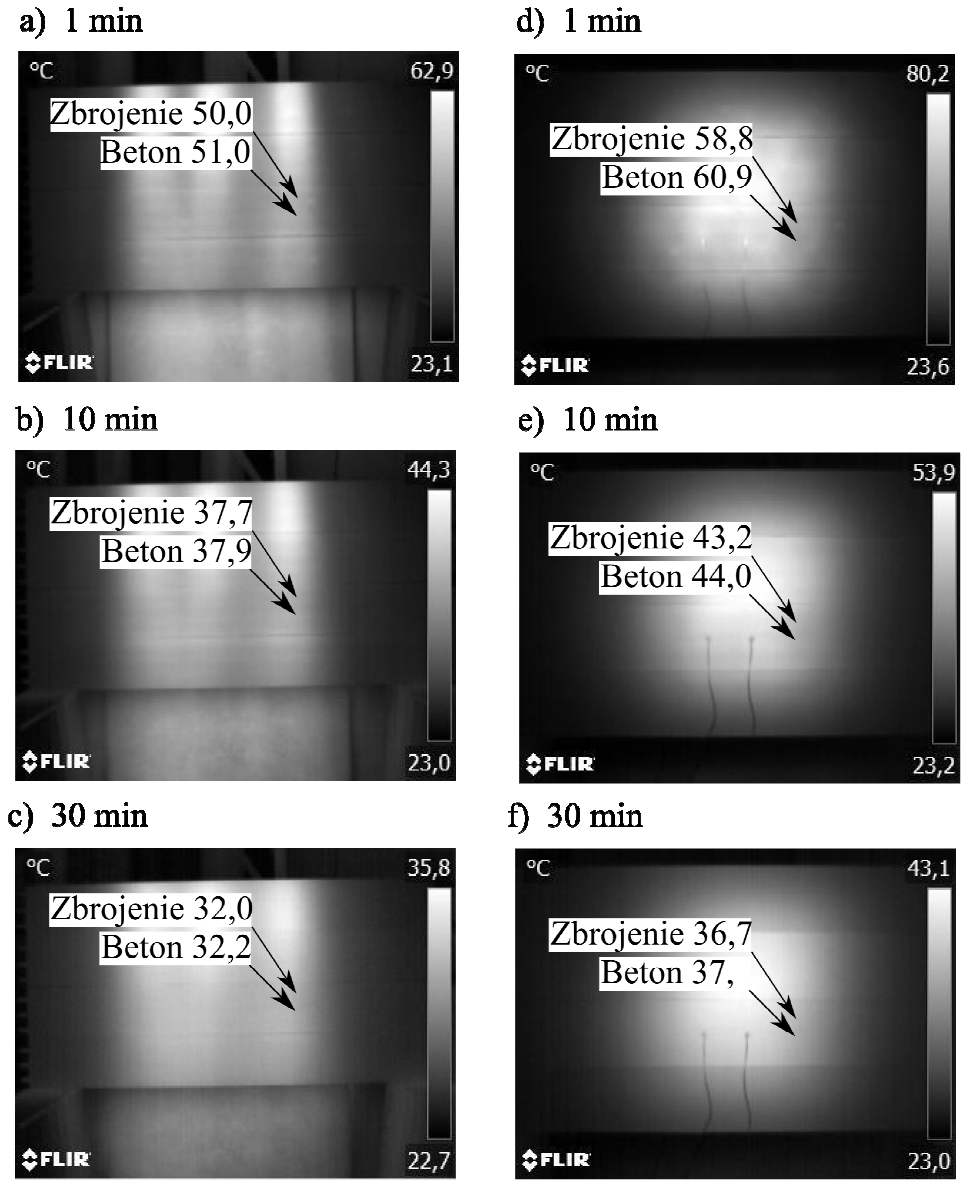
### 2.2. Metodyka pomiaru termowizyjnego

Do pomiaru użyto kamery termowizyjnej P65 firmy FLIR Systems. Urządzenie to charakteryzuje się rozdzielczością detektora 320 x 240 pikseli oraz czułością na poziomie < 100 mK. Pomiar został wykonany zgodnie z ogólnie przyjętymi zasadami [13-14]. W badaniu można wyróżnić 2 zasadnicze etapy. Pierwszy z nich polegał na ogrzaniu powierzchni badanego elementu promiennikiem ciepła przez określoną długość czasu (elementy były ogrzewane przez 5, 10, 30, 60 a nawet 120 min). W drugim etapie następował proces cyklicznej rejestracji termogramów w odstępach co 10 lub 60 s. Termogramy były rejestrowane do momentu całkowitego ostygnięcia wcześniej ogrzanej powierzchni, tj. temperatura powierzchni była równa temperaturze powietrza wokół elementu. Badanie powtarzano dla różnych czasów nagrzewania powierzchnia, różnego usytuowania promiennika podczerwieni względem elementu żelbetowego oraz dla dwóch różnych źródeł ciepła. Wybrane wyniki rozkładu pola temperatury w czasie pokazano w następnym rozdziale.

## 3. Wybrane wyniki badań i ich analiza

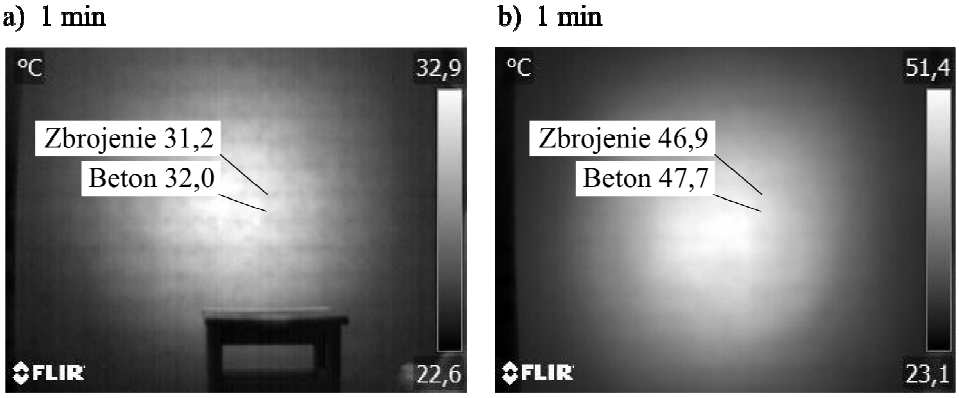
Wybrane wyniki badań zostały przedstawione za pomocą termogramów w palecie barw grey lub grey10. Nad termogramami podano czasy od momentu rozpoczęcia fazy stygnięcia. Wartości temperatury podano na termogramach w $^{o}$C, dla przekrojów ze zbrojeniem ⌀20 (oznaczenie "zbrojenie") oraz bez niego (oznaczenie "beton"). Na każdym ze zdjęć termowizyjnych po prawej stronie znajduje się skala temperatur. Na rys. 2. przedstawiono zmianę rozkładu pola temperatury w czasie stygnięcia wcześniej nagrzanej powierzchni belek.

Pokazano dwa źródła ciepła tj. promiennik podczerwieni o sześciu podłużnych lampach grzejnych (a-c) oraz źródło ciepła składające się z 16 promienników podczerwieni (d-f). Dla pierwszej z lamp różnica temperatur na powierzchni w przekroju ze zbrojeniem i bez zbrojenia tuż po wyłączeniu ogrzewania wynosiła 1$^{o}$C, natomiast dla drugiej lampy 2,1 $^{o}$C. Wraz z czasem stygnięcia różnice temperatur były coraz niższe. Po około 10-15 minutach zanika możliwość zlokalizowania zbrojenia, a cały element żelbetowy stygnie ponad 20 godzin.




Rys. 2. Termogramy belek żelbetowych dla czasu nagrzewu 30 min z odległości 0,5 m od badanej powierzchni dla różnych czasów stygnięcia, dla lampy o mocy 6x1kW (a-c) oraz dla lampy o mocy 16x250W (d-f)

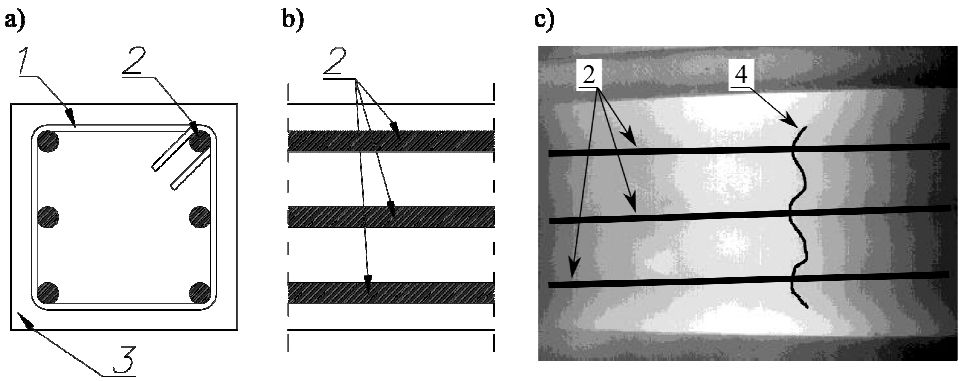
Fig. 2. The thermograms of reinforced beams for 30 min heat up at distance of 0.5 m from the test surface for different time of coolinf phase, for lamp with a power 6x1kW (a -c) and for lamp with a power 16x250W (d-f)




Rys. 3. Termogramy płyty żelbetowej (po 1 min stygnięcia) dla czasu nagrzewu 5 min (a) oraz 30 min (b)

Fig. 3. The thermograms of reinforced concrete slab (after 1 min of cooling phase) for 5 min time heated (a) and for 30 min (b)

Na rys. 3 przestawiono wyniki dla płyty żelbetowej. Po lewej stronie (a) znajduje się termogram dla czasu nagrzewu 5 min natomiast po prawej stronie (b) dla nagrzewu trwającego 10 min. Różnice temperatury w punktach nad zbrojeniem i bez niego wynoszą odpowiednio 1,2 °C oraz 0,8 °C. Zbrojenie w postaci ciemniejszych (zimniejszych) poziomych linii jest lepiej widoczne po lewej stronie. Zatem nie zawsze istnieje potrzeba długiego ogrzewania powierzchni w celu lepszej lokalizacji zbrojenia. Wykonano również dodatkowe zdjęcie termowizyjne z małej odległości, w kadrze znajdowała się tylko belka (ze zbrojeniem o średnicy 20 mm). Na rys. 4 można zaobserwować charakterystyczną fa-




Rys. 4. Belka ze zbrojeniem głównym ⌀20. Przekrój poprzeczny (a), przekrój podłużny (b) oraz zdjęcie termowizyjne zgodne z przekrojem podłużnym (c): 1 - strzemię, 2 - zbrojenie główne, 3 - beton, 4 - linia zaburzenia pola temperatury

Fig. 4. The beam with the main reinforcement ⌀20. Cross section (a), longitudinal section (b), and the infrared image in accordance with the longitudinal sectional view (c): 1 - stirrup, 2 - main reinforcement, 3 - concrete, 4 - field disturbance temperature line

lowaną linię (4), która wskazuje zaburzenie pola temperatury. W miejscu występowania stali następuje "wcięcie" niższych temperatur w lewą stronę. Stal w porównaniu do betonu posiada znacznie wyższy współczynnik przewodzenia ciepła oraz wyższą pojemność cieplną. Konsekwencją tego są widoczne chłodniejsze obszary w miejscu występowania w przekroju prętów stalowych.

## 4. Wnioski

Przeprowadzone badania wykazują przydatność termowizji aktywnej do lokalizacji prętów zbrojeniowych w elementach żelbetowych. Pręty zbrojeniowe mogą być widoczne zarówno jako różnice temperatury na powierzchni w różnych przekrojach tj. ze zbrojeniem lub bez (rys. 2 i rys. 3) lub jako zaburzenia równomierności temperatury wskazane na rys 4c. Należy pamiętać, że lokalizowane pręty były pod 26 mm warstwą betonu, im otulina zbrojenia będzie większa tym kontrast temperaturowy będzie niższy (detekcja zbrojenia będzie trudniejsza). Wraz z rozwijaniem metody termografii aktywnej oraz uzyskiwaniem lepszych parametrów kamer termowizyjnych, przedstawiona metoda badań może pozwolić na otrzymanie bardziej dokładnych informacji o strukturze materiałowej konstrukcji żelbetowych. Z uwagi na nieniszczący charakter termowizji aktywnej może być ona stosowana również w obiektach zabytkowych. Dalszymi krokami w pracy badawczej będzie rozwiązanie odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła [15-16] oraz rozpoznawanie średnicy zbrojenia w opisanych elementach.

***Źródło finansowania i podziękowania***

*Przedstawiona praca została sfinansowana ze środków programu MŁODA KADRA 2015 na WBLiW PWr. Autorzy pragną podziękować firmie BETARD z Długołęki k/Wrocławia za nieodpłatne wykonanie belek żelbetowych, Prof. Jackowi Kasperskiemu z WM-E PWr za udostępnienie dodatkowej kamery termowizyjnej oraz Laboratorium WBLiW PWr za udostępnienie do badań płyty żelbetowej.*

## Literatura

[1] Hoła J., Bień J., Sadowski Ł., Schabowicz K.: Non-destructive diagnostics of concrete structures in assessment of their durability, Bulletin of the Polish Academy of Sciences, Technical Sciences, vol. 63, No. 1, 2015, pp. 87-96.

[2] Maldague X., Marinetti S.: Pulse phase infrared thermography. Journal Applied Physics, 79, 1996, pp. 2694-2698.

[3] Dudzik S., Minkina W.: Dwuetapowy algorytm wyznaczania głębokości defektów z zastosowaniem aktywnej termografii dynamicznej, PAK vol. 59, nr 9, 2013.

[4] Mieloszyk M., Krawczuk M., Malinowski P., Wandowski T., Ostachowicz W.: Active Thermography Method for Delamination Detection and Localisation in Composite Structures, 6th European Workshop on Structural Health Monitoring, 2012.

[5] Ohlsson K.E.A., Olofsson T.: Quantative infrared thermography imaging of the density of heat flow rate through a building element surface, Applied Energy 134, 2014, pp. 499-505.

[6] Maierhofer Ch., Arndt R., Röllig M., Rieck C., Walther A., Scheel H., Hillemeier B.: Application of impulse-thermography for non-destructive assessment of concrete structures, Cement & Concrete Composites 28, 2006.

[7] Milovanović B., Pecur I. B.: Review of Active IR Thermography for Detection and Characterization of Defects in Reinforced Concrete, Journal of Imaging, 2, 11, 2016.
[8] Nahant M., Paez S., Van Leeuwen J.: Detection by infrared thermography of the heat signature of diseases and defects in concrete structures of civil engineering, International Conference on QIRT, Qubec, 2010.
[9] Cannard H., Mahrez M., Perrin T., Muzet V., Prybyla D., Brachelet F.: The use of infrared thermography for defects detection on reinforced concrete bridges, International Conference on QIRT, Kraków, 2010.
[10] Brachelet F., Keo S., Defer D., Breaban F.: Detection of reinforcement bars in concrete slabs by infrared thermography and microwaves excitation, International Conference on QIRT, Kraków, 2010.
[11] Szymanik B., Frankowski P. K., Chady T., Robinson C., Chelliah A. J.: Detection and Inspection of Steel Bars in Reinforced Concrete Structures Using Active Infrared Thermography with Microwave Excitation and Eddy Current Sensors, Sensors, 16, 234, 2016.
[12] PN-EN ISO 10456:2009: Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno-wilgotnościowe i procedury określania deklarowanych i obliczeniowych wartości cieplnych.
[13] Nowak. H.: Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2012.
[14] PN-EN 13187-2001: Właściwości cieplne budynków – jakościowa detekcja wad cieplnych w obudowie budynku – Metoda podczerwieni.
[15] Duda P., Taler J.: Rozwiązywanie prostych i odwrotnych zagadnień przewodzenia ciepła, WNT, Warszawa, 2003.
[16] Ozisik M.N., Orlande H.RB.: Inverse Heat Transfer. Fundamentals and Application. Taylor & Francis 2000.

## ACTIVE IR THERMOGRAPHY AS A MODERN METHOD OF RESEARCH REINFORCED CONCRETE ELEMENTS

**S u m m a r y**

The paper presents the use of active thermography for non-destructive testing of reinforced concrete elements. The main goal of the study was to investigate the method to locate inclusions in the material as steel bars in the concrete element. For thermal stimulation used infrared heating lamp and heated up surface by long impulse. Two heat sources were used individually. The first one consisted of six elongated heating lamp a total power of 6 kW, and the second heat source was composed of sixteen infrared bulbs (each with a power of 250 W). Four reinforcement beams with different diameter of main reinforcement:. 12, 16, 20 and 25 mm and stirrups with a diameter of 6 mm, in increments of 200 mm were examined. Also reinforced concrete slab with a thickness of 5 cm and grid reinforced rods of diameter 8 mm were tested. The study consisted of two stages: heat up examined surface, and periodically recording thermograms. The results are shown at thermovision image, it is shown a temperature differences on the surface of the cross-section with steel rod and the cross-section without steel, during cooling process. After 30 minutes heat up, reinforcement bar was visible after about 1-10 minutes from the start of the cooling phase. The results confirm the usefulness the method used to study the location of reinforcement in concrete elements with established lagging up to 26 mm. Active thermography as a non-destructive testing can be an alternative to other well-known research methods, however it must be still improved.

**Keywords:** non-destructive testing, active thermovision, location of reinforcement, steel bars detection

DOI:10.7862/rb.2016.211

*Przesłano do redakcji: 23.05.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 287-294

**Vlasta ONDREJKA HARBULAKOVA**[1]
**Pavol PURCZ**[2]
**Adriana ESTOKOVA**[3]
**Alena LUPTAKOVA**[4]

# RELATION BETWEEN CONCRETE LEACHABILITY AND pH USING STATISTICAL APPROACH

Attack of external water to concrete results in the degradation of cement and changes the concrete pore water and solid phase composition. The leaching behaviour of cement-based products have been shown to be similar after assessing the leaching characteristics by means of a pH dependence leaching test. The paper is focused on the investigation of the leachability of the concrete samples of different composition due to distilled water and its relation to pH. Si, Ca, Al, Fe and Mn ions leached out from the cement matrix were measured after each of fives experimental cycles. Three sets of samples were studied: without fly ash, and containing coal fly as cement replacement (5 wt. % and 10% wt. respectively). Statistical methods were used for the intensity and course of deterioration assessment regarding a dependency of Si/pH, Ca/pH Al/pH and Fe/pH and Mn/pH for each type of samples. The correlation among leaching processes according to type of concrete were also statistically studied.

**Keywords:** correlation coefficient, distilled water, calcium, silicon

## 1. Introduction

Deterioration due to leaching occurs gradually in structures in long-term contact with water. Leaching is a diffusion-reaction phenomenon which takes place significantly when concrete is exposed to poorly mineralized or acid water.

[1] Corresponding author / autor do korespondencji: Vlasta Ondrejka Harbulakova, Technical University of Kosice, Faculty of Civil Engineering, Institute of Environmental Engineering, Vysokoskolska 4, 042 00 Kosice, Slovakia, +421 55 602 4269, vlasta.harbulakova@tuke.sk

[2] Pavol Purcz, Technical University of Kosice, Faculty of Civil Engineering, Department of Applied Mathematics, +421 55 602 4269, pavol.purcz@tuke.sk

[3] Adriana Estokova, Technical University of Kosice, Faculty of Civil Engineering, Institute of Environmental Engineering, Vysokoskolska 4, 042 00 Kosice, Slovakia, +421 55 602 4265, adriana.estokova@tuke.sk

[4] Alena Luptakova, Slovak Academy of Science, Institute of Geotechnics, Watsonova 45, 043 53 Kosice, Slovakia, +421 55 7922 622, luptakal@saske.sk

This results in the elusion of major components of concrete, and is called corrosion by leaching [1]. Degradation consists in dissolution of calcium and hydroxide ions out of the matrix, which causes an increase in porosity and transport properties of surface concrete [2, 3]. Leaching is accelerated in neutral and acid solutions [4, 5], and it may be coupled with the ingress of aggressive ions such as chloride, sulphate, magnesium [6, 7]. As the Calcium (Ca) hydrate in concrete dissolves and migrates into water around the concrete structure, the concrete becomes porous. This type of deterioration is known as "concrete deterioration caused by Ca leaching", it progresses very slowly compared to other deteriorations such as the alkali-aggregate reaction or chloride attack. Consequently, this deterioration has not generally been considered in the design of ordinary concrete structure. However, in the design of special concrete structure with their service life over a hundred years or more, this type of deterioration must be considered [8].

A common indication of the tendency of a particular water to dissolve or precipitate calcium carbonate is content of the water, pH total alkalinity dissolved solids and temperature. Hard water (water containing dissolved calcium, magnesium and iron slats) will not dissolve calcium hydroxide to any appreciable extent, but soft water relatively free of the dissolved salts readily dissolves calcium hydroxide and may become quickly saturated with calcium [9]. The effects of other dissolved salts in water are major factor governing the dissolution of lime in concrete by water. Concrete exposed to water is not only subject to leaching but the deposition of mineral deposits as well. Mineral deposits may form on exposed surfaces where water seeps through concrete along joints and cracks of concrete structures, such as dam faces, pipeline and tunnels, retaining walls and abutments, and buildings foundations. Occasionally, surface evaporation leads to transport of water containing various ions through permeable concrete, resulting in deposition of salts on horizontal slabs or stem walls close to the soil line. Modern concrete often includes the use of supplementary cementitious materials. These materials are often co-products of other processes or natural materials. Some require further processing before they are suitable for concrete. Some of these materials have cementitious properties when used alone; others, called pozzolans, do no [10]. Fly ash, ground granulated blast-furnace slag, silica fume, and natural pozzolans, such as calcined shale, calcined clay or metakaolin, are materials that when used in conjunction with Portland or blended cement, contribute to the properties of the hardened concrete through hydraulic or pozzolanic activity or both. Fly ash is primarily silicate glass containing silica, alumina, iron, and calcium. Minor constituents are magnesium, sulphur, sodium, potassium, and carbon. Crystalline compounds are present in small amounts. The relative density (specific gravity) of fly ash generally ranges between 1.9 and 2.8 and the colour is generally grey or tans [11]. The chemical corrosion of concrete with fly ash in various aggressive environments was investigated and is presented in our previous papers [12, 13, 14].

The objective of this paper was to apply a statistical method to evaluate the results obtained in the experiments of chemical corrosion simulation. The paper presents a study of deterioration rate and course regarding a dependency of Si/pH, Ca/pH Al/pH and Fe/pH and Mn/pH for concrete samples, with and without fly ash addition, using a correlation analysis. The correlations among leaching processes according to type of concrete were also statistically studied.

## 2. Material and Methods

Three types of concrete samples were used for the experiments simulating the chemical corrosion of concrete. First set of samples consisted of a concrete mixture according to a classic recipe without fly ash (marked as FA0), the second set of samples, marked as FA5, consisted of a mixture where 5 wt. % of cement was replaced by coal fly ash and third set of samples, marked as FA10, contained 10 wt. % of coal fly ash as cement replacement. The used coal fly ash with volumetric weight of 2381 kg/m$^3$ originated from black coal's burning process and was incorporated into cement composites without any modification. Concrete cylinder samples of a 32 mm diameter and 15 mm height were formed as a drilled core from concrete cube (150x150x150 mm), prepared according to a standard process, using drilling mechanism STAM. The cylinder concrete specimens were rid of impurity, dried and weighted, and exposed to a leaching medium represented by distilled water with a pH value of 6.25.

Chemical corrosion-simulating-experiments proceeded in five consecutive cycles. Each cycle consists of the following steps: a seven-day exposition of sample to a liquid medium, a removal the sample from the liquid, a two-day drying of samples at room temperature and afterwards a removing of precipitations by little brush, a re-immersion of sample into the medium and finally adjustment of the pH value back to the initial value. The values of leachate´s pH were measured by pH meter PHH – 3X Omega. Concentrations of elementary ions in leachates after each experimental cycle were determined using X-ray fluorescence analysis (XRF). The measured concentrations of dissolved ions, given in Table 1, and the pH values measured in leachates (Table 2) were used for the statistical investigation.

In statistics, dependence refers to any statistical relationship between two random variables or two sets of data. Correlation refers to any of a broad class of statistical relationships involving dependence. Methodology of correlation coefficient ($R_{xy}$) calculation was presented in our previous works [14] as well as in well-known statistical literature sources e.g Kreyszig, E. [15], Dodge, Y. [16].

Information about 2-dimensional statistical data set gives correlation coefficient $R_{xy}$. Its values are from the interval <-1,1>. If $R_{xy} = 1$, the correlation is full linear, if $R_{xy} = -1$, then the correlation is inversely linear and if $R_{xy} = 0$, the pairs of values are fully independent. Than degree of the correlative closeness is: medium, if $0.3 \leq | R_{xy} | < 0.5$; significant, if $0.5 \leq | R_{xy} | < 0.7$; high, if $0.7 \leq | R_{xy} | < 0.9$; and very high, if $0.9 \leq | R_{xy} |$.

Table 1. Concentrations of studied elements dissolved in distilled water

Tabela 1. Stężenia badanych pierwiastków rozpuszczonych w destylowanej wodzie

| | | initial | after cycle 1 | after cycle 2 | after cycle 3 | after cycle 4 | after cycle 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | ions | Concentration mg/L | | | | | |
| FA0 | Ca | 55.6 | 52.1 | 134 | 104.5 | 262.1 | 197.5 |
| | Si | 0 | 164.2 | 398.8 | 291 | 575.8 | 466.8 |
| | Al | 79.4 | 41 | 166.4 | 124.3 | 241.6 | 368.6 |
| | Fe | 0 | 0 | 4.3 | 0 | 7.5 | 7.3 |
| | Mn | 36.6 | 31.1 | 29.1 | 30 | 32.1 | 39 |
| FA5 | Ca | 55.6 | 45.2 | 197.8 | 88.5 | 256.9 | 90.6 |
| | Si | 0 | 119.3 | 439.8 | 283.6 | 521.2 | 378.8 |
| | Al | 79.4 | 28.5 | 169.2 | 107.9 | 216.1 | 166.1 |
| | Fe | 0 | 0 | 5.5 | 0 | 4.8 | 4.9 |
| | Mn | 36.6 | 47.2 | 25.4 | 21.8 | 25.9 | 29.6 |
| FA10 | Ca | 55.6 | 74.6 | 137.1 | 124.5 | 270.4 | 98 |
| | Si | 0 | 178.8 | 475.5 | 339.4 | 602.5 | 475 |
| | Al | 79.4 | 56.8 | 193.9 | 156.7 | 225.6 | 214.9 |
| | Fe | 0 | 0 | 0 | 0 | 1.8 | 4.6 |
| | Mn | 36.6 | 38.3 | 41.1 | 35.4 | 23.1 | 48.4 |

Table 2. pH values of distilled water before experiment and after each one of 7-days cycle

Tabela 2. Wartości pH wody destylowanej przed eksperymentem i po każdym z 7-dniowym cyklu

| | samples | initial | after cycle 1 | after cycle 2 | after cycle 3 | after cycle 4 | after cycle 5 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| pH | FA0 | 6.25 | 8.36 | 8.4 | 8.56 | 8.22 | 8.11 |
| | FA5 | 6.25 | 8.01 | 8.27 | 8.49 | 8.24 | 8.12 |
| | FA10 | 6.25 | 7.88 | 8.41 | 8.56 | 8.32 | 8.24 |

A statistic approach was used for an evaluation of leachability of concrete´s basic elements depending on the leachates´ pH and for a comparison of dissolving the selected ions (Ca, Si, Fe, Al and Mn) regarding the type of concrete sample.

## 3. Results and Discussion

The results of the correlation analysis of chemical elements concentrations in leachates and pH values considering different types of concrete samples are presented in Table 3.

As seen in Table 3, the highest correlation was found for the dissolved concentrations of silicon and pH value of the leachant (0.65, 0.75 and 0.82 for the samples without fly ash, with 5 wt. % of fly ash, and with 10 wt. % of fly ash, respectively). The correlations between the leached out concentrations and leachate´s pH for the other ions were less significant. When compared the corre-

Table 3. Correlation coefficients for a dependence Chemical element - pH

Tabela 3. Współczynniki korelacji dla pierwiastków chemicznych - pH

| | $R_{xy}$ | | |
|---|---|---|---|
| | FA0 | FA5 | FA10 |
| Ca - pH | 0.35 | 0.42 | 0.52 |
| Si - pH | 0.65 | 0.75 | 0.82 |
| Fe - pH | 0.28 | 0.42 | 0.25 |
| Al - pH | 0.23 | 0.39 | 0.64 |
| Mn - pH | -0.57 | -0.44 | -0.01 |

lation coefficients regarding the type of concrete sample, the lowest correlation was observed for the concrete samples without fly ash (FA0) while the highest ones for the concrete samples with 10 wt. % of fly ash (FA10). This finding was not true for the dependencies Fe-pH and Mn-pH. There was even found absolutely no Mn-pH correlation ($R_{xy}$ = 0.01) for the sample with 10 wt. % of fly ash.

The dependencies between leachability of particular ions from the concrete samples, containing different content of fly ash, were also studied. The calculated correlation coefficients for calcium, silicon, iron, aluminium and manganese are shown in Table 4.

Table 4. Correlation coefficient of dissolved chemical element(s) according to percentage of fly ash replacement (X0 – no fly ash; X5 = 5wt.% of fly ash; X10 = 10wt.% of fly ash)

Tabela 4. Współczynnik korelacji rozpuszczonych pierwiastków chemicznych według procentu zastąpienia lotnego popiołu (X0 - brak popiołu; X5 = 5% wag. popiołu; X10 = 10% wag. popiołu lotnego)

| | | $R_{xy}$ |
|---|---|---|
| c(Ca) | $Ca_0$ - $Ca_5$ | 0.79 |
| | $Ca_0$ - $Ca_{10}$ | 0.84 |
| | $Ca_5$ - $Ca_{10}$ | 0.91 |
| c(Si) | $Si_0$ - $Si_5$ | 0.98 |
| | $Si_0$ - $Si_{10}$ | 0.99 |
| | $Si_5$ - $Si_{10}$ | 0.99 |
| c(Fe) | $Fe_0$ - $Fe_5$ | 0.92 |
| | $Fe_0$ - $Fe_{10}$ | 0.78 |
| | $Fe_5$ - $Fe_{10}$ | 0.58 |
| c(Al) | $Al_0$ - $Al_5$ | 0.78 |
| | $Al_0$ - $Al_{10}$ | 0.85 |
| | $Al_5$ - $Al_{10}$ | 0.96 |
| c(Mn) | $Mn_0$ - $Mn_5$ | -0.19 |
| | $Mn_0$ - $Mn_{10}$ | -0.40 |
| | $Mn_5$ - $Mn_{10}$ | -0.17 |

Table 4 shows a very high correlation ($|R_{xy}| \geq 0.9$) between the dissolved silicon concentrations from all 3 types of concrete samples during the experimental cycles. This finding points to the similar leaching mechanism of silicon ions regardless the composition of concrete. Taking into account the high correlation Si-pH mentioned above (Table 3), we can conclude that the silicon hydroxide is the main form of silicon leached out not only from the samples based on the ordinary Portland cement but from the samples containing the fly ash as well.

Similarly, a very high correlation ($|R_{xy}| \geq 0.9$) was observed for aluminium and calcium leaching, respectively, considering samples FA5 and FA10 while a lower correlation was found for aluminum and calcium leachability considering samples FA0 - FA10, and FA0 – FA5. The results indicate a quite different leachability of both aluminum and calcium regarding the concrete composition.

As it is shown in Figure 1, there is an inverse proportionality for leachability of manganese ions. However, almost no correlation was found ($|R_{xy}| = 0.17$, 0.19 and 0.4) when comparing the dissolved concentrations from the various concrete samples during the experiment.

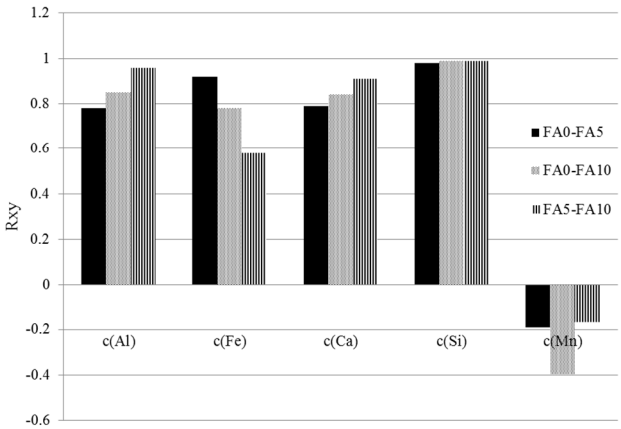



Fig. 1. Correlation coefficients for a dependence between dissolved ions concentrations from concrete samples considering various fly ash content

Rys. 1. Współczynniki korelacji między stężeniami rozpuszczonych jonów z próbek betonowych z uwzględnieniem różnej zawartości popiołu lotnego

High correlation was calculated for iron leaching (FA0-FA10). Same conclusion should be presumable calcium (correlation = high) and silicon (correlation = very high) for all pairs of samples. The lowest dependency (significant) was measured in case of samples FA5-FA10 for leaching of iron.

## 4. Conclusion

The correlation analysis was used to evaluate the results of the leaching experiments. The dissolved ions concentrations and pH values of leachates as well as the leached out concentrations of selected ions from the concrete samples of various compositions were investigated. It was found that the leaching of silicon do not depend on percentage of fly ash cement replacement. Similar findings can be concluded for aluminium and calcium in case of fly-ash-based concretes. Silicon hydroxide seems to be the main form of silicon to be leached out form all concrete samples regardless the fly ash content. Leaching in manganese shows inverse proportion in medium correlation of samples FA0-FA10. In general, no significant correlation was observed for the manganese leaching.

***Acknowledgement***
*This research has been carried out within the Grant No. 2/0145/15 of the Slovak Grant Agency for Science.*

## Bibliography

[1] Adenot F. and Buil M., 1992. Modelling of the corrosion of the cement paste by deionized water, Cem. Concr. Res. 22, 259-272.

[2] Carde C. and Francois R., 1999. Modelling the loss of strength and porosity increase due to the leaching of cement pastes, Cem. Concr. Compos. 21, 181-188.

[3] Dodge, Y. 2003. The Oxford Dictionary of Statistical Terms, OUP Oxford.

[4] Estokova, A., Ondrejka Harbulakova, V., Luptakova, A., Stevulova, N., Palascakova, L., Repka, M. 2013. Analysis of the selected characteristics changes of cement composites exposed to the sulphate environment, Chemical Engineering Transactions. Vol. 32, 1597-1602.

[5] Hitomi T., available at: http://www.spring8.or.jp/pdf/en/res_fro/05/131-132.pdf [access: 28 April 2015].

[6] Ikeda M. et al., 2004. Influence of type of cement on Ca leaching from concrete using experimental acceleration method, 29th conference on our world in concrete and structures, 25-26 august, Singapore.

[7] Kamali S. et al., 2003. Modelling the leaching kinetics of cement based materials – influence of materials and environment, Cem. Concr. Compos.25, 451-458.

[8] Kosmatka H. et al., 2003. Design and Control of Concrete Mixtures, 14th ed., Engineering Bulletin 001, PCA, USA.

[9] Kreyszig, E. 2011. Advanced Engineering Mathematics, John Wiley and sons, 10th edition, 2011.

[10] Lamond J. F. and Pielert J. H., 2006. Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials, ASTM International, New York.

[11] Mainguy M. et al., 2000. Modelling of leaching in pure cement paste and mortar, Cem. Concr. Res. 30, 83-90.

[12] Moranville M. et al., 2004. Physicochemical equilibria of cement-based materials in aggressive environments – experiment and modeling, Cem. Concr.Res. 34, 1569-1578.

[13] Ondrejka Harbulakova, V., Purcz, P., Estokova, A., Luptakova, A., Repka, M. 2015. Using a Statistical Method for the Concrete Deterioration Assessment in Sulphate Environment , Chemical Engineering Transaction, Vol.43.

[14] Ondrejka Harbulakova, V., Luptakova, A., Estokova, A., Stevulova, N., Palascakova, L. 2012. A Using of Coal Fly Ash in Concrete Materials and the Durability of Materials Testing Considering the Resource Optimization, Visions for the Future of Housing : Mega Cities : proceedings of the 38th IAHS World Congress: Istanbul, Turkey, April 16-19, Technical University, 959-964.

[15] Rozière, E. et al., 2009. Durability of concrete exposed to leaching and external sulphate attacks Cem. Concr. Res 39, 1188-1198.

[16] SCA, 2002. Slag cement in concrete, no. 11, Slag Cement association available at: http://www.slagcement.org/pdf/no11%20Slag%20Cement%20and%20Fly%20Ash.pdf [access: 28 April 2015].

## BADANIE ZALEŻŃOŚCI POMIĘDZY WYMYWANIEM BETONU ORAZ PH Z ZASTOSOWANIEM STATYSTYCZNEGO PODEJŚCIA

**S t r e s z c z e n i e**

Woda wywiera negatywny wpływ biorąc udział w procesie degradacji cementu oraz zmienia wodę porową betonu, jak i skład fazy stałej. Wymywanie produktów cementowych wykazało podobne właściwości otrzymane za pomocą testów ługowania z uwzględnieniem pH. W pracy skoncentrowano się na badaniach odcieku z próbek betonu o różnym pH oraz jonów Si, Ca, Al, Fe i Mn wypłukanych z matrycy cementowej, które były wyznaczane po każdym z pięciu cykli eksperymentalnych. Badaniu poddano trzy zestawy próbek bez zawartości popiołu lotnego i zawierającego popiół lotny jako zamiennik cementu (odpowiednio 5% wag. do 10% wag.,). Metody statystyczne były wykorzystywane do oceny intensywności oraz czasu uszkodzeń w zależności od Si/pH, Ca/pH Al/pH i Fe/pH oraz Mn/pH dla poszczególnych próbek. W pracy została również przedstawiona korelacja pomiędzy procesami wymywania w zależności od rodzaju betonu.

**Słowa kluczowe:** współczynnik korelacji, woda destylowana, wapń, krzem

DOI:10.7862/rb.2016.212

*Przesłano do redakcji: 17.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2015, s. 295-307

**Leszek OPYRCHAŁ**[1]
**Aleksandra BĄK**[2]

# FUNKCJA NIEZAWODNOŚCI I CZAS BEZAWARYJNEJ PRACY ODPOWIADAJĄCY WYKŁADNICZEJ INTENSYWNOŚCI USZKODZEŃ NA PRZYKŁADZIE NIEZAWODNOŚCI ZAPÓR

Funkcja niezawodności odgrywa w nauce o niezawodności podstawową rolę, gdyż pozwala na obliczenie prawdopodobieństwa uszkodzenia w określonym czasie *t*. Aby obliczyć funkcję niezawodności należy obliczyć całkę z funkcji intensywności uszkodzeń. W dotychczasowej praktyce obliczeń niezawodności stosowano funkcję intensywności uszkodzeń, która jest stała w czasie. W niniejszym artykule został przedstawiony sposób obliczeń funkcji niezawodności oraz średniego czasu bezawaryjnej pracy w przypadku, gdy intensywność uszkodzeń jest funkcją wykładniczą. Funkcja wykładnicza może znaleźć zastosowanie, w początkowej fazie istnienia wyrobu techniki, gdy intensywność uszkodzeń szybko maleje w czasie. W wyniku przeprowadzonych obliczeń uzyskano wzory na funkcję niezawodności $R$ oraz średni czas życia $T_S$. Obliczenia przeprowadzono na przykładzie zapór. Na podstawie danych o katastrofach zapór zbudowano histogram intensywności uszkodzeń. Do histogramu dopasowano funkcję wykładniczą metodą najmniejszych kwadratów. Następnie obliczono funkcję niezawodności oraz średni czas bezawaryjnej pracy. W rezultacie obliczeń uzyskano wartość średniego czasu bezawaryjnej pracy $T_S$ = 53817 lat oraz mediany czasu bezawaryjnej pracy $T_M$ = 37302 lata. Duże wartości $T_S$ i $T_M$ wynikają z faktu, że brak jest danych o katastrofach zapór wynikających z procesów starzenia, gdyż zdecydowana większość budowli piętrzących została zbudowana w XX w.

**Słowa kluczowe:** niezawodność zapór, katastrofy zapór, funkcja niezawodności, czas bezawaryjnej pracy

1 Autor do korespondencji / corresponding author: Leszek Opyrchał, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. +48 126174497; opyrchal@agh.edu.pl

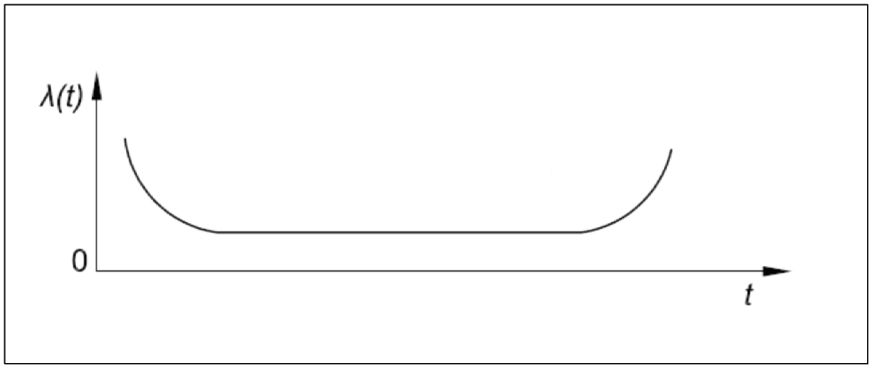
2 Aleksandra Bąk, mgr inż. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska, Katedra Inżynierii i Ochrony Środowiska, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, abak@agh.edu.pl

# 1. Wprowadzenie

Funkcja wykładnicza, jako funkcja intensywności uszkodzeń, odgrywa w teorii niezawodności szczególną rolę. W zależności od tego czy podstawa jest mniejsza czy większa od jedności, będzie to funkcja szybko malejąca, lub szybko rosnąca. Podobnie zachowuje się funkcja intensywności uszkodzeń. W początkowej fazie istnienia wyrobu techniki jest to funkcja szybko malejąca, w końcowej szybko rosnąca (rys 1). Czyli w początkowej i końcowej fazie istnienia wyrobu techniki funkcja intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ może być funkcją wykładniczą postaci:

$$\lambda(t) = a + b \cdot c^t \tag{1}$$

gdzie: $a, b, c$ – stałe, $b \neq 0$, $c > 0$,
$t$ – czas,
$\lambda(t)$– funkcja intensywności uszkodzeń.




Rys. 1. Typowy kształt funkcji intensywności uszkodzeń, na podstawie [1]
Fig 1. Typically shape of the failure rate function, based on [1]

# 2. Wyznaczenie charakterystyk niezawodnościowych

## 2.1. Funkcja intensywności uszkodzeń

Funkcję intensywności uszkodzeń wyznacza się na podstawie praktycznych obserwacji, zliczając uszkodzenia jakie występują w przyjętej jednostce czasu [2]. Następnie, stosując wzór (2) obliczamy histogram funkcji intensywności uszkodzeń:

$$\lambda_H(t) = \frac{n(t, t+\Delta t)}{N(t)\,\Delta t}. \tag{2}$$

gdzie: $\lambda_H$ – histogram funkcji intensywności uszkodzeń,
$n$ – liczba elementów, które uległy uszkodzeniu w przedziale czasu $(t,t+\Delta t)$,
N – liczebność próby w chwili $t$.

Następnie do histogramu dopasowujemy wybraną funkcję metodą najmniejszych kwadratów. Dopasowywaną funkcją w szczególności może być funkcja wykładnicza (1).

## 2.2. Funkcja niezawodności

W ogólności funkcja niezawodności wyraża się [3] wzorem:

$$R(t) = \exp(\int_0^t -\lambda(\tau)\,d\tau) \tag{3}$$

gdzie: $R(t)$ – funkcja niezawodności,
$\lambda(t)$ – intensywność uszkodzeń,
$t$ – czas,
$\tau$ – zmienna całkowania,

Podstawiając za funkcję intensywności uszkodzeń funkcję wykładniczą (1) otrzymujemy:

$$R(t) = \exp(\int_0^t -a - b\cdot c^{\tau})\,d\tau = \exp\left(-a\tau - \frac{b}{\ln(c)}\cdot c^{\tau}\Big|_0^t\right) =$$

$$= \exp\left(-a\cdot t - \frac{b}{\ln(c)}\cdot c^{t} + \frac{b}{\ln(c)}\right) \tag{4}$$

## 2.3. Średni czas bezawaryjnej pracy

Średni czas bezawaryjnej pracy $T_S$ definiowany jest jako:

$$T_S = \int_0^{\infty} R(t)\,dt. \tag{5}$$

Podstawiając do wzoru (5) funkcję niezawodności $R(t)$ wyrażona wzorem (4) otrzymujemy:

$$T_S = \int_0^{\infty} \exp\left( - a \cdot t - \frac{b}{\ln(c)} \cdot c^t + \frac{b}{\ln(c)} \right) dt. \tag{6}$$

Taką całkę nie da się obliczyć w analityczny sposób [4], [5]. Jedyna metoda uzyskania wyniku jest rozwiązanie numeryczne.
Wariancja czasu bezawaryjnej pracy wyraża się wzorem [6]:

$$\sigma_T^2 = \int_0^{\infty} 2t \cdot R(t)\ dt - \left( \int_0^{\infty} R(t)\ dt \right)^2 = \int_0^{\infty} 2t \cdot R(t)\ dt - T_S^2.$$

W rozważanym przypadku wynosi ona

$$\sigma_T^2 = \int_0^{\infty} 2t \cdot \exp\left( - a \cdot t - \frac{b}{\ln(c)} \cdot c^t + \frac{b}{\ln(c)} \right) dt - T_S^2. \tag{7}$$

I podobnie jak całka (6) nie da się jej policzyć w analityczny sposób.

### 2.4. Mediana czasu bezawaryjnej pracy

Aby obliczyć medianę czasu bezawaryjnej pracy $T_M$ należy rozwiązać równanie:

$$R(T_M) = 0{,}5. \tag{8}$$

Stąd

$$0{,}5 = \exp\left( - a \cdot t - \frac{b}{\ln(c)} \cdot c^t + \frac{b}{\ln(c)} \right)$$

$$\ln(0{,}5) = -a \cdot t - \frac{b}{\ln(c)} \cdot c^t + \frac{b}{\ln(c)}$$

Rozwiązanie powyższego równania bez problemu uzyskuje się na drodze numerycznej, stosując w dowolnym arkuszu kalkulacyjnym funkcję „szukaj wyniku”.

## 3. Przykład obliczeń – niezawodność zapór

### 3.1. Materiał

Wszystkie dane o zaporach i ich katastrofach zostały zaczerpnięte z Biuletynu nr 99 [7]. Analizowany jest okres do 1986 r. Liczba analizowanych zapór: 17 406. Liczba zapór, które uległy katastrofom: 176. Podane dane nie obejmują Chin. Przed dalszymi obliczeniami dane należało ujednolicić, gdyż w podanym zbiorze były dane niekompletne, a także dane o katastrofach na etapie budowy

zapory. Ponieważ obliczane charakterystyki niezawodnościowe jak intensywność uszkodzeń, czy funkcja niezawodności dotyczą okresu eksploatacji, dane o katastrofie na etapie budowy nie mogą być brane pod uwagę. Dlatego z badanego zbioru wykluczono następujące przypadki:

- niekompletne dane o 15 katastrofach zapór. Nie była znana data budowy zapory - 13 przypadków, lub nie było podane, czy katastrofa nastąpiła w trakcie pierwszego napełniania, czy już w trakcie eksploatacji - 2 przypadki,
- katastrofy w trakcie budowy zapór, przed oddaniem jej do eksploatacji. Takich katastrof było 15. Ale tylko w jednym przypadku zrezygnowano z dalszej budowy. W pozostałych zapory zostały odbudowane.

Czyli do dalszej analizy, przyjęto:

- liczbę zapór 17 406 – 15 - 1 = 17 390,
- liczbę katastrof zapór 176 – 15 – 15 = 146.

Najdłuższy czas życia zapory od budowy do katastrofy wynosił 236 lat.

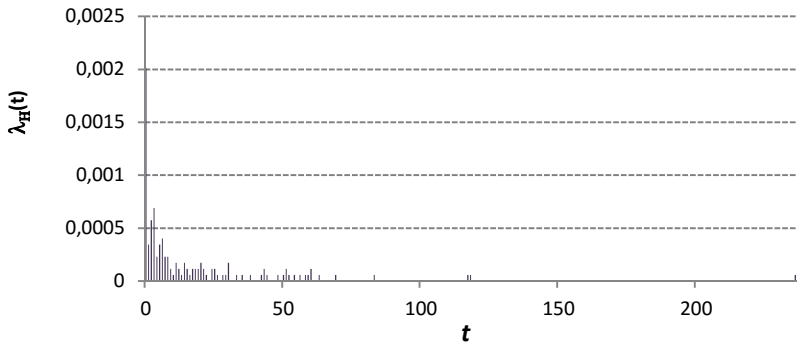
### 3.2. Metody

Na podstawie danych o katastrofach zapór wyznaczono zgodne ze wzorem (2) histogram funkcji intensywności uszkodzeń $\lambda_H(t)$. Wartość histogramu oraz poszczególnych jego składników pokazano w tab. nr 1 oraz na wykresie (rys. nr 2). W tabeli wykazano tylko te lata, w których liczba katastrof była większa od zera.

Do obliczonego histogramu dopasowano metodą najmniejszych kwadratów funkcję wykładniczą postaci (1).

$$\lambda(t) = a + b \cdot c^t. \tag{9}$$

gdzie: $a, b, c$ – stałe estymowane metodą najmniejszych kwadratów,
$\lambda(t)$ – funkcja intensywności uszkodzeń,
$t$ – czas.




Rys. 2. Histogram funkcji intensywności uszkodzeń dla zapór

Fig. 2. The histogram of the failure rate function of dams

Tabela 1. Histogram funkcji intensywności uszkodzeń

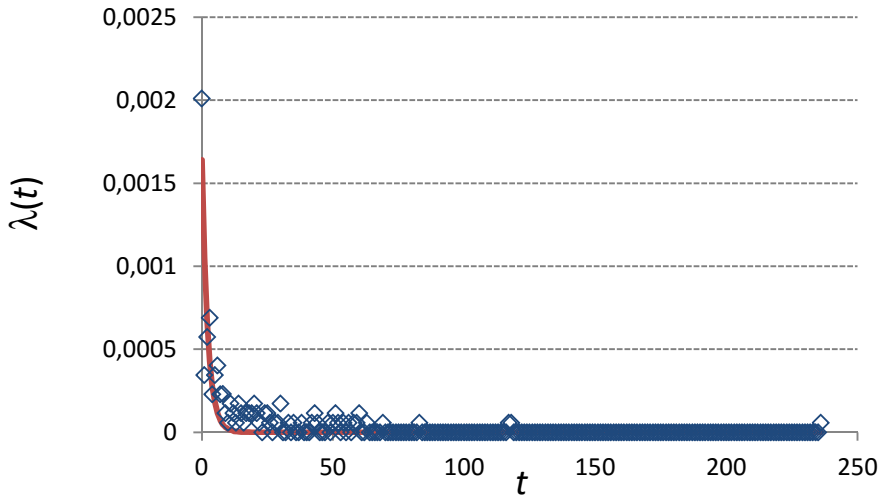
Table 1. The histogram of the failure rate function

| $t$ | $n(t+\Delta t)$ | $N(t)$ | $\lambda_H(t)$ | $t$ | $n(t+\Delta t)$ | $N(t)$ | $\lambda_H(t)$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 35 | 17390 | 2,013E-03 | 26 | 1 | 17274 | 5,789E-05 |
| 1 | 5 | 17355 | 2,881E-04 | 28 | 1 | 17273 | 5,789E-05 |
| 2 | 10 | 17350 | 5,764E-04 | 29 | 1 | 17272 | 5,790E-05 |
| 3 | 12 | 17340 | 6,920E-04 | 30 | 3 | 17271 | 1,737E-04 |
| 4 | 4 | 17328 | 2,308E-04 | 33 | 1 | 17268 | 5,791E-05 |
| 5 | 6 | 17324 | 3,463E-04 | 35 | 1 | 17267 | 5,791E-05 |
| 6 | 7 | 17318 | 4,042E-04 | 38 | 1 | 17266 | 5,792E-05 |
| 7 | 4 | 17311 | 2,311E-04 | 42 | 1 | 17265 | 5,792E-05 |
| 8 | 4 | 17307 | 2,311E-04 | 43 | 2 | 17264 | 1,158E-04 |
| 9 | 2 | 17303 | 1,156E-04 | 44 | 1 | 17262 | 5,793E-05 |
| 10 | 1 | 17301 | 5,780E-05 | 48 | 1 | 17261 | 5,793E-05 |
| 11 | 3 | 17300 | 1,734E-04 | 50 | 1 | 17260 | 5,794E-05 |
| 12 | 2 | 17297 | 1,156E-04 | 51 | 2 | 17259 | 1,159E-04 |
| 13 | 1 | 17295 | 5,782E-05 | 52 | 1 | 17257 | 5,795E-05 |
| 14 | 2 | 17294 | 1,156E-04 | 54 | 1 | 17256 | 5,795E-05 |
| 15 | 2 | 17292 | 1,157E-04 | 56 | 1 | 17255 | 5,795E-05 |
| 16 | 1 | 17290 | 5,784E-05 | 58 | 1 | 17254 | 5,796E-05 |
| 17 | 2 | 17289 | 1,157E-04 | 59 | 1 | 17253 | 5,796E-05 |
| 18 | 2 | 17287 | 1,157E-04 | 60 | 2 | 17252 | 1,159E-04 |
| 19 | 2 | 17285 | 1,157E-04 | 63 | 1 | 17250 | 5,797E-05 |
| 20 | 2 | 17283 | 1,157E-04 | 69 | 1 | 17249 | 5,797E-05 |
| 21 | 2 | 17281 | 1,157E-04 | 83 | 1 | 17248 | 5,798E-05 |
| 22 | 1 | 17279 | 5,787E-05 | 117 | 1 | 17247 | 5,798E-05 |
| 23 | 1 | 17278 | 5,788E-05 | 118 | 1 | 17246 | 5,798E-05 |
| 24 | 1 | 17277 | 5,788E-05 | 236 | 1 | 17245 | 5,799E-05 |
| 25 | 2 | 17276 | 1,158E-04 | | | | |

Dopasowanie funkcji $\lambda(t)$ do histogramu wykonano z pomocą programu do analizy danych OriginPro 2015, wykorzystano opcję „nonlinear fitting" – „dopasowanie nieliniowe" oraz funkcję „asymptotic1" w zbiorze funkcji „exponential". W procesie dopasowania uwzględniono także te lata, dla których liczb katastrof wynosiła zero. W rezultacie otrzymano następujące wartości stałych:

$$\begin{aligned} a &= 1{,}86 \cdot 10^{-5} \pm 4{,}7 \cdot 10^{-6} \\ b &= 1{,}67 \cdot 10^{-3} \pm 6{,}6 \cdot 10^{-5} \\ c &= 0{,}6004 \pm 2{,}2 \cdot 10^{-2} \end{aligned} \tag{10}$$

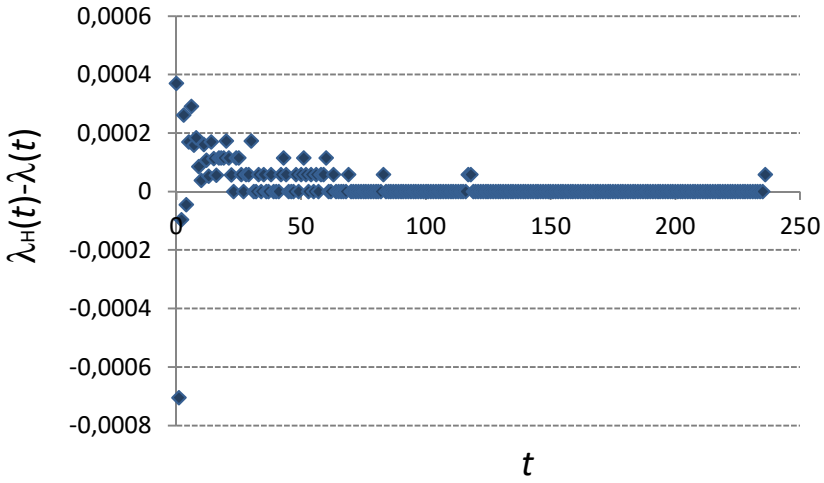
Wykres funkcji $\lambda(t)$ pokazano na rys. nr 3. Różnice pomiędzy histogramem a wartością dopasowanej funkcji pokazane są na rys. nr 4.




Rys. 3. Funkcja intensywności uszkodzeń dopasowana do histogramu

Fig. 3. The failure rate function matched to the histogram

Poprawność dopasowania można stwierdzić stosując różne testy statystyczne. Jednym z nich jest test chi-kwadrat. Statystyce chi-kwadrat [8] podlega wielkość:




Rys. 4. Różnica pomiędzy wartościami histogramu i funkcji dopasowanej

Fig 4. The differences between the histogram values and the values of the estimated function

$$\chi^2_{N-r-1} = \sum_{i=1}^{N} \frac{(\lambda_H(t_i) - \lambda(t_i))^2}{\Delta^2(\lambda_H(t_i) - \lambda(t_i))}, \tag{11}$$

gdzie: $\Delta^2(\lambda_H(t_i)-\lambda(t_i))$ - kwadrat błędu różnicy $\lambda_H(t_i)-\lambda(t_i)$,
$N$ – liczba obserwacji, czyli lat,
$r$ – liczba estymowanych parametrów funkcji (9), czyli 2.

$\Delta^2(\lambda_H(t_i)-\lambda(t_i))$ - kwadrat błędu wyznaczenia różnicy $\lambda_H(t_i)-\lambda(t_i)$. Błąd wyznaczenia różnicy obliczany jest za pomocą metody różniczki zupełnej [9].

$$\Delta(\lambda_H(t_i) - \lambda(t_i)) = \Delta\lambda_H(t_i) + \Delta\lambda(t_i)$$

gdzie: $\Delta\lambda_H$ – błąd wyznaczenia histogramu funkcji intensywności uszkodzeń,
$\Delta\lambda$ – błąd wyznaczenia funkcji intensywności uszkodzeń.

Tą samą metodę stosujemy do wzoru (2) w celu wyznaczenia $\Delta\lambda_H$. Pamiętając, że $\Delta t$ jest wartością stałą otrzymujemy:

$$\Delta\lambda_H(t_i) = \frac{\Delta n(t_i)}{N(t_i)\cdot\Delta t} + \frac{n(t_i)}{N^2(t_i)}\frac{\Delta N(t_i)}{\Delta t}.$$

W dalszych obliczeniach przyjęto, że błąd obliczenia liczby uszkodzonych zapór $\Delta n$ w przedziale $\Delta t$ oraz błąd wyznaczenia nieuszkodzonych zapór $\Delta N(t_i)$ jest stały i wynosi 1,0, gdyż liczbę zapór zliczamy z dokładnością jednej sztuki.

Testowana jest hipoteza: histogram $\lambda_H(t)$ może być przybliżony funkcją $\lambda(t) = 1{,}86\cdot10^{-5}+1{,}6710^{-5}\cdot0{,}6004^t$. Wartość statystyki chi-kwadrat, zdefiniowaną sumą (11) obliczono w arkuszu kalkulacyjnym i wyniosła ona $\chi^2 = 207{,}4$. Natomiast wartość krytyczna, dla liczby stopni swobody wynoszącej 237-1-2=234 i przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0{,}05$ wynosi 270,7. Stwierdzamy, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy równości histogramu i funkcji dopasowanej.

### 3.3. Wyniki

Podstawiając wartości uzyskanych parametrów (10) do wzorów (9) i (4) otrzymamy:

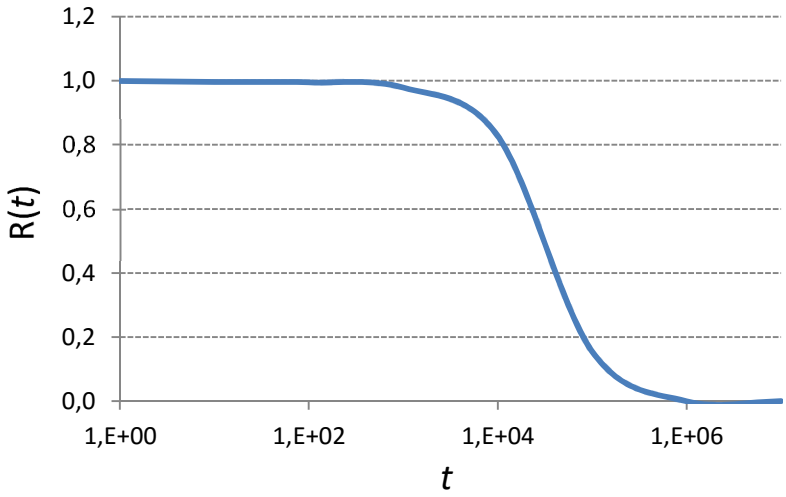
funkcję intensywności uszkodzeń

$$\lambda(t) = 1{,}86\cdot10^{-5} - 1{,}67\cdot10^{-3}\cdot0{,}6004^t \text{ katastrof/rok}, \tag{12}$$

funkcję niezawodności

$$R(t) = \exp\left(3{,}27\cdot10^{-3} - 1{,}86\cdot10^{-5}\cdot t + 3{,}27\cdot10^{-3}\cdot0{,}6004^t\right) \tag{13}$$

Wykres funkcji niezawodności pokazany jest na rys. nr 5.




Rys. 5. Wykres funkcji niezawodności dla zapór

Fig. 5. Plot of reliability function for dams

W celu obliczenie średniego czasu bezawaryjnej pracy należy sięgnąć po rozwiązanie numeryczne [4]. Otrzymujemy wynik

$$T_S = \int_0^{\infty} \exp\left(3{,}27 \cdot 10^{-3} - 1{,}86 \cdot 10^{-5} \cdot t + 3{,}27 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}6004^t\right) dt = 54231\,\text{lat.}$$

Wariancję $T_S$ obliczamy zgodnie ze wzorem (7). Po podstawieniu uzyskanych wartości parametrów (10) oraz czasu $T_S$ otrzymujemy równanie na $\sigma^2_T$:

$$\sigma_T^2 = \int_0^{\infty} 2t \cdot \exp\left(3{,}27 \cdot 10^{-3} - 1{,}86 \cdot 10^{-5} \cdot t + 3{,}27 \cdot 10^{-3} \cdot 0{,}6004^t\right) dt - 54231^2.$$

Po wykonaniu całkowania numerycznego [4] otrzymujemy, ze wartość wariancji czasu bezawaryjnej pracy wynosi:

$$\sigma_{T_S}^2 = 5{,}86282 \cdot 10^9 - 2{,}941 \cdot 10^9 = 2{,}92182 \cdot 10^9.$$

Czyli odchylenie standardowe bezawaryjnego czasy pracy ma wartość:

$$\sigma_{T_S} = \sqrt{\sigma_{T_S}^2} = \sqrt{2{,}92182 \cdot 10^9} = 54053\,\text{lat.}$$

W celu oceny wpływu błędu estymacji parametrów funkcji intensywności uszkodzeń na średni czas bezawaryjnej pracy $T_S$ należy posłużyć się metodą różniczki zupełnej:

$$\Delta T_S = \left|\frac{\partial\, \Delta T_S}{\partial a}\right| \cdot \Delta a + \left|\frac{\partial\, \Delta T_S}{\partial b}\right| \cdot \Delta b + \left|\frac{\partial\, \Delta T_S}{\partial c}\right| \cdot \Delta c. \tag{14}$$

Ponieważ parametr $c > 0$, to funkcja $T_S(t)$ jest ciągła oraz jej pochodne cząstkowe względem parametrów $a$, $b$ i $c$ istnieją i są ciągłe. Zatem można wykonać różniczkowanie pod znakiem całki [10]. Obliczamy pierwszy człon formuły (14):

$$\left|\frac{\partial\, \Delta T_S}{\partial a}\right| \cdot \Delta a = \frac{\partial}{\partial a}\int_0^{\infty} \exp\left(-a \cdot t - \frac{b}{\ln(c)} \cdot c^t + \frac{b}{\ln(c)}\right) dt \cdot \Delta a =$$

$$= \int_0^{\infty} -t \cdot \exp\left(-a \cdot t - \frac{b}{\ln(c)} \cdot c^t + \frac{b}{\ln(c)}\right) dt \cdot \Delta a$$

Wartość powyższej całki obliczona numerycznie wynosi $-2{,}93 \cdot 10^9$. Mnożąc przez $\Delta a = 4{,}7 \cdot 10^{-6}$ i biorąc wartość bezwzględną otrzymujemy:

$$\left|\frac{\partial\, \Delta T_S}{\partial a}\right| \cdot \Delta a = 1{,}37 \cdot 10^4.$$

Obliczamy drugi człon formuły (14)

$$\left|\frac{\partial\, \Delta T_S}{\partial b}\right| \cdot \Delta b = \frac{\partial}{\partial b}\int_0^{\infty} \exp\left(-a \cdot t - \frac{b}{\ln(c)} \cdot c^t + \frac{b}{\ln(c)}\right) dt \cdot \Delta b =$$

$$= \int_0^{\infty} \left(-\frac{c^t}{\ln(c)} + c\right) \cdot \exp\left(-a \cdot t - \frac{b}{\ln(c)} \cdot c^t + \frac{b}{\ln(c)}\right) dt \cdot \Delta b$$

Wartość powyższej całki obliczona numerycznie wynosi 32556. Mnożąc przez $\Delta b = 6{,}57 \cdot 10^{-5}$ otrzymujemy:

$$\left|\frac{\partial\, \Delta T_S}{\partial b}\right| \cdot \Delta b = 2{,}14.$$

Obliczamy trzeci człon formuły (14).

$$\left|\frac{\partial\,\Delta T_S}{\partial c}\right|\cdot\Delta c=\frac{\partial}{\partial c}\int_0^{\infty}\exp\left(-a\cdot t-\frac{b}{\ln(c)}\cdot c^t+\frac{b}{\ln(c)}\right)dt\cdot\Delta c=$$

$$=\int_0^{\infty}\left(-b\cdot\frac{t\cdot c^{t-1}\cdot\ln(c)-\frac{1}{c}c^t}{\ln^2(c)}-\frac{b}{c\cdot\ln^2(c)}\right)\cdot\exp\left(-a\cdot t-\frac{b}{\ln(c)}\cdot c^t+b\cdot c\right)dt\cdot\Delta c=$$

$$=\int_0^{\infty}-\frac{b}{\ln^2 c}c^{t-1}\left(t\cdot\ln c-1-\frac{1}{c}\right)\cdot\exp\left(-a\cdot t-\frac{b}{\ln(c)}\cdot c^t+b\cdot c\right)dt\cdot\Delta c$$

Wartość powyższej całki obliczona numerycznie [4] wynosi 0,077. Mnożąc przez $\Delta c = 2{,}17\cdot10^{-2}$ otrzymujemy:

$$\left|\frac{\partial\,\Delta T_S}{\partial c}\right|\cdot\Delta c=0{,}0017.$$

Sumując wartości wszystkich członów formuły (14) otrzymujemy w zaokrągleniu:

$$\Delta T_S=13700.$$

Zatem

$$T_S=54230\pm13700.$$

Medianę czasu bezawaryjnej pracy $T_M$ otrzymujemy także na drodze numerycznej, szukając rozwiązania równania $R(t) = 0{,}5$. Czyli szukamy rozwiązania równania:

$$\exp\left(1{,}003\cdot10^{-3}-1{,}86\cdot10^{-5}\cdot T_M+3{,}27\cdot10^{-3}\cdot0{,}6004^{T_M}\right)=0{,}5.$$

W wyniku obliczeń przeprowadzonych za pomocą arkusza kalkulacyjnego otrzymujemy:

$T_M$ = 37130 lat.

### 3.4. Dyskusja

To, że w wyniku obliczeń otrzymano duże wartości średniego, bezawaryjnego czasu pracy $T_S$ = 54231 lat, czy mediany bezawaryjnego czasu pracy $T_M$ = 37130 lata, nie oznacza, że zapory są dziesięciokrotnie trwalsze od egipskich piramid. Bowiem w wejściowym zbiorze danych, nie było zapór, które uległy katastrofie na skutek starzenia się. Wynika to z faktu, że zdecydowana

większość zapór została zbudowana w XX w i jak do tej pory nie zanotowano katastrofy zapory spowodowanej skutkami starzenia się materiałów. Trzeba także zauważyć, że zapory są stale eksploatowane i podlegają konserwacjom, Zapora pozostawiona bez konserwacji ulegnie szybkiej degradacji i w konsekwencji katastrofie. Dlatego uzyskany rezultat należy interpretować tylko w zakresie katastrof spowodowanych błędami posadowienia spowodowanych niewystarczającym rozpoznaniem geologicznym, błędami projektowymi, w tym zaprojektowaniem niewystarczającego wydatku urządzeń upustowych, błędami wykonawczymi popełnionymi w tracie budowy oraz poważnymi zaniedbaniami eksploatacyjnymi.

Wątpliwość może budzić także zastosowana metodyka. Zapora została potraktowana jako układ nieodnawialny mimo, że przecież wszystkie zapory podlegają okresowym naprawom. Czy w związku z tym nie należało traktować zapory jako układu odnawialnego. Jednakże, całkowite opróżnianie zbiornika w celu wykonania remontu zapory jest rzadkością. Zdecydowana większość remontów wykonywana jest przy nieznacznym obniżeniu piętrzenia. W Polsce wykonano taki remont tylko dla zapory Wisła-Czarne, oraz dla zbiornika górnego elektrowni Żar-Porąbka. Niestety nie ma zebranych danych w tym zakresie, aby możliwe było przeprowadzenie bardziej szczegółowych rozważań.

W uzyskanym rozwiązaniu zaskakuje duża wartość dyspersji średniego czasu bezawaryjnej pracy $T_S$, która stanowi 99,9% wartości $T_S$. Wartość ta wynika z samego charakteru rozkładu i nie jest jasne, dlaczego jest aż tak duża. Wartość błędu $\Delta T_S$ wyznaczenia średniego bezawaryjnego czasu pracy, wynikająca z rozrzutu danych oraz z estymacji funkcji intensywności uszkodzeń $\lambda(t)$ wynosi 25% $T_S$, co też nie jest małą wartością. Dlatego uzyskane wyniki mogą mieć jedynie orientacyjny charakter.

Obliczenie średniego czasu bezawaryjnej pracy $T_S$ w przypadku, gdy funkcja intensywności uszkodzeń jest funkcją wykładniczą nie jest możliwe w sposób analityczny i trzeba się posłużyć całkowaniem numerycznym, które zawsze jest obarczone, często trudną do oszacowania, niedokładnością, zwłaszcza że przedział całkowania rozciągnięty jest do nieskończoności. Dlatego, w przedziałach gdy funkcja intensywności uszkodzeń jest szybko zmienna – rosnąca lub malejąca, właściwsze wydaje się aproksymowanie jej nie funkcją wykładniczą, tylko eksponencjalną. Wtedy obliczenie $T_S$ jest możliwe w analityczny sposób [11], podobnie jak w przypadku gdy funkcja intensywności uszkodzeń jest liniowa [12].

## Literatura

[1] Jaźwiński J., Warzyńska-Fiok K, Bezpieczeństwo systemów, PWN, Warszawa 1993.

[2] Bajer J., Iwanejko R., Kapcia J., Niezawodność systemów wodociągowych i kanalizacyjnych w zadaniach, Politechnika Krakowska, Kraków 2006 r.

[3] Kapur K., Pecht M., Reliability Engineering, Wiley, New Jersey, 2014 r.

[4] Wolfram Mathematica, www.wolframalfa.com, {dostęp 12.02.2016 r.}.
[5] Ryżyk I.M., Gradsztejn I.S., Tablice całek sum, szeregów i iloczynów, PWN, Warszawa 1964 r.
[6] Ayyub B. McCuen R. Probability, Statistics, & Reliability for Engineers, CRC Press, New York, 1997.
[7] ICOLD, Katastrofy zapór, analiza statystyczna. Biuletyn nr 99, IMGW, Warszawa 2000 r.
[8] S. Brandt, Metody statystyczne i obliczeniowe analizy danych, PWN, Warszawa 1976.
[9] Dryński T. (red) Ćwiczenia laboratoryjne z fizyki, PWN, Warszawa 1965 r.
[10] Fichtencholz G.M., Rachunek różniczkowy i całkowy T2, PWN, Warszawa 1972.
[11] Opyrchał L, Funkcja niezawodności i czas bezawaryjnej pracy odpowiadający eksponencjalnej intensywności uszkodzeń, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury - Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, t. XXXII, z. 62 (3/I/2015), str. 311-328, DOI:10.7862/rb.2015.116.
[12] Opyrchał L, Funkcja niezawodności i czas bezawaryjnej pracy odpowiadający liniowej intensywności uszkodzeń, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury - Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, t. XXXI, z. 61 (1/2014), str. 173-182, DOI:10.7862/rb.2014.12.

## THE RELIABILITY FUNCTION AND MEAN TIME TO FAILURE RESPECTIVE TO THE EXPONENTIAL FAILURE RATE ON THE EXAMPLE OF DAMS RELIABILITY

**S u m m a r y**

The reliability function plays a fundamental role in the reliability, as it allows to calculate the probability of failure in a given time *t*. To calculate the reliability function should be calculate the integral of the failure rate function. In current practice, the reliability calculation used failure rate function, which is constant in time. This article describes how calculations of the reliability and mean time to failure in the case where the failure rate is an exponential function. The exponential function can be used in the initial phase of the existence of product technology when the intensity of damage decreases rapidly with time. As a result of calculations formulas for the reliability function $R$ and the meat time to failure $T_S$ were obtained. Calculations were performed on the example of dams. On the basis of data on disasters dams the histogram of intensity of damage was built. Histogram was fitted by an exponential function using the least square fitting method. Subsequently, the reliability function, mean time to failure and median time to failure were calculated. As a result of calculations obtained value of the meat time to failure $T_S$ = 53 817 years, and the median time to failure of $T_M$ = 37302 years. Large values of $T_S$ and $T_M$ are due to the fact that there is no data on disasters dams resulting from the aging process.

**Keywords:** dams reliability, dam disaster, reliability function, meat time to failure

DOI:10.7862/rb.2016.213

*Przesłano do redakcji: 30.09.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 309-316

**Krzysztof OSTROWSKI**[1]
**Roman KINASZ**[2]
**Jerzy CIEŚLIK**[3]
**Daniel WAŁACH**[4]
**Bartłomiej AHMIDA**[5]

# NOŚNOŚĆ ELEMENTÓW OSIOWO ŚCISKANYCH NA PRZYKŁADZIE KOLUMN Z BETONU I FIBROBETONU WYSOKOWARTOŚCIOWEGO WZMOCNIONYCH WŁÓKNAMI WĘGLOWYMI

W artykule przedstawiono wpływ stosowania mat z włókien węglowych CFRP (*Carbon Fiber Reinforced Polymer*) na wytrzymałość kolumn wykonanych z betonu oraz fibrobetonu wysokowartościowego określoną w próbie jednoosiowego ściskania. Fibrobeton zaliczany jest do grupy betonów specjalnych, który charakteryzuje się specjalnymi właściwościami oprócz wytrzymałości [1]. Poprzez użycie CFRP możemy zwiększyć wytrzymałość kolumn z betonu wysokowartościowego, co zostało wykazane w pracy i jest zgodne z badaniami innych autorów [2, 3]. Należy podkreślić, że efektywność wzmocnienia konstrukcji zależy od kilku parametrów takich jak: rodzaj betonu i tkaniny wzmacniającej, liczby warstw wzmocnienia, ich sztywności oraz warunków obciążania [4]. Z uwagi na coraz szersze zastosowanie betonu wysokowartościowego ze zbrojeniem rozproszonym w elementach nośnych, w celach porównawczych zaprezentowano również wyniki dla fibrobetonu wysokowartościowego wzmacnianego matami CFRP.

**Słowa kluczowe:** słup zespolony, beton wysokowartościowy, stalowe zbrojenie rozproszone, włókna węglowe, naprężenie-odkształcenie

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Krzysztof Ostrowski, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 126172169; kostrow@agh.edu.pl

[2] Roman Kinasz, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 126172101; rkinasz@agh.edu.pl

[3] Jerzy Cieślik, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 126173536; jerzy@agh.edu.pl

[4] Daniel Wałach, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Geomechaniki, Budownictwa i Geotechniki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 126174768; walach@agh.edu.pl

[5] Bartłomiej Ahmida, Akademia Górniczo-Hutnicza, Katedra Inżynierii Środowiska i Przeróbki Surowców, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; bartlomiej.ahmida@gmail.com

# 1. Wprowadzenie

Beton wysokowartościowy (BWW) jest coraz powszechniej stosowany w budownictwie z uwagi na bardzo dobre parametry wytrzymałościowe, wysoką odporność na czynniki atmosferyczne oraz ścieranie [5]. Dodatkowa obecność zbrojenia rozproszonego w jego strukturze może wpływać na redukcję zarysowań oraz polepszenie właściwości wytrzymałościowych [6, 7], co jest związane z quasi-plastycznością kompozytu [8]. W ostatnim czasie możemy zaobserwować znaczący wzrost stosowania materiałów kompozytowych we wzmacnianiu elementów betonowych. Jest to spowodowane wieloma zaletami tych materiałów, do których możemy zaliczyć wysoką wytrzymałość mechaniczną i moduł Younga, odporność na oddziaływanie środowiska agresywnego, a także wysoki stosunek wytrzymałości do masy oraz dobre właściwości zmęczeniowe [9, 10]. Do niedawna jedną z najpowszechniejszych metod wzmacniania kolumn betonowych było stosowanie płaszczy stalowych wokół nich. Jednakże głównymi wadami tego rozwiązania są niska odporność stali na korozję, wysoki koszt wykonania oraz duży ciężar finalny konstrukcji [11]. W rezultacie stosowanie mat z włókien węglowych do wzmacniania konstrukcji jest alternatywnym i zarazem bardzo efektywnym rozwiązaniem [12].

W związku z powyższym podjęto próbę określenia wpływu wzmocnienia włóknami węglowymi kolumn wykonanych z betonu i fibrobetonu wysokowartościowego na ich nośność i odkształcalność.

# 2. Badania własne

## 2.1. Próbki i materiały

Przyjęto, że badania zostaną przeprowadzone na czterech grupach próbek: z betonu wysokowartościowego (BWW), z fibrobetonu wysokowartościowego (FBWW), z betonu wysokowartościowego wzmacnianego matami z włókien węglowych (MBWW) oraz z fibrobetonu wysokowartościowego wzmacnianego matami z włókien węglowych (MFBWW). W ramach każdej z grup przygotowano po trzy nietypowe próbki walcowe o wysokości h = 400 mm i średnicy $\phi$ = 150 mm.

Tabela 1 przedstawia skład mieszanki betonowej. Materiały, z których wykonano mieszankę betonową były następujące: cement portlandzki CEM I 42,5R, kruszywo grube - diabaz ($\phi$ 2-8), kruszywo drobne - piasek drobny ($\phi$ 0-2), dodatek do betonu zawierający mikrokrzemionkę SikaFume HR/TU, superplastyfikator Sikament FM6. Połowa próbek zawierała stalowe mikrozbrojenie rozproszone w ilości 1,5% objętościowo. Stosunek wodno-cementowy wynosił 0,4.

W rezultacie po 3 próbki z betonu i fibrobetonu wysokowartościowego zostały przebadane w celach porównawczych, pozostałe 6 kolumn wzmocnionych CFRP przebadano w celu determinacji wpływu mat na wytrzymałość.

Tabela 1. Skład mieszanki betonowej

Table 1. Proportions of concrete mixture

| Mieszanka | Cement [kg/m$^3$] | Piasek [kg/m$^3$] | Kruszywo [kg/m$^3$] | Sika Fume [kg/m$^3$] | Superplastyfikator [kg/m$^3$] | Woda [kg/m$^3$] | Włókna stalowe [% obj.] |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| BWW | 500 | 650 | 1000 | 60 | 10 | 200 | - |
| FBWW | 500 | 650 | 1000 | 60 | 10 | 200 | 1,5 |

## 2.2. Przygotowanie i pielęgnacja próbek

Kolumny betonowe dojrzewały w kąpieli wodnej przez okres 28 dni, po czym wysychały przez 7 dni. Następnie część z nich została oklejona matami z włókien węglowych Sikawrap301c przy użyciu żywicy epoksydowej Sikadur330. Proces twardnienia żywicy następował w temperaturze 20°C i trwał kolejne 7 dni, co pozwoliło na osiągnięcie pełnej wytrzymałości kompozytu. W celu zapewnienia odpowiedniego kontaktu pomiędzy kompozytem, a powierzchnią betonu, została ona wypiaskowana i oczyszczona. Wilgotność powierzchni próbek wynosiła ok. 5%. Każda ze wzmacnianych próbek została owinięta jednokrotnie w sposób ciągły z zakładem 150 mm. Wiek kolumn w momencie badań wynosił 6 tygodni. Parametry wytrzymałościowe mat z włókien węglowych i żywicy epoksydowej zestawiono w tabelach 2 i 3.

Tabela 2. Charakterystyczne parametry tkaniny Sikawrap301c [13]

Table 2. Characteristic parameters of Sikawrap301c [13]

| | |
|---|---|
| Ciężar powierzchniowy | 304 g/m$^2$ ± 10 g/m$^2$ |
| Obliczeniowa grubość maty | 0,167 mm (zredukowana grubość włókien węglowych) |
| Gęstość włókien | 1,82 g/cm$^3$ |
| Właściwości włókien (wartości w kierunku wzdłuż włókien wg PN-EN ISO 10618) | Minimalny moduł sprężystości E 230 000 MPa |
| | Minimalna wytrzymałość na rozciąganie 4 900 MPa |
| | Wydłużenie przy zerwaniu 1,7% |

Tabela 3. Charakterystyczne parametry żywicy epoksydowej Sikadur330 [13]

Table 3. Characteristic parameters of epoxy resin Sikadur330 [13]

| | |
|---|---|
| Gęstość | ~ 1,3 ± 0,1 kg/dm$^3$ (Składniki A + B w + 23 °C) |
| Wytrzymałość na rozciąganie | 30 MPa ( po 7 dniach w + 23 °C) (PN-EN ISO 527-3) |
| Przyczepność do podłoża | Przełom w betonie (> 4 MPa) (PN-EN ISO 4624)<br>na wypiaskowanym podłożu betonowym: > 1 dzień |
| Moduł sprężystości E | Zginanie: 3 800 MPa (przy + 23 °C/ 7 dni) (PN-EN 1465) |
| | Rozciąganie: 4 500 MPa (przy + 23 °C/ 7 dni) (PN-EN ISO 527-3) |
| Wydłużenie przy zerwaniu | 0,9% ( po 7 dniach w + 23 °C) (PN-EN ISO 527-3) |

### 2.3. Technika pomiarowa i badania wytrzymałościowe

Kolumny betonowe zostały przebadane w teście jednoosiowego ściskania na serwo-sterowalnej sztywnej maszynie wytrzymałościowej MTS 815. Badania wykonano w pokojowej temperaturze 20°C i wilgotności 60%, ze stałym przyrostem odkształcenia kolumn rzędu $5\times10^{-5}[s^{-1}]$. Siła osiowa została zdeterminowana przy użyciu przetwornika siły. Przemieszczenia poprzeczne i osiowe określono dla całych kolumn przy użyciu czujników indukcyjnych LVDT (rys. 1).



Rys. 1. Maszyna wytrzymałościowa MTS użyta do badań oraz sposób pomiaru podłużnych i poprzecznych przemieszczeń kolumn.

Fig. 1. MTS testing system for uniaxial compression tests and measurements of axial and radial column displacements.

## 3. Wyniki badań

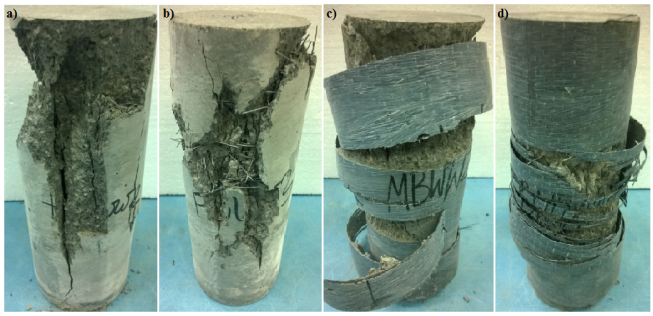
Wyniki badań zostały zestawione w tabeli 4. Naprężenia maksymalne określono dla przekrojów poprzecznych poszczególnych kolumn z pominięciem grubości mat CFRP. Moduł sprężystości kolumn został wyznaczony w zakresie od 15% do 33% wartości maksymalnych naprężeń [14] bez wcześniejszych cykli

Tabela 4. Podsumowanie wyników badań prowadzonych na nietypowych próbkach walcowych

Table 4. Summary of the experimental results conducted on non-standard cylindrical samples

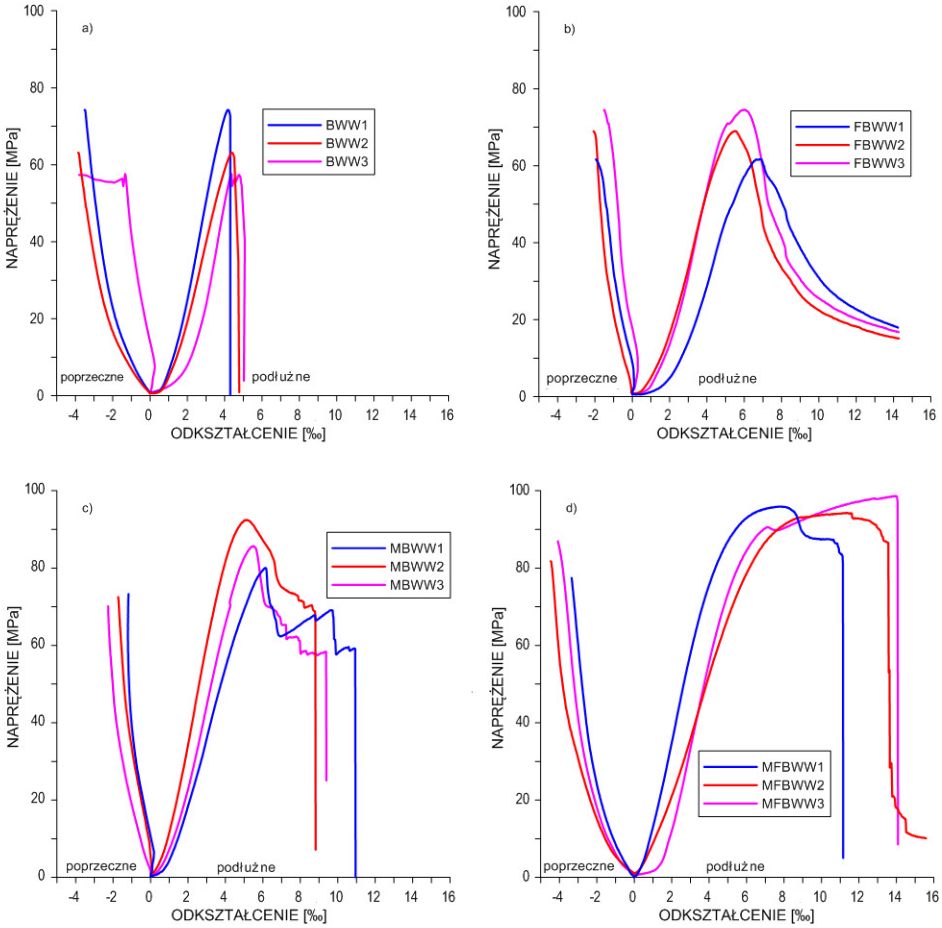
| Grupa próbek | Średnia wytrzymałość na ściskanie [MPa] | Odchylenie standardowe średniej z próby [MPa] | Średnie odkształcenia osiowe podczas zniszczenia [‰] | Średni moduł sprężystości E [GPa] |
|---|---|---|---|---|
| BWW | 64,24 | 6,23 | 4,28 | 15,29 |
| FBWW | 68,38 | 2,77 | 6,02 | 14,18 |
| MBWW | 86,08 | 4,28 | 5,62 | 19,04 |
| MFBWW | 96,29 | 1,58 | 10,99 | 19,27 |

obciążania i odciążania próbek, dlatego też uzyskane wyniki mają charakter jakościowy. Fotografie zamieszczone na rys. 2 przedstawiają zniszczenie charakterystyczne dla każdej z analizowanych grup próbek. Możemy zauważyć, iż kolumny zniszczyły się w sposób analogiczny do próbek badanych w warunkach normowych [15], o czym świadczy powstanie stożków na granicy trójosiowego i jednoosiowy stanu naprężenia. Zniszczenie mat CFRP nastąpiło w najsłabszym miejscu próbki z wyzwoleniem ogromnej ilości energii. Wykresy a) - d) zestawione na rys. 3 przedstawiają zależność naprężenie-odkształcenie odpowiednio dla kolumn BWW, FBWW, MBWW oraz MFBWW. Średnia wytrzymałość kolumn BWW wynosi 64,24 MPa przy średnich odkształceniach osiowych równych 4,28‰. Dla kolumn FBWW wartości te są odpowiednio większe o 6% i 41%. Stosowanie mat CFRP w kolumnach MBWW spowodowało 34% wzrost uśrednionych wytrzymałości i 31% wzrost odkształceń w porównaniu do BWW. W przypadku kolumn MFBWW wytrzymałość na ściskanie była o 41% wyższa niż FBWW, a odkształcenia przy których nastąpiło zniszczenie były aż o 83% wyższe. Stosowanie mat CFRP spowodowało średni wzrost modułu sprężystości kolumn o 30%.




Rys. 2. Typowe zniszczenie kolumn: BWW (a), FBWW (b), MBWW (c), MFBWW (d)

Fig. 2. Typical failure modes of BWW (a), FBWW (b), MBWW (c), MFBWW (d)




Rys. 3. Zależność naprężenie-odkształcenie dla BWW (a), FBWW (b), MBWW (c), MFBWW (d)

Fig. 3. Axial stress–strain relationships for BWW (a), FBWW (b), MBWW (c), MFBWW (d)

## 4. Wnioski

W artykule przedstawiono badania wytrzymałościowe kolumn z betonu i fibrobetonu wysokowartościowego wzmocnionych matami CFRP w teście jednoosiowego ściskania. Bazując na uzyskanych wynikach można sformułować następujące wnioski:

1. Kolumny wzmocnione matami CFRP wykonane na bazie betonu wysokowartościowego niszczą się poprzez pęknięcie CFRP w najsłabszym miejscu, któremu towarzyszy nieznaczna delaminacja włókien węglowych od powierzchni betonu.
2. W przypadku kolumn MBWW uzyskujemy znaczny wzrost wytrzymałości na ściskanie. Charakterystyka pracy tych kolumn jest zbliżona do liniowo sprę-

żystej, co zostało również zaobserwowane w podobnych badaniach [2, 3], w przeciwieństwie do wzmacnianych tym samym sposobem kolumn z betonu zwykłego, które pracują w zakresie sprężysto-plastycznym ze wzmocnieniem. Ponadto nie zaobserwowano charakterystycznego momentu rozpoczęcia pracy włókien węglowych, który objawia się innym nachyleniem wykresu naprężenie-odkształcenie, zgodnie z wynikami badań opisanymi w pracy [16].

3. Stosowanie włókien stalowych w kolumnach z betonu wysokowartościowego wzmacnianych tkaniną CFRP powoduje, że elementy te wydają się pracować w zakresie quasi-sprężysto-plastycznym. Odkształcenia maksymalne są 157% wyższe niż w przypadku kolumn BWW.

## Literatura

[1] Ostrowski K.: Wpływ zbrojenia rozproszonego na wytrzymałość betonu zwykłego. II Ogólnopolska Studencka Konferencja Budowlana, Poznań, 2015.

[2] Berthet J.F., Ferrier E., Hamelin P.: Compressive behavior of concrete externally confined by composite jackets. Part A: experimental study. Construction and Building Materials, 2005.

[3] Chikh N., Gahmous M., Benzaid R.: Structural Performance of High Strength Concrete Columns Confined with CFRP Sheets. Proceedings of the World Congress on Engineering, London, 2012.

[4] Bogdanovic A., Strengthening Circular Concrete Columns Using FRP Sheets-Applications. Composite Materials in Civil Engineering, 2002.

[5] Wałach D., Dybeł P., Jaskowska-Lemańska J.: Diagnostyka konstrukcji budownictwa transportowego wykonanych z betonów wysokowartościowych, Logistyka, 2014.

[6] Smarzewski P., Poręba J., Rentflejsz A.: Badania doświadczalne tarcz żelbetowych z betonu wysokowartościowego z dodatkiem włókien. Budownictwo i Architektura, 2012.

[7] Kinash R., Bilozir V. *Deformational calculation method of bearing capability of fiber-concrete steel bending elements*. Technical Transactions, Architecture, Politechnika Krakowska, 2014.

[8] Katzer J.: Wpływ włókien stalowych na właściwości wybranych kompozytów cementowych. Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Koszalińskiej, Koszalin, 2008.

[9] Mayer P., Kaczmar J., Właściwości i zastosowania włókien węglowych i szklanych. Tworzywa Sztuczne i Chemia, nr 6, 2008.

[10] Shehata I., Carneiro L., Shehata L., Strength of short concrete columns confined with CFRP sheets. Materials and Structures, Volume 35, 2002.

[11] Karbhari M., Douglas A.E., Effects of Short-Term Environmental Exposure on Axial Strengthening Capacity of Composite Jacketed Concrete. American Society for Testing and Materials, 1995.

[12] Mirmiran A., Yuan W., Chen X., Design for Slenderness in Concrete Columns Internally Reinforced with Fiber-Reinforced Polymer Bars. ACI Structural Journal, 2002.

[13] www.sika.com {dostęp 18.05.2014 r.}.
[14] EN 12390-13:2013, Testing hardened concrete, Part 13: Determination of secant modulus of elasticity in compression.
[15] PN-EN 12390-3:2011, Badania betonu - Część 3: Wytrzymałość na ściskanie próbek do badań.
[16] Ostrowski K. Kinasz R., Cieślik J., Wałach D.: The influence of CFRP sheets on strength of short columns produced from normal strength concrete and fibre reinforced concrete [in press]. Technical Transaction, Civil Engineering, 2016.

*Podziękowania*

*Autorzy pragną podziękować Panu mgr inż. Markowi Kawalec z firmy SIKA Poland za przekazanie materiałów kompozytowych do badań oraz za zapewnione wsparcie techniczne.*

*Artykuł opracowano w ramach pracy statutowej WGiG AGH w Krakowie nr 11.11.100.197.*

## BEARING CAPACITY OF CONCRETE COLUMNS PRODUCED FROM HIGH PERFORMANCE CONCRETE AND HIGH PERFORMACNCE FIBRE REINFORCED CONCRETE CONFINED BY CFRP SHEETS UNDER UNIAXIAL COMPRESSION

**S u m m a r y**

This article present the influence of Carbon Fibre Reinforced Polymer sheets (CFRP) on the strength of high performance concrete (HPC) and high performance fibre reinforced concrete (HPFRC) columns determined in uniaxial compression. Fibre reinforced concrete (FRC) belongs to a special concrete group which is characterized by special properties without strength [1]. By using CFRP we can increase strength of columns produced by HPC what is shown in the article and is in line with literature [2, 3]. The confinement effectiveness of externally bonded Fibre Reinforced Polymer (FRP) sheets depends on different parameters, such as the type of concrete and FRP, thickness of the FRP jackets (number of layers), stiffness of FRP and loading conditions [4]. Due to the increasing usage of HPC with steel microfibres in load-carrying concrete elements, for comparative purposes authors have presented a study of HPFRC columns.

**Keywords:** composite column, high performance concrete, steel microfibers, carbon fibre reinforced polymer material, stress-strain

DOI:10.7862/rb.2016.214

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2015, s. 317-328

**Agnieszka PĘKALA**[1]
**Joanna CZARNOTA**[2]
**Agnieszka WOTA**[3]

# OCENA STANU ŚRODOWISKA GLEBOWEGO W SĄSIEDZTWIE ZAKŁADU WSK–PZL RZESZÓW S.A

Ocena stanu środowiska glebowego wokół zakładu WSK - PZL Rzeszów S.A, została przeprowadzona w oparciu o wyniki analiz zawartości Cd, Pb, Cu, Mn, Ni, Cr i Zn oraz pH gleb. Materiał glebowy pobrano w strefie wpływów emisji przemysłowych w odległości 50 – 500 m od potencjalnego emitora zanieczyszczeń, jakim może być zakład WSK PZL – Rzeszów. Pierwiastki śladowe oznaczono metodą ICP, przy użyciu spektrometru emisyjnego ze wzbudzeniem plazmowym ICP-OES GBC Quantima E1330. Oznaczenie pH wykonano przy użyciu pehametru CP-105 waterproof ELMETRON IP67 zgodnie z normą PN-ISO 10390:1997. W celu określenia składu fazowego oraz stwierdzenia obecności ewentualnych składników antropogenicznych w badanych glebach, wykonano badania mineralogiczne przy zastosowaniu: dyfraktometru rentgenowskiego oraz mikroskopu elektronowego (SEM) HITACHI S-3400 N z mikroanalizatorem rentgenowskim (EDX). Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r w sprawie standardów jakości gleb i standardów jakości ziemi,( Dz. U. 2002, Nr 165 poz. 1359), opróbowane gleby należą do grupy B, a zawarte w nich pierwiastki śladowe w przewadze nie przekraczają wartości normowych wg Rozporządzenia. Porównując jednak uzyskane wyniki z danymi zawartymi w „Atlasie geochemicznym Polski" dla gleb miasta Rzeszowa, można stwierdzić we wszystkich próbkach, podwyższone stężenie dla Ni (zawartość średnia 34,90 mg/kg s.m.) i Cr (zawartość średnia 21,13 mg/kg s.m.), w stosunku do danych zawartych w Atlasie (Ni – 20 mg/kg s.m. i Cr – 10 mg/kg s.m.). Uzyskane wyniki kwasowości gleb pozwalają zaklasyfikować badany materiał do gleb o charakterze lekko kwaśnych.

**Słowa kluczowe:** geochemia, monitoring środowiska, pierwiastki śladowe, gleby

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Agnieszka Pękala, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, ul. Poznańska 2, 35-084 Rzeszów, apekala@prz.edu.pl

[2] Joanna Czarnota, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

[3] Agnieszka Wota, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

## 1. Wprowadzenie

Gleba jest podstawowym elementem środowiska przyrodniczego, a jej właściwości (fizyczne, chemiczny i biologiczne) formowane przez procesy glebotwórcze są w stanie równowagi dynamicznej. Naruszanie tej równowagi prowadzi do negatywnych zmian w środowisku naturalnym. Czynnikami zakłócającymi stan równowagi środowiska glebowego są niewątpliwie zanieczyszczenia metalami ciężkimi pochodzącymi z zakładów przemysłowych, o lokalnym oraz regionalnym zasięgu. Zaznaczyć należy, że przemysłowe emisje gazów oraz pyłów stanowią skoncentrowane źródło zanieczyszczeń metalonośnych. Duży wpływ na ten typ zanieczyszczeń ma również transport, komunikacja, nawożenie gleb oraz dogruntowe usuwanie odpadów [l]. Rozpuszczalność i migracja wszystkich metali jest silnie uzależniona między innymi od wartości pH gleb. Rozpuszczalność większości metali zmniejsza się wraz ze wzrostem pH, co z kolei prowadzi do zmniejszenia ich dostępności. Krytyczną fazą dla uruchomiania metali jest faza kwaśna. Spadek wartości odczynu, prowadzi miedzy innymi do większej mobilności takich metali, jak: kadm, miedź, cynk, ołów i rtęć [2, 3]. Nieco inaczej zachowuje się chrom, który jest bardziej mobilny przy wyższym odczynie. W środowisku gruntowym może, on tworzyć szereg odmian o różnym stopniu toksyczności i być częściowo unieruchamiany w szkielecie gruntowym [4].

Badania stanu gleb na obszarze województwa podkarpackiego prowadzone są w cyklach kilkuletnich. Okręgowa Stacja Chemiczno – Rolnicza w Rzeszowie wykonuje oznaczenia zasobności w makroelementy (fosforu, potasu i magnezu) oraz pH gleb, co cztery lata. Bardziej szczegółowy monitoring gleb jest wykonywany na zlecenie GIOŚ przez Instytut Uprawy, Nawożenia i Gleboznawstwa w Puławach w cyklu 5 letnim od 1995r. W ramach programu „Monitoring chemizmu gleb ornych Polski" [5], zgodnie z ustawą z dnia 27 kwietnia 2001 Prawo ochrony środowiska [Dz. U. 2001 nr 62 poz.627 z p.zm] oraz Dyrektywą 2010/75/UE [Dz. U. L 334/17] na terenie woj. podkarpackiego zlokalizowano 14 punktów pomiarowo – kontrolnych [6,7]. Jednakże zgodnie z danymi przedstawionymi w opracowaniu „Monitoring chemizmu gleb ornych w Polsce w latach 2010 – 2012", na terenie miasta Rzeszów badania jakości gleb nie były prowadzone. Również „Program ochrony środowiska Miasta Rzeszów na lata 2013 – 2016 z uwzględnieniem zagadnień zrealizowanych w 2013 r. oraz z perspektywą na lata 2017 – 2020" nie uwzględnia dla miasta Rzeszów tego typu badań [8]. Ostanie badania gleb wokół zakładu WSK PZL Rzeszów były wykonane w 1995 r., w ramach pracy autorstwa Kaniuczek i Hajduka pt "Kadm i ołów w niektórych glebach południowo – wschodniej Polski" [9]. Opracowanie to podaje jedynie zawartości kadmu w glebach z głębokości 0-25 cm, w zakresie 0,35 – 0,64 przy wartości średniej 0,46 mg/kg.s.m i ołowiu w przedziale 10,4-18,2 przy wartościach średnich 14,1 mg/kg s.m. Szczególną uwagę na za-

gadnienia zawartości pierwiastków śladowych w glebach wokół zakładów przemysłowych woj. podkarpackiego zwrócono w pracach Pękali [10,11].

Ocenę środowiska gruntowego wokół zakładu WSK – PZL Rzeszów S.A. przeprowadzono w oparciu o wyznaczone zawartości metali ciężkich: Cd, Pb, Cu, Mn, Ni, Cr i Zn oraz pH gleb.

### 1.1. Analiza obszaru badań

Gleby na obszarze miasta Rzeszowa należą do jednych z najlepszych gleb ornych w regionie pod względem wartości użytkowej. Należą one do I, II, IIIa i IIIb klasy użytków rolnych. Gleby pozostałych klas bonitacyjnych posiadają niewielki udział na omawianym obszarze. Obszar badań czyli teren zlokalizowany wokół zakładu WSK - PZL Rzeszów, znajduje się na terasie nadzalewowej rzeki Wisłok (Rys.1). Dominuje na niej zabudowa mieszkaniowa i przemysłowa. Terasa nadzalewowa Wisłoka zbudowana jest z plejstoceńskich utworów rzecznych. Można zakwalifikować je jako żwiry o miąższości 2÷8 m, zalegające na iłach mioceńskich. Pokrywa je, występująca jako soczewki, warstwa utworów piaszczystych. Powierzchnia utworów piaszczysto – żwirowych jest zróżnicowana, ponieważ w jej obszarze możemy spotkać grunty organiczne takie jak torfy, namuły lub mady próchnicze. Wszystkie te utwory pokrywają osady: pyły piaszczyste, pyły, gliny pylaste lokalnie przewarstwione gruntami organicznymi. Miąższość całej serii utworów osiąga głębokość ok. 11 m. W bezpośrednim sąsiedztwie Zakładu WSK – PZL Rzeszów S.A. znajduje się rezerwat przyrody Lisia Góra. To jedyny obszar leśny zlokalizowany niedaleko osiedli mieszkaniowych w południowej części Rzeszowa. Rezerwat leży w bezpośrednim sąsiedztwie zalewu, w ciągu terenów ekologicznych i wypoczynkowych obejmujących Dolinę Wisłoka. Obszar Lisiej Góry budują lessy występujące w postaci żółtych lub żółto – szarych pyłów oraz pyłów piaszczystych.

### 1.2. WSK PZL -Rzeszów S. A. – działalność, a ochrona środowiska

WSK PZL – Rzeszów S. A. to przedsiębiorstwo istniejące od 1937 roku, specjalizujące się w produkcji kompleksów lotniczych a także jednostek napędowych. Działalność Zakładu obejmuje obszary:

- lotniczy,
- narzędziowy oraz utrzymania ruchu,
- produkcyjny oraz serwis silnikowy,
- przekładniowy,
- odlewów precyzyjnych,
- naprawy elementów silników PWC [12].

Zakład położony jest w południowej części miasta Rzeszów, nieopodal Zapory na Wisłoku oraz dużego skupiska ludzkiego, jakim jest Politechnika Rzeszowska (rys. 1). Na terenie zakładu znajdują się 94 budynki zajmujące łączną powierzchnię użytkową 900 000 $m^3$. Na stronie internetowej Zakładu można

znaleźć informacje świadczące o tym, że Zakład ten jest świadomy negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Zakład realizuje program ochrony środowiska poprzez:

- zmniejszenie emisji szkodliwych substancji do atmosfery,
- ochronę środowiska glebowego oraz wód podziemnych i powierzchniowych,
- prowadzenie gospodarki odpadami w sposób bezpieczny dla środowiska, gwarantujący właściwe ich segregowanie oraz ponowne wykorzystanie, ewentualnie utylizację, według wymogów ochrony środowiska,
- wydajne oraz ekonomiczne gospodarowanie surowcami, energią i wodą [12].

W pobliżu Zakładu znajduje się droga krajowa 94 o dużym natężeniu ruchu, a także inne przedsiębiorstwa, które również mogą oddziaływać negatywnie na środowisko. Najważniejsze z nich, to:

- Elektromontaż Kraków SA. – instalacje elektryczne, FENICE Poland Sp. zoo – usługi elektryczne,
- SKANSKA – instalacje budowlane,
- Polimarky Sp. z. o.o. Sp. K. – tworzywa sztuczne,
- Lafarge – dostawca gotowych mieszanek betonowych,
- Inżynieria Rzeszów – firma budowlana,
- Eko-Top Rzeszów - utylizacja odpadów przemysłowych i medycznych.

## 2. Metodyka badań terenowych i laboratoryjnych

Materiał glebowy został pobrany z terenów będących w strefie wpływu emisji przemysłowych, w odległości 50-500 m od Zakładu WSK - PZL Rzeszów S.A., zgodnie z normą PN-ISO 10381-2:2002[13]. Dokładną lokalizację każdego z punktów wprowadzono do satelitarnego odbiornika GPS model map 60CSX i zaznaczono na podkładzie ortofotomapy (rys. 1). Z badanego obszaru pobrano 6 próbek gleb. Próbka PR 5 jako jedyna była pobrana z głębokości około 50 cm z tego samego miejsca co PR 6 z gł. 20 cm. W trakcie wyboru materiału do badań sugerowano się obecnością miejsc przeznaczonych pod uprawy jak np. ogródki działkowe. Mineralizacja próbek przebiegała zgodnie z normami PN-ISO 11047 (2001) oraz PN-ISO 11466 (2002) [14,15]. W zmineralizowanym materiale glebowym, przy zastosowaniu spektrometru emisyjnego ze wzbudzeniem plazmowym ICP-OES GBC Quantima E1330, oznaczono pierwiastki śladowe. Oznaczenie pH wykonano przy użyciu pehametru CP-105 waterproof ELMETRON IP67 zgodnie z normą PN-ISO 10390:1997 [16]. W celu określenia składu fazowego oraz obecności ewentualnych składników antropogenicznych w badanych glebach, wykonano badania mineralogiczne przy zastosowaniu: dyfraktometru rentgenowskiego oraz mikroskopu elektronowego (SEM) HITACHI S-3400 N z mikroanalizatorem rentgenowskim (EDX).




Rys. 1. Lokalizacja poboru próbek na wybranym obszarze badań przygotowana na podkładzie ortofotomapy (WMS geoportal.gov.pl) [17]

Fig. 1. Location of sampling points on the selected area of research prepared on orthophoto base-map (WMS geoportal.gov.pl) [17]

## 3. Analiza i interpretacja wyników

W badanych glebach oznaczono zawartość: Cd, Pb, Cu, Mn, Ni, Cr i Zn. Ponadto dla gleb zostały wyznaczone wartości ich kwasowości oraz w oparciu o badania mineralogiczne ustalono ich skład fazowy.

### 3.1. Zawartość pierwiastków śladowych w materiale glebowym

Biorąc pod uwagę wymagania zawarte w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi [18], można stwierdzić, iż zawartości pierwiastków śladowych w glebach w większości uzyskanych wyników nie przekracza dopuszczalnych wartości za wyjątkiem próbki nr 1(tab. 1).W próbkach gleb leśnych wytworzonych z lessów położonych na terenie Lisiej Góry, można zauważyć wyższą koncentracje badanych pierwiastków w warstwie gleby 0-20 cm. Akumulacja pierwiastków śladowych w poziomach próchniczych gleb leśnych jest prawdopodobnie pochodzenia biogenicznego, jak również jest efektem pochłaniania antropogenicznych zanieczyszczeń przez środowisko leśne. Kumulacja biologiczna jest jednym z ważniejszych, chociaż nie jedynym czynnikiem wpływającym na groma-

dzenie się pierwiastków śladowych w poziomach ściółek leśnych [19]. Uzyskane wyniki porównano również z danymi zawartymi w Atlasie Geochemicznym na terenie miasta Rzeszowa. Z przeprowadzonej analizy wynika, że badane gleby wykazują podwyższone koncentracje dla Ni i Cr. Zawartość Ni mieści się w przedziale od 66,81 do 16,42 mg/kg s.m. przy średniej wartości 34,9 mg/kg s.m. Zawartość chromu w badanych glebach mieści się w zakresie od 33,26 do 11,18 mg/kg s.m, przy średnim udziale 21,13 mg/kg s.m. Dane zawarte w Atlasie podają stężenie tych pierwiastków dla gleb Rzeszowa odpowiednio, 20 mg/kg s.m. dla Ni i 10 mg/kg s.m. dla Cr [20].

Tabela 1. Zawartość metali ciężkich w glebach wokół Zakładu WSK –PZL Rzeszów S.A.
Table 1. Concentartion of heavy metals in soils around of WSK – PZL Rzeszow S.A.

| **Nr próbki** | **Zawartość metali ciężkich wokół Zakładu WSK -PZL Rzeszów [mg/kg s.m]** | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Cd | Pb | Cu | Mn | Ni | Cr | Zn |
| 1 | 0,71 | 46,59 | 50,54 | 438,53 | 66,81 | 33,26 | 102,05 |
| 2 | 0,09 | 8,80 | 11,84 | 195,98 | 18,43 | 11,18 | 49,80 |
| 3 | 0,07 | 21,44 | 12,70 | 152,98 | 16,42 | 13,19 | 33,94 |
| 4 | 0,15 | 18,06 | 19,57 | 341,48 | 36,24 | 25,7 | 89,80 |
| 5 | 0,15 | 13,97 | 11,83 | 208,11 | 20,15 | 15,87 | 30,64 |
| 6 | 0,26 | 18,60 | 19,01 | 282,16 | 51,365 | 27,57 | 60,85 |

Analiza uzyskanych wyników pozwala również stwierdzić zmniejszenie średniej zawartość Cd w glebach wokół Zakładu w stosunku do danych z 1995 r. Średnia wartość tego pierwiastka obecnie wynosi 0,24 mg/kg s.m, zaś wcześniejsze dane podają wartość średnią 0,46 mg/kg s.m. Średnia zawartość Pb w glebach uległa zaś zwiększeniu z 14,1 mg/kg s.m. w 1995 r. do 21,24 mg/kg s.m [9].

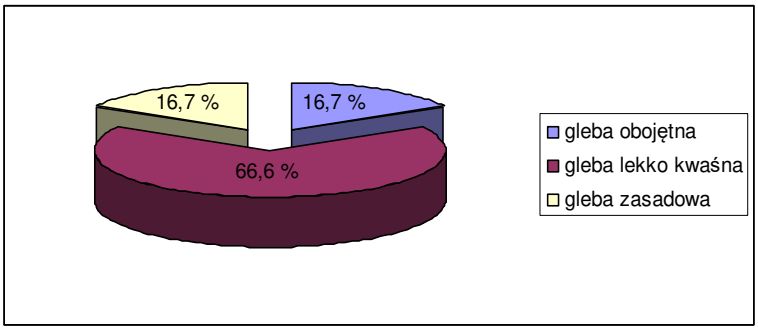
### 3.2. Oznaczenie pH w badanych glebach

Odczyn gleb oznaczanych w KCl (tab. 2) mieści się w przedziale 5,81 ÷ 7,71 i wskazuje, że większość badanych gleb wykazuje odczyn lekko kwaśny. Jedynie PR1 wykazuje odczyn zasadowy przy pH 7,71. Uzyskane wyniki pomiaru pH gleby przedstawiono w formie wykresu procentowego udziału odczynu pH oznaczonego w KCl. Z przeprowadzonej analizy wynika, że 66,6 % badanych gleb wokół Zakładu WSK – PZL Rzeszów S.A. wykazuje cechy gleb lekko kwaśnych (rys. 2).

Tabela 2. Kwasowość gleb wokół Zakładu WSK-PLZ Rzeszów S.A.

Table 2. Soils acidity in the neighbourhood of WSK –PZL Rzeszow S.A.

| Numer punktu pomiarowego | Oznaczenie pH w KCl | Oznaczenie pH w $H_2O$ |
|---|---|---|
| PR1 | 7,71 | 8,00 |
| PR2 | 6,07 | 6,72 |
| PR3 | 5,81 | 7,05 |
| PR4 | 6,20 | 7,26 |
| PR5 | 6,04 | 7,07 |
| PR6 | 6,06 | 6,87 |

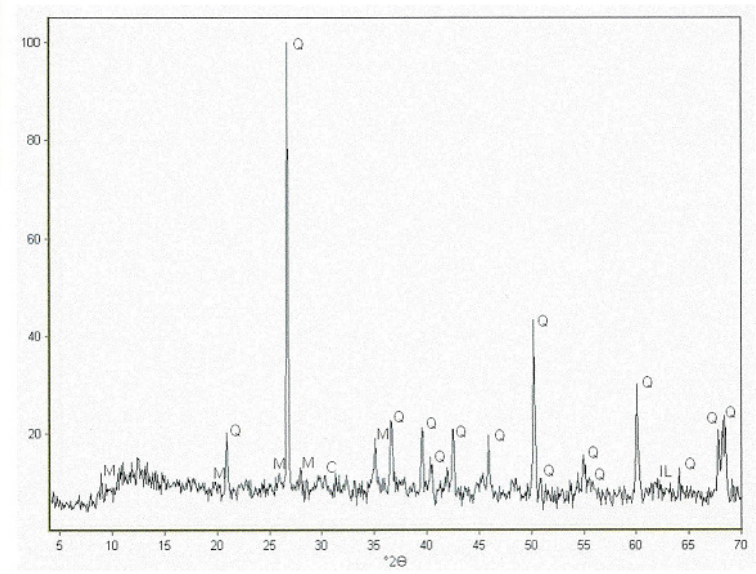



Rys. 2. Procentowy udział gleb o różnym poziomie kwasowości

Fig. 2. Percentage share of soils with different levels of acidity

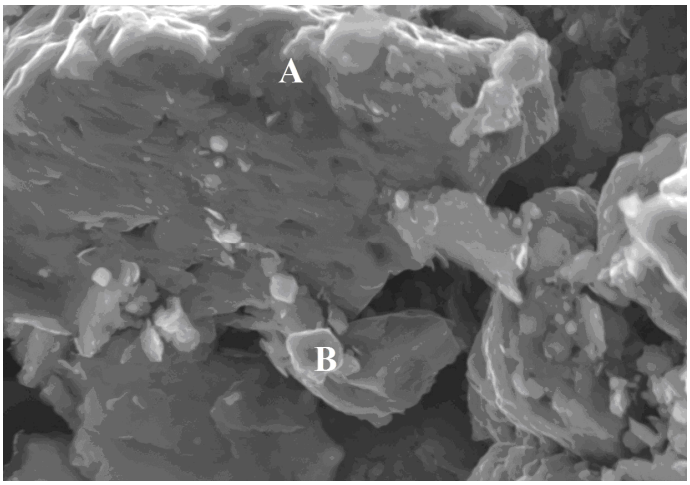
### 3.3. Skład fazowy badanych gleb

Główna fazą mineralną gleb z obszaru Zakładu WSK –PLZ Rzeszów, jest kwarc. Ponadto na dyfraktogramie stwierdzono refleksy pochodzące od kalcytu, minerałów ilastych i muskowitu (rys.3). Przebieg krzywej dyfraktometrycznej i wysokie tło sugeruje, że w badanej próbce mogą być obecne minerały żelaza, jednak ich niska koncentracja nie pozwala na dokładną identyfikację. Analiza zdjęć w SEM potwierdziła w badanych glebach, obecność kwarcu (rys. 4, 5), oraz związków żelaza (rys. 4,6).



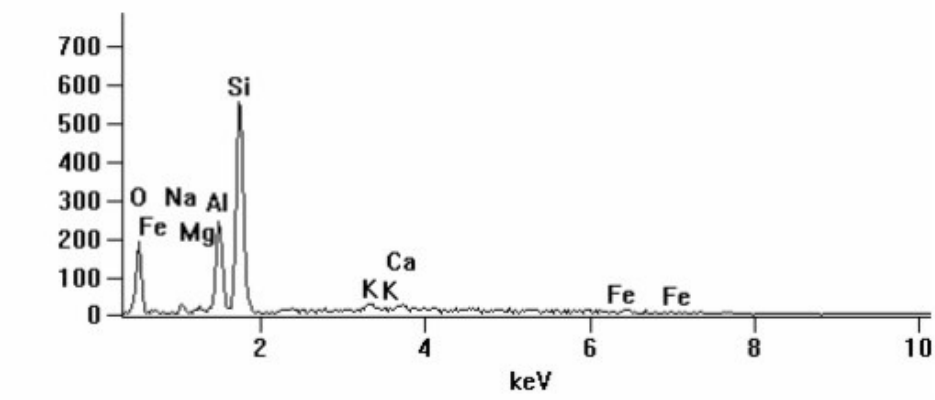

Rys. 3. Dyfraktogram gleby poddanej analizie z rejonu Zakładu WSK-PLZ Rzeszów (próbka 5). Objaśnienia: Q – kwarc, C – kalcyt, M- minerały z grupy mik, IL - minerały ilaste

Fig. 3. X-ray pattern of analysed soil near of WSK –PZL Rzeszow S.A. Explanations: Q – quartz, C – calcite, M - minerals from micas group, IL - clay minerals



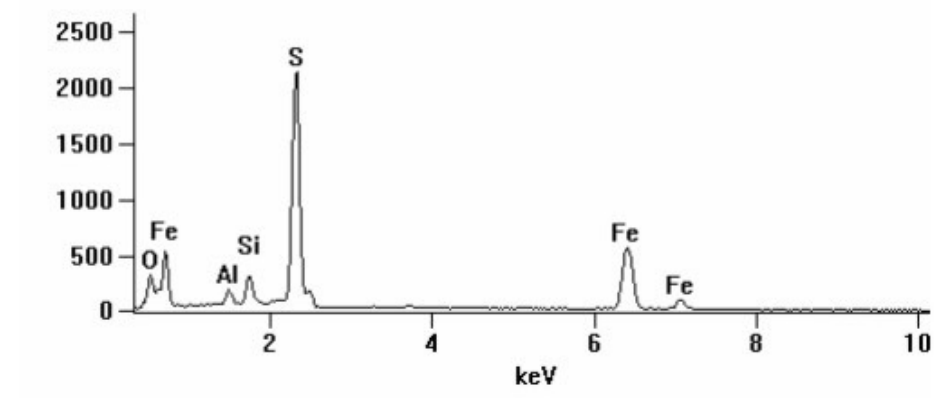

Rys. 4. Ziarna detrytycznego kwarcu (A), na powierzchni widoczne związki Fe (B). Obraz SEM (próbka 4)

Fig. 4. Grains of detritic Quartz (A), on the surface visible Fe minerals (B).SEM




Rys. 5. Analiza składu chemicznego z obszaru A. SEM/ EDX (próbka 4)

Fig. 5. Analysis of the chemical composition of the area A. SEM/EDX




Rys. 6. Analiza składu chemicznego z obszaru B. SEM/EDX (próbka 4)

Fig. 6. Analysis of the chemical composition of the area B. SEM/EDX

## 4. Podsumowanie

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleb i standardów jakości ziemi ( Dz. U. 2002, Nr 165 poz. 1359), opróbowane gleby należą do grupy B. Zawartość metali ciężkich w badanym materiale, poza próbka nr 1 nie przekracza wartości normowych wg Rozporządzenia. Porównując uzyskane wyniki z danymi zawartymi w „Atlasie geochemicznym Polski" dla gleb miasta Rzeszowa, można stwierdzić we wszystkich próbkach, podwyższone stężenie dla Ni (zawartość średnia 34,90 mg/kg s.m.) i Cr (zawartość średnia 21,13 mg/kg s.m.), w stosunku do danych zawartych w Atlasie (Ni – 20 mg/kg s.m. i Cr – 10 mg/kg s.m) [20]. Uzyskane wyniki kwasowości gleb pozwalają zaklasyfikować badany materiał do gleb o charakterze lekko kwaśnych. Wzrost pH środowiska glebowego, może

w konsekwencji doprowadzić do wysokiej koncentracji badanych pierwiastków śladowych, w poszczególnych komponentach środowiska [21]. Wyniki badań mineralogicznych wskazują, że główną faza mineralną badanych gleb jest kwarc oraz kalcyt. Ponadto w badaniach rentgenograficznych stwierdzono minerały ilaste oraz minerały z grupy mik. Badania z zastosowaniem SEM/EDX pozwoliły ponadto zidentyfikować na powierzchni detrytycznego kwarcu, ziarna charakterystyczne dla związków żelaza, mogących świadczyć o zanieczyszczeniu gleb pyłami przemysłowymi.

Na zanieczyszczenie środowiska naturalnego są szczególnie narażone obszary uprzemysłowione oraz aglomeracje miejskie. Tereny te powinny być w szczególności monitorowane z racji bliskiego sąsiedztwa z dużymi skupiskami ludzkimi. Przeprowadzoną ocenę zanieczyszczenia gleb pierwiastkami śladowymi wokół Zakładu WSK – Rzeszów, ze względu na punktowy pobór próbek należy traktować poglądowo.

*Praca została zrealizowana w ramach umowy U - 604 /DS*

## Literatura

[1] Siuta J.: Gleba diagnozowanie stanu i zagrożenia, POLINT, Warszawa,1995.

[2] Sims J.T., Pierzynski G.M.: Assessing the impacts of agricultural, municipal, and industrial by-products on soil quality. [w]: J.F. Power, W.A. Dick (red), Land Application of Agricultural, Industrial, and Municipal By-products, Soil Science Society of America Inc., 237-262 (2000).

[3] Filipek T., Domańska J.: Zawartość Cd ogółem i formy przyswajalnej w glebach w zależności od pH oraz dodatku Pb, Zeszyty problemowe postępów nauk rolniczych, 2002.

[4] Szczepański K.: Związki ołowiu i chromu w środowisku naturalnym i odpadach, (Annual Set The Environment Protection) Roczniki Ochrony Środowiska, Tom 11, 2009, pp.173-182.

[5] http://www.gios.gov.pl/chemizm_gleb/index.php?mod=pomiary (20.11.2015 r.).

[6] Dz. U. 2001 nr 62 poz. 627 z p. zmianami – Ustawa Prawo ochrony środowiska.

[7] Dz. U. L 334/17 Dyrektywa 2010/75/UE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 24 listopada 2010 r. w sprawie emisji przemysłowych (zintegrowane zapobieganie zanieczyszczeniom i ich kontrola).

[8] Program Ochrony Środowiska dla Miasta Rzeszowa na lata 2013-2016 z uwzględnieniem zadań zrealizowanych w 2013 roku oraz perspektywą na lata 2017 - 2020 r. Przyjęty Uchwałą Nr LXIII/1158/2013 Rady Miejskiej w Rzeszowie z dnia 14 listopada 2013 r.

[9] Kaniuczak J., Hajduk E.: Kadm i ołów w niektórych glebach południowo-wschodniej Polski, Zeszyty problemowe postępów nauk rolniczych 1995, z. 418.

[10] Pękala A.: Ocena stanu geochemicznego gleb miasta Przemyśla, Górnictwo i Geologia. Tom 7, zeszyt 2, Gliwice 2012,197-205.

[11] Pękala A., Głowienka E.: Badania korelacji pierwiastków śladowych w środowisku glebowo – roślinnym przy zastosowaniu metod GIS, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury - Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (2/I/16), Rzeszów 2016, 209-219, DOI:10.7862/rb.2016.123.

[12] www.pwrze.com (05.11.2015 r.).

[13] PN-ISO 10381-2:2002, Jakość gleby -- Pobieranie próbek -- Część 2: Zasady dotyczące technik pobierania, Soil quality - Sampling - Part 2: Guidance on sampling techniques.

[14] PN-ISO 11047:2001, Jakość gleby. Oznaczenie kadmu, chromu, kobaltu, miedzi, ołowiu, manganu, niklu i cynku w ekstraktach gleby wodą królewską. Metody płomieniowej i elektro-termicznej absorpcyjnej spektrometrii atomowej.

[15] PN-ISO 11466 (2002), Jakość gleby -- Ekstrakcja pierwiastków śladowych rozpuszczalnych w wodzie królewskiej.

[16] PN-ISO 10390:1997, Jakość gleby. Oznaczenie pH, metoda potencjometryczna na oznaczenie pH w $H_2O$ i KCl.

[17] http://www.geoportal.gov.pl/uslugi/usluga-przegladania-wms (05.12.2015 r.).

[18] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 9 września 2002 r. w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi (Dziennik Ustaw - Dz. U. 2002, Nr 165 poz. 1359).

[19] Park J.H., Lamb D., Paneerselvam P., Choppala G., Bolan N., Chung J.W.: Role of organic amendmends on enhanced bioremediation of heavy metal(loid) contaminated soils. J.Haz.Mater. 185. 549–574 (2011).

[20] Lis J., Pasieczna A.: Atlas geochemiczny Polski 1:2 500 000. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa 1995.

[21] Nowińska K., Adamczyk Z.: Mobilność pierwiastków towarzyszących odpadom hutnictwa cynku i ołowiu w środowisku, Górnictwo i Geologia, Tom 8, zeszyt 1, Gliwice 2013, 77-87.

## ASSESSMENT OF SOIL ENVIRONMENT STATE IN THE NEIGHBORHOOD OF PLANT WSK–PZL RZESZOW S.A

**S u m m a r y**

Evaluation of soil environment condition around the plant WSK PZL - Rzeszow S.A, was carried out on the basis of the results of content analysis of Cd, Pb, Cu, Mn, Ni, Cr, and Zn and soil pH. The soil material was collected in the zone of influence of industrial emissions at a distance of 50 - 500 m from the potential emitter of pollutants, which can be factory WSK PZL - Rzeszow. The trace elements were determined by the ICP method, using emission spectrometer with inductively coupled plasma ICP-OES GBC Quantima E1330. Determination of pH was performed using a pH meter CP-105waterproof ELMETRON IP67 according to the standard PN-ISO 10390: 1997. In order to determine the phase composition and the presence of potential anthropogenic components in tested soils, there were carried out mineralogical analysis using: diffractometer PHILIPS X 'Pert with reflective monochromatyzer and electron microscope (SEM) FEI Quanta 200FEG with X-ray microanalyzer (EDX). According to the Regulation of the Minister of the Environment of 9 September 2002 on standards for soil quality and standards of land quality

(Dz. U. 2002 No. 165, item. 1359), tested soils belong to the group B and mostly does not exceed the standard values according to regulation. However, comparing the results with the data contained in the "Geochemical Atlas of Poland" for the soils of the city of Rzeszow, it can be found in all samples increased concentrations of Ni (average content 34.90 mg/kg of dry mass) and Cr (average content 21.13 mg/kg of dry mass), in relation to the data contained in Atlas (Ni - 20 mg/kg of dry mass and Cr - 10 mg/kg of dry mass). Obtained results of soil acidity allow to classify the tested material for a slightly acidic soils.

**Keywords**: geochemistry, environmental monitoring, trace elements, soils

DOI:10.7862/rb.2016.215

*Przesłano do redakcji: 30.09.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 329-340

**Katarzyna PIETRUCHA-URBANIK**[1]
**Tatiana CHRYŃ**[2]

# ANALYSIS OF WATER SUPPLY INFRASTRUCTURE STATE IN LUBLIN PROVINCE

In the paper the analysis of water supply infrastructure in Lublin Province was presented. We analysed the length of the water supply system divided into urban and rural areas, also change of water supply system growth and the analysis of number of connections to buildings over the studied years were presented. An issue of water consumption for household purposes, for industry, agriculture and forestry, and the operational needs of the water supply network, was also discussed. We analysed the percentage of the population using the water supply system and the indicators of equipping individual cities and counties in water supply systems were shown. The paper presents the analysis of the density of the water supply system in relation to national conditions. Appointed indicator of failure rate of water supply systems in the individual districts of Lublin province has an average reliability and failure rate according to the criteria recommended in the study [7]. There was a steady increase in the water supply system and related to it increase in investments. Significant changes that occurred in the field of water supply were the result of Polish accession to the European Union. After this accession Poland had to meet certain requirements related to the functioning of environment protection infrastructure. Changes in individual parameters characterizing the water supply infrastructure fit with the national tendency.

**Keywords:** water supply, development of the water supply infrastructure, density of water supply network, increase of water supply network

## 1. Introduction

The Lublin province covers an area of 25,000 square kilometres and takes the third place in the country. The region is inhabited by 2 151 000 people, it covers about six percent of the country. Province is located in the south-eastern Poland and borders with Belarus by Brest circuit and Ukraine by Lvov and Volyn circuits.

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Katarzyna Pietrucha-Urbanik, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651703, kpiet@prz.edu.pl
[2] Tatiana Chryń, Politechnika Rzeszowska

The Lublin province has low population density, amounted to 86 inh.· km-2 in 2013, which in a scale of the country locates it in the 12th place. The population in the last decade decreased by three percent and the natural increase over the studied years is negative, as a result of high immigration and the fact that this region is poorly industrialized. Poor industrialization causes that half of the region's population live in rural areas. The considered province is divided into 4 city counties, 20 counties and 213 municipalities, including 41 towns and 4116 villages [4].

The individual parameters associated with the state of the water supply are subjected to constant changes, some remain at a steady level or show a downward or growing trend. Analysis of the development of rural and urban areas in Poland due to the changes in the field of water supply is the subject of many studies [1-3, 5, 6]. Significant changes that occurred in this area were the result of Polish accession to the European Union, as a result of which the country had to meet certain requirements related to the functioning of water supply infrastructure. Polish accession to the EU structures resulted in a significant increase in funding, which undoubtedly contributed to the development of water supply infrastructure. Also performed failure analysis constitute the important step in proper management of the water supply network [7-12].

The aim of this study is to analyse the infrastructure of water supply made on the basis of statistical yearbooks compiled by the Central Statistical Office for the province for the years 1998-2013 and for the chosen parameters of analysis for 2015 [4].

## 2. Water consumption

Water sale in the cities of the Lublin province in the last year of analysis amounted to 84 400 $m^3$, which represents about 7,5% of water sales in the country. The largest water sale took place in Lublin (43,4 $dam^3$), then at a similar level of about 6 $dam^3$ are the following cities: Zamosc, Pulawy, Biala Podlaska and Chelm. Low water sale occurred in the Frampol and Tyszowce (0,1 $dam^3$). The large discrepancy between Lublin and other cities is due to the fact that Lublin is the biggest city in the region, therefore it has the largest number of inhabitants and the largest demand for water. The water price for $m^3$ in the Lublin province for 8 years increased by 0,81 zl and amounted to 2,76 zl in 2013. At the same time this price is 23% lower than the average price per m3 of water in Poland.

Average daily water consumption in the region amounted to 75 $dm^3 \cdot d^{-1} \cdot inh^{-1}$, which is more than the average for the whole Poland by about 11 $dm^3$. The lowest water consumption was recorded in the districts of Chelm (52 $dm^3 \cdot d^{-1} \cdot inh^{-1}$), Hrubieszow (51 $dm^3 \cdot d^{-1} \cdot inh^{-1}$) and Zamosc (42 $dm^3 \cdot d^{-1} \cdot inh^{-1}$).

Water consumption in the various districts of the Lublin province is shown in Figure 1.

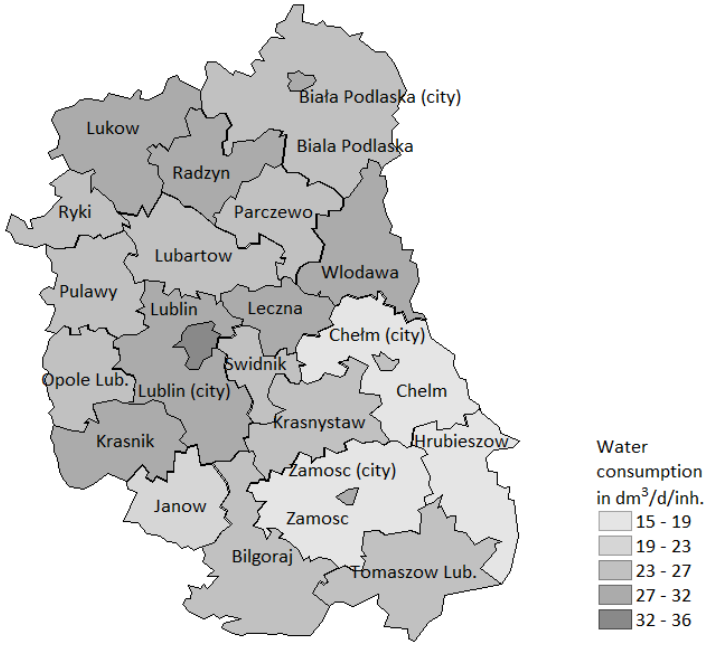



Fig. 1. Water consumption in the various districts of the Lublin province

Rys. 1. Zużycie wody w poszczególnych powiatach województwie lubelskim

In the last year of the analysis the inhabitants of the region consumed for living purposes 35% more water than in 1998, which resulted primarily from the expansion of the existing water supply network and connection of the new customers to the public water network. Undoubtedly, the same trend in water consumption through years is influenced by reducing losses in water distribution, installation of water meters, as well as the increase of the water price, which contributes to saving. Also commercialization of fees for water was the main instrument of limiting water consumption.

Water consumption for the industry in the Lublin province in 2008-2010 showed a downward trend, in other years remained at a comparable level. The percentage share of industry in the overall consumption of water in the Lublin province during the considered period of time was, on average, 32%. In the last year of the analysis water consumption for industry amounted to 140 000 dam$^3$. Analysing the amount of water taken and consumed for the agriculture and forestry in the period of 16 years it should be stated that it remained at similar level, amounting, in last year of the analysis, to about 47% of the overall water consumption (180 000 dam$^3$). On the other hand, water consumption for the purposes of exploitation amounted to 70 000 dam$^3$. Lower water consumption occurred in rural areas, which was due to the fact that in the cities the water supply network is constantly expanding and larger amounts of water are used for technological purposes, such as, for example, washing the filters.

## 3. Analysis of changes in the length of the water supply network

The Lublin province is clearly differentiated in terms of the access to the network technical infrastructure considering urban and rural areas. In the years 1998-2013 the increase of the water supply network was 65%, which means that in the Lublin province the development of water supply infrastructure can be assessed in positive way, in comparison to the average growth in whole Poland, amounted to 34%. The largest increase of the water supply network in the Lublin province was recorded in 2000, while the lowest in 2002. Within fifteen years of the analysis the average increase in the network was 540 km. Compared to other regions it can be assumed that the Lublin province is close to the average growth of water supply infrastructure. The most developing province is Masovian where the water supply system increased in 2013 by 26% compared to 2005.

In the Figures 2 and 3 the increase in the water supply system in cities and rural areas in the Lublin province was shown.

The length of the water supply system in urban areas during the considered period increased by 420,2 km, which constituted 3,19% of the increase of the national network. The biggest difference compared to the previous year occurred in 2007 and was 46 km, the smallest length of the network in cities was built in 2011, only 19 km. The average increase of water supply network in the Lublin province is 28 km per year.

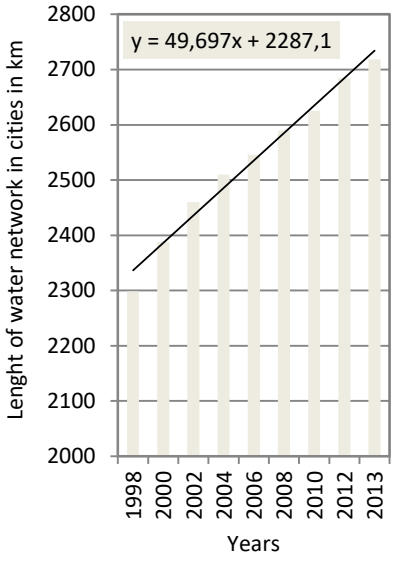



Fig. 2. Increase in the length of the water supply network in cities in the Lublin province

Rys. 2. Wzrost długości sieci wodociągowej w województwie lubelskim w miastach

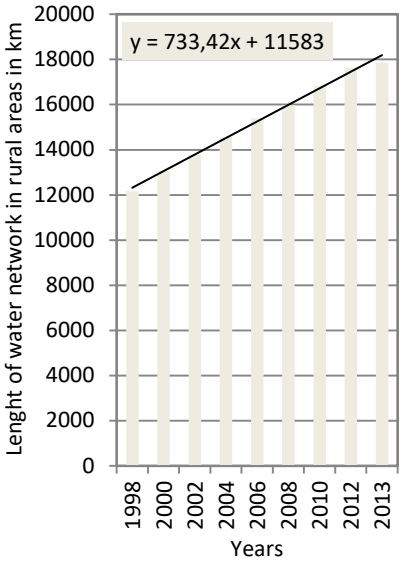



Fig. 3. Increase in the length of the water supply network in rural areas in the Lublin province

Rys. 3. Wzrost długości sieci wodociągowej w województwie lubelskim w miastach

It can be noticed that the increase of the water supply system at the analysed time was linear and systematic, the greatest length of the network occurred in the city of Lublin, with the amount of 51,4 km, and the smallest in Zamosc, about 40,2 km.

The detailed analysis showed that in the cities with less than 10 000 inhabitants (21 cities), the average length of the network was 27,7 km, in the cities with 10 to 20 thousand inhabitants (10 cities) the average length was 51.8 km, in the cities with 20 to 50 thousand inhabitants about 84.6 km and in the cities with 50 to 100 thousand inhabitants about 165.5 kilometres.

Taking into account the rural areas during the considered period the length of water supply system has increased by 5700 km (Fig. 2). The average annual increase of the water supply network length was 380 km, while in the whole country it amounted to 4849 km.

In the Lublin province in the analysed period 50 018 new connections were made, the average number of connections to the water supply system amounted to 3335 per year The largest number of new connections was made in 2008 and amounted to 8584.

With the increase of the water supply network length and thus a greater availability of water services, the number of street standposts decreased from 979 to 553, an identical downward trend was maintained in the country, where the number of street standposts decreased by 30% of 6547. A similar situation occurred in the rural areas of the Lublin province, in the cities the number of street standposts decreased from 570 to 278 and in the urban areas the number of street standposts decreased from 409 to 275.

## 4. Density of the water supply network

In the analysed period the density of the water supply network in the Lublin province has increased from 69,6 to 81,9 km·100 km$^{-2}$, while the average density of the country ranged from 78,6 to 92,0 km·100 km$^{-2}$. Taking into account all the provinces, the largest density of the water supply system occurred in the Kuyavian Pomeranian province and amounted to 126,5 km·100 km$^{-2}$. The lowest density was in West Pomeranian, 46.4 km·100 km$^{-2}$. The Lublin province with a density of 81,9 km·100 km$^{-2}$ is in 8th position among all the provinces in terms of the development of water supply infrastructure. Of course it should be remembered that cities because of their construction are more dense and have smaller surface area and thus the water supply network is denser and longer than in rural areas. Discussed dependence is shown in Figures 4 and 5.

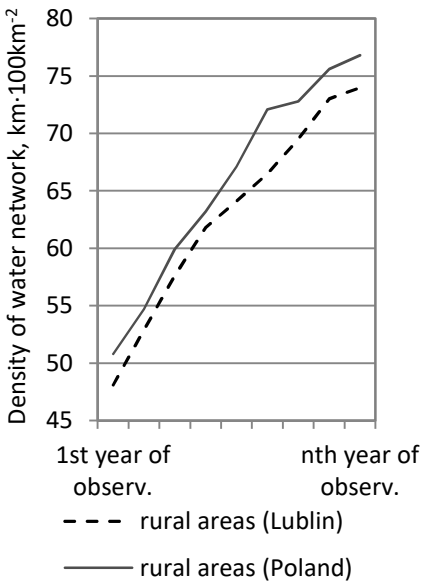



Fig. 4. Density of the water supply network in the rural areas in the districts of Lublin province

Rys. 4. Gęstość sieci wodociągowej na obszarach wiejskich województwa lubelskiego

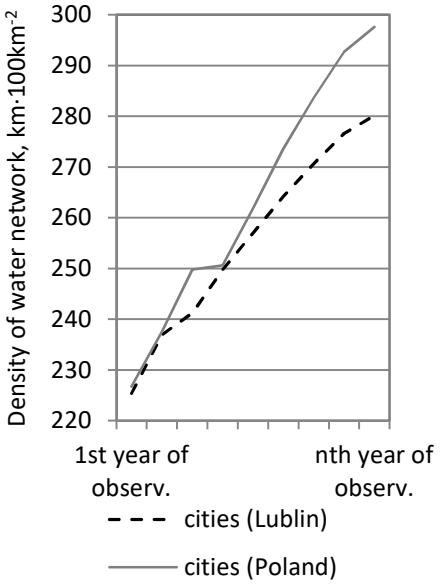



Fig. 5. Density of the water supply network in the cities in the districts of Lublin province

Rys. 5. Gęstość sieci wodociągowej w miastach województwa lubelskiego

In Poland, the average density of the urban water supply network in 2013 was 297,6 km·100 km$^{-2}$ and increased in the analysed period by 39,8 km·100 km$^{-2}$. The greatest density of water supply system in the city in 2013 had the Greater Poland province (397,5 km·100 km$^{-2}$), while the lowest had the Opole province (200,5 km·100 km$^{-2}$).

The Lublin province in 2013 reached a density of 280,1 km·100 km$^{-2}$, which means that during the nine years it increased by 29,5 km·100 km$^{-2}$, an increase of 15,4%. The largest cities of the province have the following density of the water supply network: Biala Podlaska (355,3 km·100 km$^{-2}$), Chelm (499,1 km·100 km$^{-2}$), Zamosc (451,1 km·100 km$^{-2}$), Lublin ( 395,9 km·100 km$^{-2}$).

On the other hand, in Poland, the average density of rural water supply network in 2013 amounted to 76,8 km·100 km$^{-2}$ and increased in the analysed period by 11,3 km·100 km$^{-2}$. The greatest density of water supply in rural areas in 2013 had the Kuyavian Pomeranian (114,3 km·100 km$^{-2}$), while the lowest the West Pomeranian and Lubusz (35 km·100 km$^{-2}$). Rural areas in the Lublin province in 2013 reached a density of 74 km·100 km$^{-2}$, which means that in 16 years it increased by 29,5 km·100 km$^{-2}$, an increase of 38,5%.

The greatest density of water supply network in rural areas were in such districts: Pulawy (100,5 km·100 km$^{-2}$), Lubartow (90,7 km·100 km$^{-2}$), Krasnystaw (84,9 km·100 km$^{-2}$) and Radzyn (88,4 km·100 km$^{-2}$). Thanks to the

means of financing the extension of water supply system takes place and thus the density of the water supply network increases. Undoubtedly, increasing the length of the water supply system in rural areas is a sign of their vast modernization and socio-economic development.

## 5. The financial expenditure incurred on the construction of water supply infrastructure

In the Lublin province since 1998 the systematic increase of expenditures on fixed assets for the construction of intakes and water supply is observed - to the level of 69 million zl in 2013. Expenditures on fixed assets for the construction and modernization of the water treatment plants amounted to more than 13 million zl and were significantly higher than in 2012. The largest expenditures incurred in 2013 in the districts of Pulawy and Biala Podlaska. They accounted to 7,08% of the total expenditures for the construction of intakes and water supply. Funds allocated to this type of investment are shown in Figure 6.

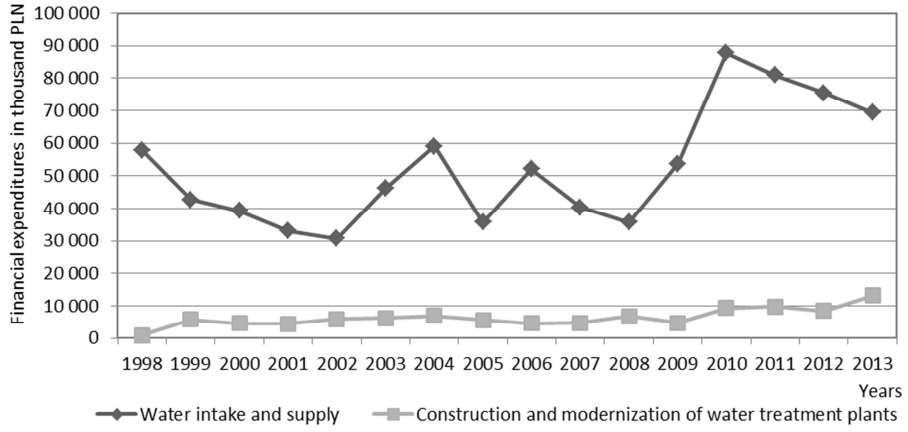



Fig. 6. Fixed assets for the construction and modernization of water supply infrastructure

Rys. 6. Środki trwałe przeznaczone na budowę oraz modernizację infrastruktury wodociągowej

Almost half of all the investment assigned to water management was related to new intakes and water supply infrastructure, as well as the modernization of the water intakes.

## 6. Population using the water supply system

In the last year of the analysis the overall percentage of the population using the water supply network was approx. 82%, in the cities the access to water supply was 94% (in national scale in the cities this value was 95%) and in rural are-

as 72% (in national scale in rural areas it was 77%). Since 1998, there was an increase of people using the water supply system in the cities by 10%, while in case of rural areas by 16%.

The largest availability of water supply system in the remaining provinces was: Opole - 94,6%, West Pomeranian - 93,7%, Silesia - 93,6%, Pomeranian - 93,1% and Great Poland - 93,1%. Taking into account the development of the water supply system in the whole country, an increase of the population using the water supply during considered period was 4%, while in the Lublin province, this indicator increased by 7%.

The degree of equipping individual districts with water supply systems is shown in Figure 7.

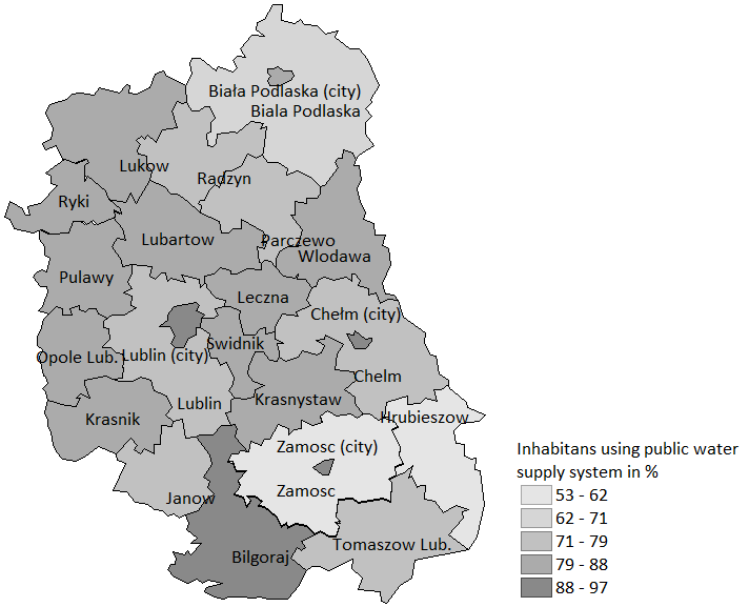



Fig. 7. The indicator of equipping individual districts in the Lublin province with water supply systems

Rys. 7. Wskaźnik zwodociągowania poszczególnych powiatów w województwie lubelskim

The highest level - 91,1% - of the use of the water supply is in the county Bilgoraj. The lowest indicator is in Hrubieszow district (59%), but in this county there was the greatest increase in the number of users of the water supply system in the last ten years. The detailed analysis showed that the highest degree of equipping with water supply systems in 2013 had the city of Leczna and it amounted to 99,1%. The lowest degree was in the city of Biala Podlaska, only 86%.

## 7. Failure rate of the water network

To evaluate the technical condition of the water network the indicator of failure rate is used, which is calculated as the quotient of the number of failures in relation to the network length within one year [9].

The failure rates of the water supply network in the various districts of the Lublin province for obtained data, including water distribution network, were presented in Figure 8.

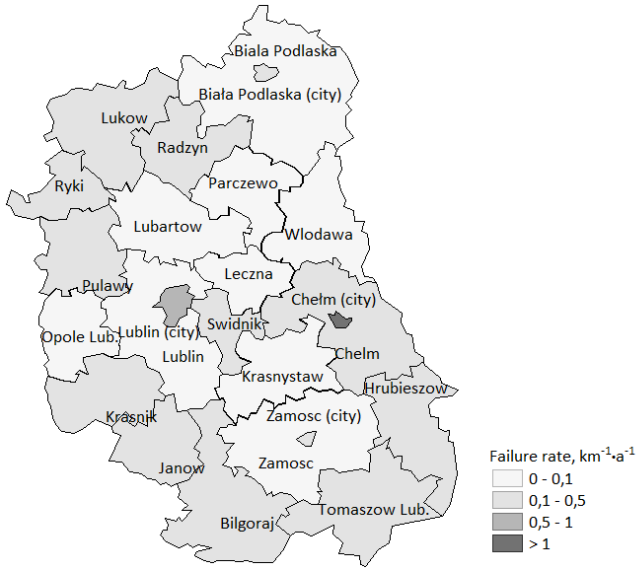



Fig. 8. The failure rates in different districts in the Lublin province

Rys. 8. Intensywność uszkodzeń w poszczególnych powiatach województwa lubelskiego

Criteria values of failure rate of water supply network were given in the paper [9]. Low failure rate is identified with the failure rate of less than 0,1 $km^{-1} \cdot a^{-1}$, the average failure rate means the failure rate from 0,1 to 0,5 $km^{-1} \cdot a^{-1}$, and the high failure rate is higher than 1. The average failure rate determined for the whole province was 0,21 $km^{-1} \cdot a^{-1}$, which classifies the water supply network of the region as the average reliability.

The detailed analysis showed that in 42% of districts the water supply systems have low failure rate, while 8% are the water supply systems with high failure rate, so it can be concluded that the examined water supply networks are in good technical condition.

## 8. The degree of equipping with water supply networks

The degree of equipping with water supply networks is expressed, for example, by the length of the water supply network per one recipient. The length of the water supply network per one user of the public water supply systems in the individual districts is shown in Figures 9 and 10. The highest value of this indicator have Biała Podlaska and Chelm districts, 23,87 and 23,62 m per one recipient, respectively. The lowest value of this indicator have Swidnik and Pulawy districts, 9,35 and 9,67 m per one recipient, respectively.

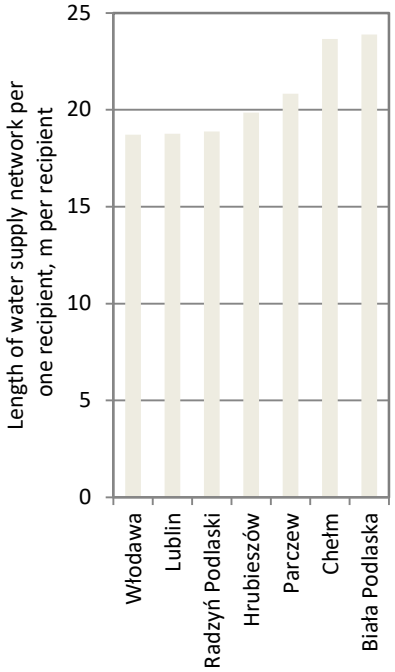



Fig. 9. The indicator of the greatest length of the water supply network per one recipient in the districts of Lublin province

Rys. 9. Wskaźnik z największą długością sieci wodociągowej przypadającą na 1 obsługiwanego w powiatach województwa lubelskiego

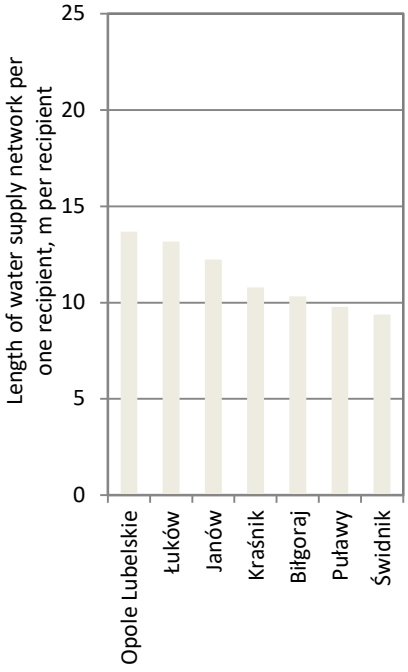



Fig. 10. The indicator of the smallest length of the water supply network per one recipient in the districts of Lublin province

Rys. 10. Wskaźnik z najmniejszą długości sieci wodociągową przypadającej na 1 obsługiwanego w powiatach województwa lubelskiego

The indicator of equipping with water supply network remains in close relation with the ratio of the use intensity of network equipment, defined as the ratio of annual water sale to the length of the water supply network [3]. The average daily water sale per 1 km of distribution network in the Lublin province is 7,28 $m^3 \cdot d^{-1} \cdot km^{-1}$. The usage rates of water supply network in the various districts of the province of Lublin are illustrated in Figures 9 and 10.

The highest indicator have districts of Pulawy (11,6 $m^3 \cdot d^{-1} \cdot km^{-1}$), Swidnik (10,1 $m^3 \cdot d^{-1} \cdot km^{-1}$), Krasnik (9,7 $m^3 \cdot d^{-1} \cdot km^{-1}$), Lukow (9,1 $m^3 \cdot d^{-1} \cdot km^{-1}$), Bilgoraj (8,4 $m^3 \cdot d^{-1} \cdot km^{-1}$) and Ryki (7,8 $m^3 \cdot d^{-1} \cdot km^{-1}$). The lowest rate of equipping with the water supply systems is in districts of Chelm (3,3 $m^3 \cdot d^{-1} \cdot km^{-1}$), Biala Podlaska (4,4 $m^3 \cdot d^{-1} \cdot km^{-1}$), Hrubieszow (4,7 $m^3 \cdot d^{-1} \cdot km^{-1}$), Zamosc (4,8 $m^3 \cdot d^{-1} \cdot km^{-1}$) and Parczew (4,9 $m^3 \cdot d^{-1} \cdot km^{-1}$).

## 9. Conclusion

The performed analysis of water supply infrastructure confirmed the positive changes in its development, which undoubtedly was associated with an increase in the length of the water supply system, which in the Lublin province in the last fifteen years was 8089 km, while in the cities about 420 kilometres. Also it is worth to note that only in the last six years in the Lublin province the level of the access to water supply system increased by almost 10%, which now places this province in the seventh position in the country.

Also the positive changes have occurred in increasing the level of equipping the settlement units with water supply network and thus increasing the access to the water supply network to a level comparable with the level of the country. The development of municipal infrastructure, including water supply and, subsequently, sewerage, causes the desired economic effects, and, consequently, also social effects, so it is very important to undertake new investments to improve the functioning of the settlement units.

### Literature

[1] Chudy W.: Wyposażenie polskich obszarów wiejskich w infrastrukturę komunalną, Infrastruktura I Ekologia Terenów Wiejskich, Nr 2/2007, s. 111-120.

[2] Dohnalik P., Jędrzejewski Z.: Efektywna eksploatacja wodociągów, ograniczenie strat wody, Wydawnictwo LEMTECH, Kraków 2004.

[3] Dymaczewski Z., Sozański M.M.: Wodociągi i kanalizacja w Polsce tradycja i współczesność, Polska Fundacja Ochrony Zasobów Wodnych, Poznań-Bydgoszcz 2002.

[4] Główny Urząd Statystyczny, Ochrona środowiska, Roczniki statystyczne za lata 1998-2015.

[5] Kłos-Trębakiewicz H., Osuch-Pajdzińska E., Wybrane wskaźniki charakteryzujące wodociągi w dużych miastach polskich w latach 2005-2008, Gaz, Woda, Technika Sanitarna, Nr 3/2010, s. 7-15.

[6] Korzeniowski P.: Zbiorowe zaopatrzenie w wodę i zbiorowe odprowadzanie ścieków, Wodociągi i Kanalizacja, Nr 7-8/2010, s. 18-19.

[7] Kwietniewski M., Awaryjność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce w świetle badań eksploatacyjnych, XXV Konf. Naukowo–Techniczna, Międzyzdroje 2011, s. 128-129.

[8] Kwietniewski M., Rak J., Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce, PAN, Warszawa 2010.

[9] Kwietniewski M., Roman M., Kłoss-Trębaczkiewicz H.: Niezawodność wodociągów i kanalizacji. Arkady, Warszawa 1993.

[10] Pietrucha-Urbanik K., Bernacka A.: Analysis of Water Infrastructure Development - a Case Study of the Exemplary Water Supply System. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, z. 63, nr 2/I/2016, s. 221-230. DOI: 10.7862/rb.2016.124.

[11] Rak J.: Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. Komitet Inżynierii Środowiska PAN. t. 28, 2005.

[12] Rak J.: Metoda planowania remontów sieci wodociągowej na przykładzie miasta krosna. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury, Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, z. 61, nr 1/2014, s. 225-232. DOI: 10.7862/rb.2014.15.

## ANALIZA STANU INFRASTRUKTURY WODOCIĄGOWEJ W WOJEWÓDZTWIE LUBELSKIM

**S t r e s z c z e n i e**

W pracy przedstawiono analizę infrastruktury wodociągowej w województwie lubelskim. Analizie poddano długość oraz gęstość sieci wodociągowej w podziale na tereny miejskie oraz wiejskie, zaprezentowano również zmianę przyrostu długości sieci wodociągowej oraz analizę liczby przyłączy prowadzących do budynków na przestrzeni badanych lat. Poruszono również kwestię zużycia wody na poszczególne cele gospodarczo-bytowe, potrzeby przemysłu, rolnictwa i leśnictwa oraz cele eksploatacyjne sieci wodociągowej. Przeanalizowano procent ludności korzystającej oraz pokazano wskaźniki zwodociągowania poszczególnych miast i powiatów. W pracy przedstawiono także analizę gęstości sieci wodociągowej w odniesieniu do warunków krajowych.

Wyznaczony wskaźnik intensywności uszkodzeń sieci wodociągowych w poszczególnych powiatach województwa lubelskiego charakteryzuje się średnią niezawodnością oraz awaryjnością według kryteriów zalecanych w opracowaniu [7]. Zaobserwowano systematyczny przyrost sieci wodociągowej oraz związany z tym wzrost nakładów inwestycyjnych. Znaczne zmiany, który zachodziły w zakresie zaopatrzenia w wodę były wynikiem akcesji Polski do Unii Europejskiej. Wskutek czego państwo polskie musiało spełnić określone wymagania związane z funkcjonowaniem infrastruktury służącej ochronie środowiska. Zmiany poszczególnych parametrów charakteryzujących infrastrukturę wodociągową wpisują się w tendencję krajową.

**Słowa kluczowe:** wodociągi, rozwój infrastruktury wodociągowej, gęstość sieci wodociągowej, przyrost sieci wodociągowej

DOI:10.7862/rb.2016.216

*Przesłano do redakcji: 30.09.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 341-349

**Katarzyna PIETRUCHA-URBANIK**[1]
**Justyna KARNAS**[2]

# ASSESSMENT OF WATER NETWORK FUNCTIONING ON THE BASIS OF WATER LOSSES

In the paper the analysis of water network functioning on the basis of water losses occurring in the exemplary water supply system is presented. Using the received operational data the balance of water production was shown, the individual water consumption was calculated, the basic indicators of water losses and the indicators of network hydraulic load were established, which referred to the values recommended, among others, by the American Water Works Association. On the basis of these indicators, the assessment of the state of tested water supply system was performed. The unitary volume indicators related to water losses are at the constant level. The unitary indicator of water losses for the years 2007-2015, on average, amounted to approx. 108 $dm^3 \cdot inh^{-1} \cdot d^{-1}$, the unitary indicator of water supplied into network takes values from 459,1 $dm^3 \cdot inh^{-1} \cdot d^{-1}$ in 2007 to 402.9 $dm^3 \cdot inh^{-1} \cdot d^{-1}$ in 2015, which means the decrease of approx. 12%. The unitary indicator of sold water is in the range from 288,9 to 419,5 $dm^3 \cdot inh^{-1} \cdot d^{-1}$. The infrastructure leakage index ILI, according to the criteria of World Bank Institute Banding System for developing countries, estimates the state of water supply system as good. The value of the ILI index for the analysed water supply system corresponds to national trends, which range from 3,13 to 16,52 [3, 8].

**Keywords:** water supply, water losses, water losses indicators

## 1. Introduction

Aiming to reduce water losses and rational water management is a priority objective of each water company. In order to reduce the volume of water losses every year the water company takes new actions to eliminate all controlled and uncontrolled water losses [1, 8, 10]. Such action may include the introduction of continuous monitoring of water losses, conducting a detailed analysis of water consumption by consumers, as well as research and assessment of indicators showing the network state and giving a signal to take appropriate action [3, 4, 7, 9].

[1] Autor do korespondencji/corresponding author: Katarzyna Pietrucha-Urbanik, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651703, kpiet@prz.edu.pl
[2] Justyna Karnas, Politechnika Rzeszowska

At the end of 2015 the water supply system in examined city formed a network of distributional and mains pipelines with a total length of 212,1 kilometres. During the years 2001-2015, on average, 27,81 km of main network and 166,32 km of distribution network operated and in years 2007-2015 5571 water supply connections were used. It was also found that at the end of 15 analysed years the total length of the main water supply decreased by almost 27%. From 2001 to 2011 this value was constant and over the years decreased every year, on average, by 13,55% . The distribution network is characterized by high growth, from 2001 to 2015 a total length of 140,5 kilometres increased by 49,9 km which gives each year increase by, on average, about 4%. In the case of water supply connections, from 2007 to 2015 their number increased by 803 units.

Analysing the material structure of water supply network, it can be concluded that a dominant material of which the largest part of the water pipes is made is grey cast iron, then PVC and steel. The smallest group are pipes made of asbestos-cement, which, however, are gradually exchanged for pipes made of other materials.

The value of water production for the purposes of households in the analysed period is still at almost the same level. There was not any significant decrease or increase of this value over the years. The difference is not less or more than 4% compared to the previous year. The increasing fall in water consumption was observed and this trend is not only in the examined city but in all Polish cities. This fact is, among others, caused by the increasing awareness of water users of water resources and the significant increase in the price of water per $m^3$.

To analyse the magnitude of water losses in the water network the indicators developed on the basis of annual balance were used and the water losses were described by determining the indicators recommended by the International Water Association (IWA) [2].

## 2. Determination of water losses

To calculate water losses some data are used, their list and indications are presented in Table 1 [12].

Table 1. Summary of basic parameters to determine water losses acc. to IWA

Tabela 1. Zestawienie podstawowych parametrów do wyznaczenia strat wody według IWA

| Specification | Explanation |
|---|---|
| • $V_S$; | Water supplied into the network |
| • $V_{ow}$; | Water used for own needs of water network |
| • $V_{sw}$; | Sold water |
| • $V_{ws}$; | Water losses |
| • $L_M$; | Length of mains |
| • $L_D$; | Length of distribution network |
| • $L_{M+D}$; | Total length of network (mains and distribution network) |
| • $L_{PW}$; | Length of water supply connections |
| • $PW$. | Number of water connections |

In the Figure 1 the balance of water production in 2007-2015 was presented.

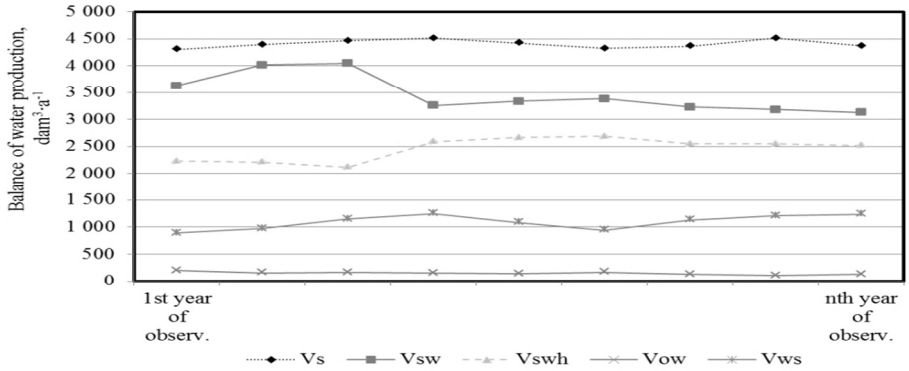



Fig. 1. Balance of water production, where $V_{swh}$ is water sold to households (other indications as in Table 1)

Rys. 1. Bilans produkcji wody, gdzie $V_{swh}$ – woda sprzedana gospodarstwom domowym (pozostałe oznaczenia jak w Tab. 1)

In the Figure 2 the length of individual sections of the network in 2007-2015 was presented.

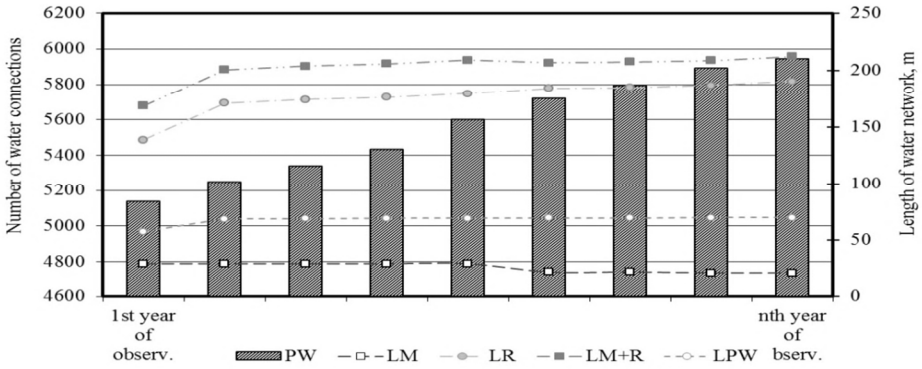



Fig. 2. The lengths of the individual sections of the water supply system in 2007-2015 (indications as in Table 1)

Rys. 2. Długości poszczególnych odcinków sieci wodociągowej w latach 2007-2015 (oznaczenia jak w Tabeli 1)

The assessment of actions taken to reduce water losses in water supply system can be performed using the *ILI* index, determined as the quotient of the volume losses by the indicator of unavoidable annual real losses (*UARL*) defined as:

$$UARL = [18 \cdot (L_M + L_D) + 25 \cdot PW + 0{,}8 \cdot L_{PW}] \cdot 0{,}365 \cdot p, [m^3 \cdot a^{-1}] \quad (1)$$

where $p$ is the mean pressure in the analysed zone and 0,365 is the conversion factor, other explanations are given in Table 1.

Less strict categories of the *ILI*, according to the recommendations of AWWA, are as follows [5, 6]:

- $ILI \leq 3{,}0$ - very good state;
- $3{,}0 < ILI \leq 5{,}0$ - good state;
- $5{,}0 < ILI \leq 8{,}0$ - weak state;
- $ILI > 8{,}0$ - unacceptable state.

While taking into account the categories of WBI Banding System for the developing countries, the range of the *ILI* is as follows:

- $ILI \leq 4{,}0$ - very good state;
- $4{,}0 < ILI \leq 8{,}0$ - good state;
- $8{,}0 < ILI \leq 16{,}0$ - weak state;
- $ILI > 16{,}0$ - unacceptable state.

In order to determine the unitary real loss indicator the following types of that indicator were distinguished – the $RLB_1$ indicator, defined by the formula 2 (when the number of water supply connections per each km of network is less than 20) and the $RLB_2$ indicator, determined by the formula 3 (where the number of connections is equal or higher than 20 per km of network) [12]:

$$RLB_1 = \frac{V_{ws}}{L_{M+D} \cdot 365}, [m^3 \cdot km^{-1} \cdot d^{-1}] \quad (2)$$

or

$$RLB_2 = \frac{V_{ws} \cdot 1000}{L_{PW} \cdot 365}, [dm^3 \cdot km^{-1} \cdot d^{-1} \cdot water\ connection] \quad (3)$$

In turn, the indicator of non-revenue water basic (*NRWB*) was determined as the quotient of the difference of water supplied into network and sold water by water supplied into network.

Calculated indicators of water losses are presented in Fig. 3.

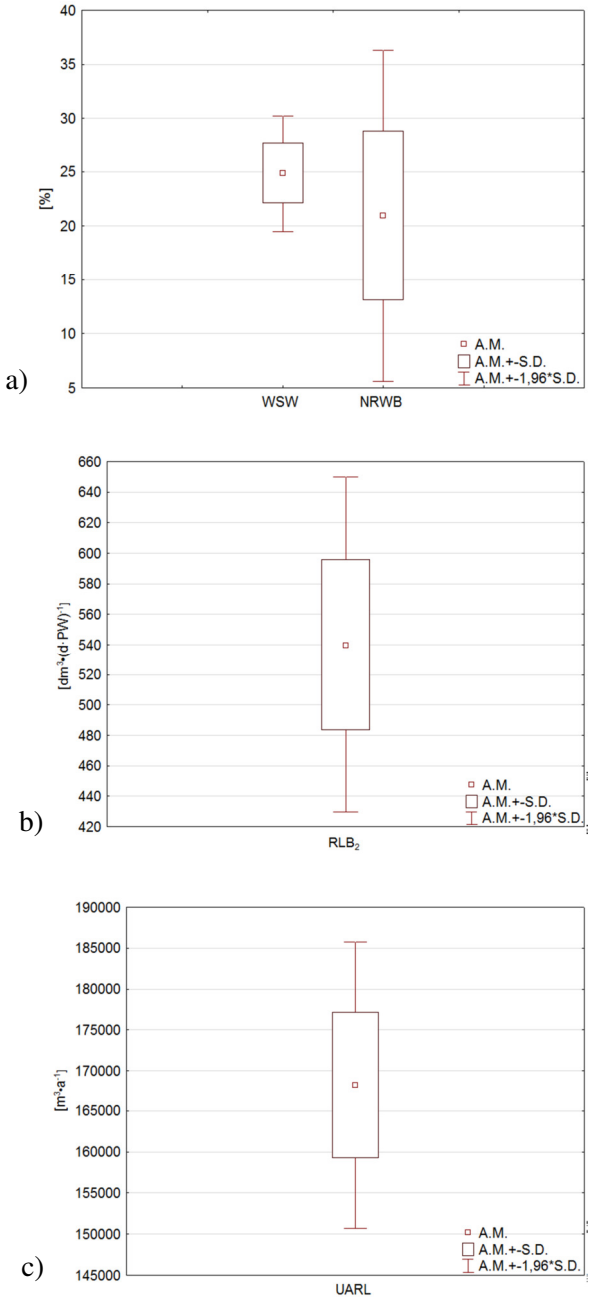



Fig. 3. Descriptive statistics of water losses indicators in 2007-2015

Rys. 3. Statystyki opisowe wskaźników strat wody w latach 2007-2015

d)

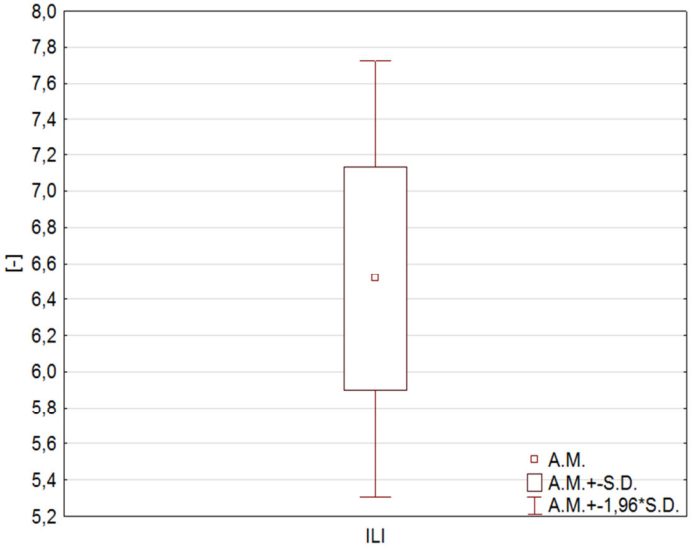



Fig. 3. Descriptive statistics of water losses indicators in 2007-2015 (c.d.)

Rys. 3. Statystyki opisowe wskaźników strat wody w latach 2007-2015 (cont.)

The determined parameters for water losses have variable tendency, for the ILI index, in the last year of analysis, there was an increase of 15%.

To calculate unitary water consumption the characteristic parameter was calculated according to the formulas presented in Table 2.

Table 2. Calculation of individual indicators of water consumption and losses (indications as in Table 1)

Tabela 2. Zestawienie jednostkowych wskaźników zużycia oraz strat wody (objaśnienia jak w Tabeli 1)

| Specification | Equation | Unit |
|---|---|---|
| Water supplied into network | $q_s = (V_s \cdot 1000)/(inh \cdot 365)$ | $[dm^3 \cdot inh^{-1} \cdot d^{-1}]$ |
| Sold water | $q_{sw} = (V_{sw} \cdot 1000)/(inh \cdot 365)$ | |
| Water sold to households | $q_{wsh} = (V_{wsh} \cdot 1000)/(inh \cdot 365)$ | |
| Water losses | $q_{ws} = (V_{ws} \cdot 1000)/(inh \cdot 365)$ | |
| Water used for own needs | $q_{ow} = (V_{ow} \cdot 1000)/(inh \cdot 365)$ | |
| Nonprofit water | $q_{nw} = (V_s - V_{sw})/(inh \cdot 365)$ | |
| Hydraulic loading rate per unit for water supply network | $q_o = V_s/(L_{M+D} \cdot 365)$ | $[m^3 \cdot km^{-1} \cdot d^{-1}]$ |
| Water loss rate per unit for the entire length | $q_{wsL} = V_{ws}/(L_{M+D} \cdot 365)$ | |

In the Figures 4 and 5 the calculated unitary water loss indicators and the unitary hydraulic load indicators were shown.

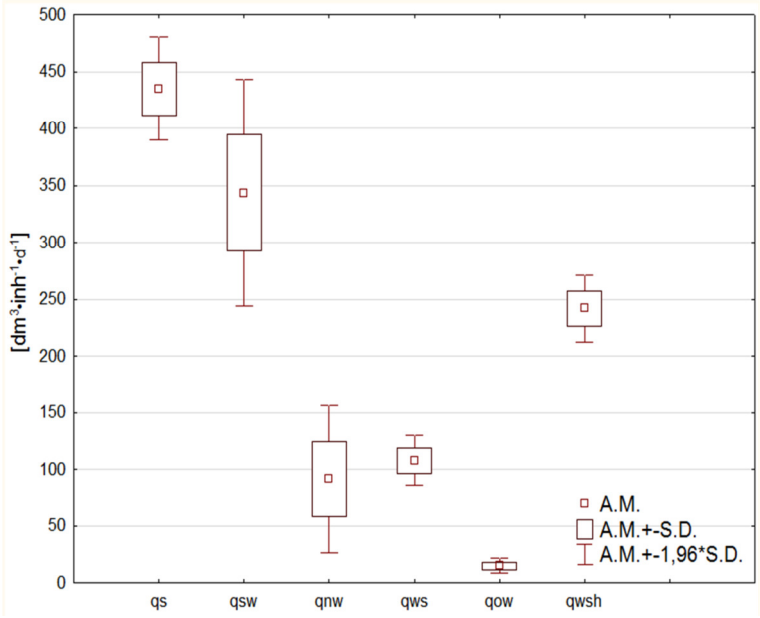



Fig. 4. Unitary water loss indicators in 2007-2015

Rys. 4. Jednostkowe wskaźniki strat wody w latach 2007-2015

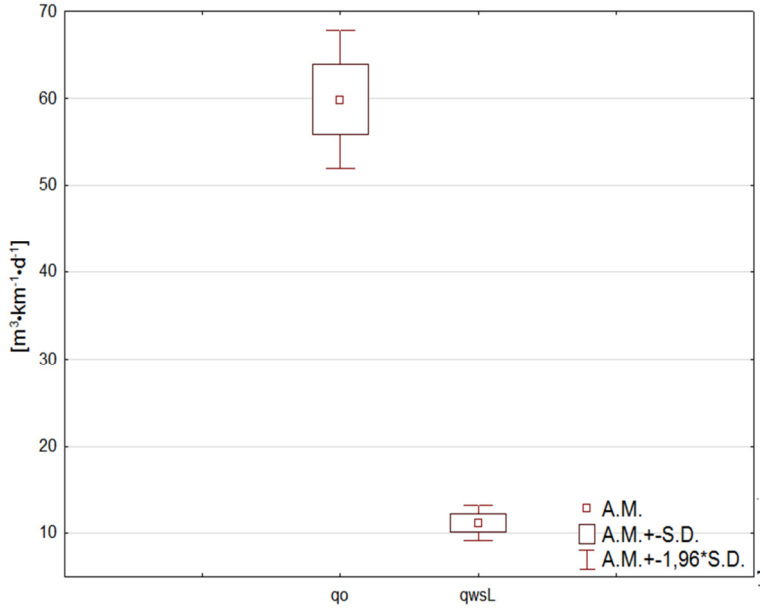



Fig. 5. Unitary hydraulic load indicators in 2007-2015

Rys. 5. Wskaźniki jednostkowego obciążenia hydraulicznego sieci w latach 2007-2015

## 3. Discussion of results

Referring to the results of the analysis of water losses it was found that water losses which are the ratio of the volume of water losses to the amount of water supplied into the water supply network, in each of the years covered by the analysis, 2007-2015, are in the range from 20,73% to 28,29%.

Determined unitary water loss indicators and indicators of the unitary hydraulic load show a downward trend and in the last year of analysis reached the lowest value compared to the previous years of the analysis.

In order to assess water losses in water network the infrastructure leakage index *ILI* was, among others, calculated. For the last nine years it is in the range of 5,48 to 7,46. This indicator shows how many times the real water losses exceed the unavoidable losses. Comparing the results of the *ILI* index with aforementioned criteria it was found that according to the IWA criteria in all analysed years the state of water supply system in the city is unacceptable. Taking the same index and referring it to the WBI criteria for developing countries this state is good, referring it to the WBI criteria for the developed countries it is weak. Considering the *ILI* index, according to AWWA, the state of water supply system in the analysed years 2007-2015 is weak. The infrastructure leakage index ILI in Polish cities varies, on average, at the level from 3,13 to 16,62 [4], on the basis of which it can be concluded that analysed water network is at satisfactory level. The determined values of the *ILI* correspond to national trends - for comparison the *ILI* index for other water supply system ranged from 4,3 to 5,8 [11, 13]. The *NRWB* index in 2007-2015 ranges from 8,57% to 28,29%, while the *RLB* index was at the level of 12,51-16,67 $m^3 \cdot km^{-1} \cdot d^{-1}$ and also from 452,07 to 631,49 $dm^3 \cdot d^{-1} \cdot PW^{-1}$.

## 4. Conclusions

The analysis of water losses and the determination of the unitary water loss indicators allow to perform detailed assessment of the state of operating water supply network. It can be indicated that there was no clearly visible downward trend or growth in the calculated indices. The unitary water loss indicator in the analysed time remains at a constant level. It should be noted that taking actions aiming at reducing water losses directly affect the financial results of the water company.

### Literature

[1] Dohnalik P. Straty wody w miejskich sieciach wodociągowych. Wydawnictwo Polskiej Fundacji Ochrony Zasobów Wodnych. Bydgoszcz 2000.

[2] Hirner W., Lambert A.. Losses from Water Supply Systems: Standard terminology and recommended performance measures, IWA, London 2000.

[3] Koral W. Metodyka obniżania poziomu przecieków w sieciach wodociągowych, Wodociągi - Kanalizacja, 6(28), 2006, s. 26-29.

[4] Kwietniewski M., Rak J., Niezawodność infrastruktury wodociągowej i kanalizacyjnej w Polsce, PAN, Warszawa 2010.
[5] Mayer P. et al. AWWA Leak Detection & Water Accountability Comittee Report. Residential End Uses of Water. AWWA Research Foundation, 1999.
[6] Pietrucha-Urbanik K., Studziński A., Analiza strat wody wodociągu krośnieńskiego. Gaz, woda i technika sanitarna, nr 10, 2012, s. 452-454.
[7] Rak J. Metoda planowania remontów sieci wodociągowej na przykładzie miasta Krosna, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury - Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture. JCEEA, z. 61(1/2015), s. 225-232, DOI: 10.7862/rb.2014.15.
[8] Rak J.R. (red.): Metody oceny niezawodności i bezpieczeństwa dostawy wody dla odbiorców. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2013.
[9] Rak J.: Wybrane zagadnienia niezawodności i bezpieczeństwa w zaopatrzeniu w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2008.
[10] Rak J., Tchórzewska-Cieślak B.: Czynniki ryzyka w eksploatacji systemów zaopatrzenia w wodę. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2007.
[11] Rak J., Trojnar D.: Analiza i ocena strat wody w wodociągu Łańcuta. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury JCEEA, z. 61(1/2014), s. 245-256. DOI: 10.7862/rb.2014.1.
[12] Rak J.R., Tunia A. Analiza i ocena strat wody w wodociągu Rzeszowa. Instal, Teoria i Praktyka w Instalacjach, 5/2012, s. 42-45.
[13] World Bank Institute Performance. NRW Training Module 6, Performance Indicators, 2005.

## OCENA FUNKCJONOWANIA SIECI WODOCIĄGOWEJ NA PODSTAWIE STRAT WODY

**S t r e s z c z e n i e**

W pracy przedstawiono analizę funkcjonowania sieci wodociągowej na podstawie strat wody występujących w przykładowej sieci wodociągowej miasta. Przy wykorzystaniu otrzymanych danych eksploatacyjnych obliczono jednostkowe wielkości zużycia wody, a także ustalono podstawowe wskaźniki strat wody, które odniesiono do wartości wskaźników zalecanych min. przez AWWA. Na ich podstawie dokonano oceny stanu systemu wodociągowego. Wyznaczone jednostkowe wskaźniki objętościowe dotyczące strat wody utrzymują się na stałym poziomie. Jednostkowy wskaźnik strat wody dla lat 2007-2015 wyniósł średnio ok. 108 $dm^3 \cdot M^{-1} \cdot d^{-1}$, jednostkowy wskaźnik wody wtłaczanej do sieci przyjmuje wartości od 459,1 $dm^3 \cdot M^{-1} \cdot d^{-1}$ w 2007 roku do 402,9 $dm^3 \cdot M^{-1} \cdot d^{-1}$ w roku 2015, co oznacza jego spadek na poziomie ok. 12%. Jednostkowy wskaźnik wody sprzedanej waha się w zakresie od 288,9 do 419,5 $dm^3 \cdot M^{-1} \cdot d^{-1}$. Wskaźnik *ILI* według kryterium WBI Banding System dla krajów rozwijających się ocenia stan wodociągów jako dobry. Wartość wskaźnika *ILI* dla wodociągów odpowiada tendencjom krajowym, które wynoszą od 3,13 do 16,52 [3, 8].

**Słowa kluczowe:** sieć wodociągowa, straty wody, wskaźniki strat wody

DOI:10.7862/rb.2016.217

*Przesłano do redakcji: 29.01.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 351-364

**Dorota PIWIŃSKA**[1]
**Jadwiga KALETA**[2]

# MODEL ROZPRZESTRZENIANIA KADMU W WARSTWIE WODONOŚNEJ Z WYKORZYSTANIEM PROGRAMU PROCESSING MODFLOW

Zanieczyszczenia występujące w warstwie wodonośnej mogą być naturalne lub antropogeniczne. Skażenie gleb związkami chemicznymi i/lub metalami ciężkimi prowadzi do migracji tych zanieczyszczeń do wód podziemnych. Istnieje możliwość teoretycznego oszacowania zasięgu rozprzestrzeniania zanieczyszczeń, dzięki programom opartym na modelowaniu numerycznym. Jeden z nich, Processing Modflow, został wykorzystany w pracy. Pierwsza część modelowania obejmuje wprowadzenie danych hydrogeologicznych analizowanego obszaru oraz wykonanie bilansu wodnego, na który składa się zasilanie i drenaż wód podziemnych. Pozwala on na uzyskanie informacji o czynnikach decydujących o występowaniu tych dwóch procesów. Założono dwie warstwy wodonośne, gdzie warstwę przypowierzchniową (A) stanowią piaski drobne, a poniżej (B) zalegają iły trzeciorzędowe. Grunty te różnią się pod względem właściwości fizycznych i hydrogeologicznych, co ma wpływ na czas przesiąkania wód. Modelowaniu podlegają także dwa ujęcia wód podziemnych (studnie). Uzyskano wyniki, na podstawie których wygenerowano 5-letni obszar zasilania studni oraz mapę hydroizohips. W kolejnym etapie przystąpiono do modelowania transportu zanieczyszczenia. Zanieczyszczeniem, jakie brano pod uwagę był kadm. Program przeprowadza symulację opartą na procesach adwekcji, dyspersji i reakcjach chemicznych. Po upływie czasu symulacji wynoszącego 5 lat, otrzymano mapy ukazujące zasięg rozprzestrzeniania kadmu wraz z liniami stężeń. W rezultacie przeprowadzonych analiz, stwierdzono znaczny wpływ warunków hydrogeologicznych terenu oraz procesów zachodzących podczas transportu zanieczyszczenia na procesy zasilania i drenażu wód oraz migracji kadmu. Potrzebne dane wejściowe pochodziły z różnych pozycji literaturowych. Przeprowadzone modelowanie potwierdziło jego przydatność w ocenie transportu zanieczyszczenia w warstwie wodonośnej.

**Słowa kluczowe:** modelowanie hydrogeologiczne, Processing Modflow, bilans wodny, kadm, sorpcja

[1] Dorota Piwińska, Politechnika Rzeszowska, numer albumu: 122606
[2] Autor do korespondencji/corresponding author: Jadwiga Kaleta, Politechnika Rzeszowska, ul. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651301, jkaleta@prz.edu.pl

## 1. Wprowadzenie

Wody podziemne stanowią cenne źródło zaopatrzenia ludności w wodę. Są one szczególnie narażone na szkodliwe oddziaływanie zanieczyszczeń punktowych i obszarowych. Zanieczyszczenia te, w kontakcie z warstwą wodonośną powodują nieodwracalne obniżenie jakości wód podziemnych. Rozprzestrzenianie zanieczyszczeń w warstwie wodonośnej zależy od rodzaju zanieczyszczenia oraz warunków hydrogeologicznych danego obszaru [2]. W celu teoretycznego oszacowania ryzyka skażenia warstwy wodonośnej wykorzystuje się programy oparte na modelowaniu numerycznym. Prognozowanie, poprzez symulację transportu danego zanieczyszczenia, jak i zasięgu jego występowania, pozwala nie tylko ograniczyć, ale także zapobiegać dalszemu rozprzestrzenianiu zanieczyszczenia w praktyce.

Przykładem programu, wykorzystywanego na szeroką skalę przez osoby specjalizujące się w zakresie ochrony środowiska, hydrogeologii, ekologii i gospodarki wodnej, jest program Processing Modflow.

Symulację transportu zanieczyszczenia w warstwie wodonośnej prowadzono na przykładzie kadmu. Kadm należy do grupy metali ciężkich, naturalnie występujących w skorupie ziemskiej. Szerokie zastosowanie kadmu w przemyśle powoduje zwiększenie ryzyka narażenia człowieka na jego kancerogenne działanie. Wydobycie i przetwarzanie tego metalu skutkuje znaczną jego deponacją w środowisku [1;3].

## 2. Charakterystyka modelu numerycznego – Program Processing Modflow

Program Processing Modflow, wykorzystany w pracy do modelowania zarówno przepływu wód podziemnych, jak i transportu wybranego zanieczyszczenia, może służyć do opisywania procesów hydrologicznych, zachodzących w warstwie wodonośnej. Dodatkowo, istnieje możliwość wyznaczenia przepływu stałego oraz krótkotrwałego wód podziemnych w warstwie wodonośnej o zwierciadle napiętym i swobodnym. Na ilość wód podziemnych wpływa zasilanie i drenaż wód. O przebiegu tych procesów decydują: infiltracja wód z rzek, źródeł, strumieni, zbiorników wodnych, nawadnianie terenów, infiltracja opadów atmosferycznych oraz ewapotranspiracja i pobór wód ze studni.

Program Processing Modflow, należy do grupy programów o nazwie MODFLOW, opracowanych przez U.S. Geological Survey. Jest to organizacja naukowo-badawcza, która zajmuje się problemami z zakresu 4 dyscyplin: geologii, geografii, biologii i hydrologii. Pierwsza wersja MODFLOW została wydana w 1983 roku. W kolejnych latach pojawiło się wiele wersji, tj. MODFLOW-88, MODFLOW-96, MODFLOW-2000, MODFLOW-2005, MODFLOW-USG oraz wersji komercyjnych: GMS – Groundwater Modeling System, Groundwater Vistas, PMWIN(1991-2001), czyli Processing Modflow, Visual MODFLOW, Argus ONE, Leapfrog Hydro [17].

W programie Modflow przedstawia się warstwę wodonośną za pomocą prostokątnych bloków w siatce dyskretyzacyjnej. Siatka dyskretyzacyjna składa się z rzędów, kolumn oraz warstw, a każdy blok nosi nazwę „komórki". Każdej komórce muszą zostać przypisane określone parametry warstwy wodonośnej, które wprowadza się jako dane wejściowe do modelu. Dane te, uwzględniają informacje na temat:
- zwierciadła warstwy wodonośnej – zwierciadło napięte bądź swobodne,
- ilości warstw wodonośnych,
- miąższości warstwy wodonośnej,
- stropu oraz spągu warstwy wodonośnej,
- wysokości hydraulicznej,
- poziomej i pionowej przewodności hydraulicznej,
- porowatości efektywnej,
- prędkości zasilania warstwy wodonośnej,
- prędkości pobierania wody ze studni dla poszczególnych warstw wodonośnych,
- relacji między warstwą wodonośną, a rzeką,
- inne, związane z modelowanym obszarem.

Na podstawie wprowadzonych danych, program wykonuje obliczenia dla przepływu wód podziemnych w warstwie wodonośnej. Ponadto, program Modflow określa bilans wodny dla całej warstwy wodonośnej, uwzględniając zasilanie i drenaż wód. Dodatkowo, przy założonych wysokościach hydraulicznych zwierciadła wody podziemnej, program generuje mapę hydroizohips dla poszczególnych warstw.

Z kolei transport wybranego zanieczyszczenia, jakim jest kadm, przeprowadzono z wykorzystaniem jednej z funkcji programu – modelu MT3D. Model ten, opiera się na procesach adwekcji, dyspersji hydrodynamicznej i fizycznej oraz reakcjach chemicznych. Na początku symulacji transportu zanieczyszczenia wprowadza się dane dotyczące tych poszczególnych procesów. Ponadto, należy podać stężenie danego zanieczyszczenia i wielkość powierzchni zanieczyszczonej.

## 3. Opis modelowanego obszaru

### 3.1. Budowa geologiczna i warunki hydrogeologiczne

Obiekt modelowania stanowi przykładowy obszar, którego parametry wejściowe do symulacji zostały oparte na danych literaturowych.

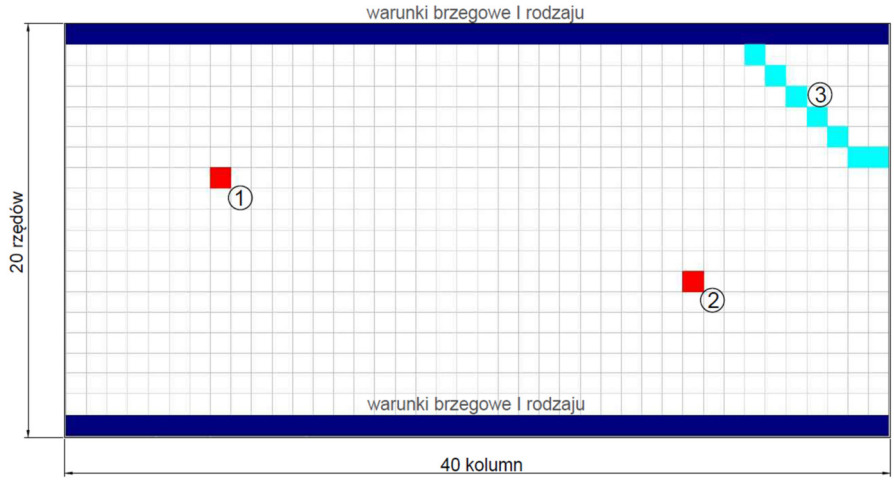
Badaniami modelowymi objęto obszar o powierzchni około 2 $km^2$. Siatka dyskretyzacyjna dla tego obszaru ma kształt prostokąta i składa się z 20 rzędów i 40 kolumn, a wielkość pola elementarnego dla każdego z bloków obliczeniowych wynosi $\Delta x = 50$ m.

Założono, że w obrębie modelu występują dwie warstwy wodonośne, gdzie warstwa A posiada zwierciadło swobodne, a warstwa B – napięte. Wyznaczono strop modelowanych warstw wodonośnych i przypisano warstwie A – 100 m n.p.m.,

a warstwie B – 95 m n.p.m. Z kolei dolna powierzchnia ograniczająca warstwę (spąg warstwy wodonośnej) wynosi dla warstwy A – 95 m n.p.m. i dla warstwy B – 91 m n.p.m. Zatem, miąższość warstw wodonośnych obliczono odejmując spąg warstwy wodonośnej od stropu warstwy wodonośnej i otrzymano kolejno dla warstwy A – 5 m, a dla warstwy B – 4 m.

Model jest ograniczony od północnego-wschodu rzeką, której przypisano warunek brzegowy I rodzaju, który wymaga wprowadzenia wysokości hydraulicznej dla rzeki. Z kolei ujęcia wód podziemnych symulowano warunkami II rodzaju. Oznacza to, że znana jest wartość strumienia filtracji dla poszczególnych warstw.

Modelowany obszar został przedstawiony na rysunku nr 1.

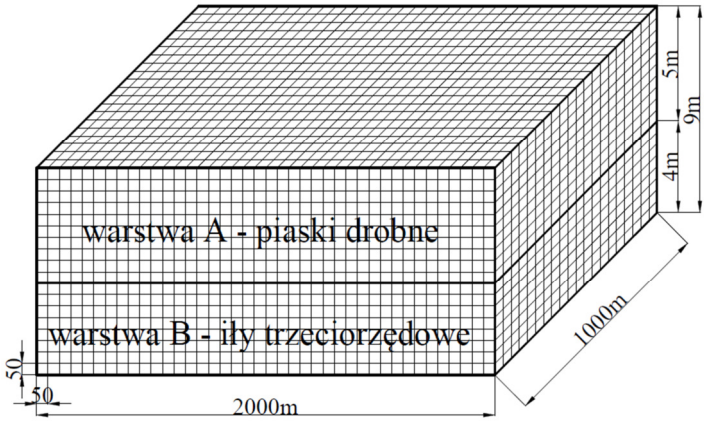



Rys. 1. Modelowany obszar składający się z dwóch studni (1,2) oraz rzeki (3) ograniczony od N i S stałymi warunkami I rodzaju (opracowanie własne)

Fig. 1. Modeled area consisting of two wells (1,2), river (3), limited by constant-head boundaries on the North and on the South (made by the author)

Omawiany teren położony jest na masywie o nieskomplikowanej tektonice o układzie płytowym, gdzie warstwy skalne zalegają poziomo, a młodsze pokłady warstw skalnych przykrywają warstwy starsze. Warstwy te, ograniczone są płaszczyzną dolną spągu i od góry płaszczyzną stropu. Są to cechy charakterystyczne dla skał osadowych [15]. Dla modelowanego obszaru w warstwie przypowierzchniowej występują piaski drobne, a pod nimi usytuowane są iły trzeciorzędowe.

Na podstawie siatki dyskretyzacyjnej (rys. 1) opracowano trójwymiarowy model analizowanego obszaru. Model ten wraz z poszczególnymi warstwami geologicznymi przedstawiono na rysunku nr 2.




Rys. 2. Model trójwymiarowy analizowanego obszaru (A – piaski drobne, B – iły trzeciorzędowe) (opracowanie własne)

Fig. 2. Three dimensional model of analysed area (A – fine sand, B – silt) (made by the author)

Pobieranie wód podziemnych odbywa się za pomocą ujęć tych wód w postaci dwóch studni o wydajności: studnia nr 1 o wydajności 5 $m^3 \cdot h^{-1}$ (0,0014 $m^3 \cdot s^{-1}$) oraz studnia nr 2 – 8 $m^3 \cdot h^{-1}$ (0,0022 $m^3 \cdot s^{-1}$). Zasilanie warstw wodonośnych następuje poprzez infiltrację z cieków powierzchniowych (rzeka) oraz infiltrację odpadów atmosferycznych. Założono infiltrację opadów atmosferycznych wynoszącą $4 \cdot 10^{-8}$ $m \cdot s^{-1}$ i taką wartość wprowadzono do programu Modflow. Z kolei zasilanie poprzez infiltrację wód ze źródeł powierzchniowych (rzeka) wymagało obliczenia przewodności hydraulicznej koryta rzeki. Przewodność tą, otrzymano ze wzoru (1) [9]:

$$\text{Przewodność hydrauliczna rzeki} = \frac{K \cdot L \cdot W}{M} [m^2 \cdot s^{-1}] \quad (1)$$

gdzie:
$K$ – przewodność hydrauliczna dla piasku drobnego, założono: $K = 1\ m \cdot d^{-1}$ [8]
$L$ – długość rzeki, $L = 350\ m$,
$W$ – szerokość rzeki, $W = 50\ m$,
$M$ – grubość koryta rzecznego, $M = 2\ m$,
i wynosi ona: $0{,}1013[m^2 \cdot s^{-1}]$.

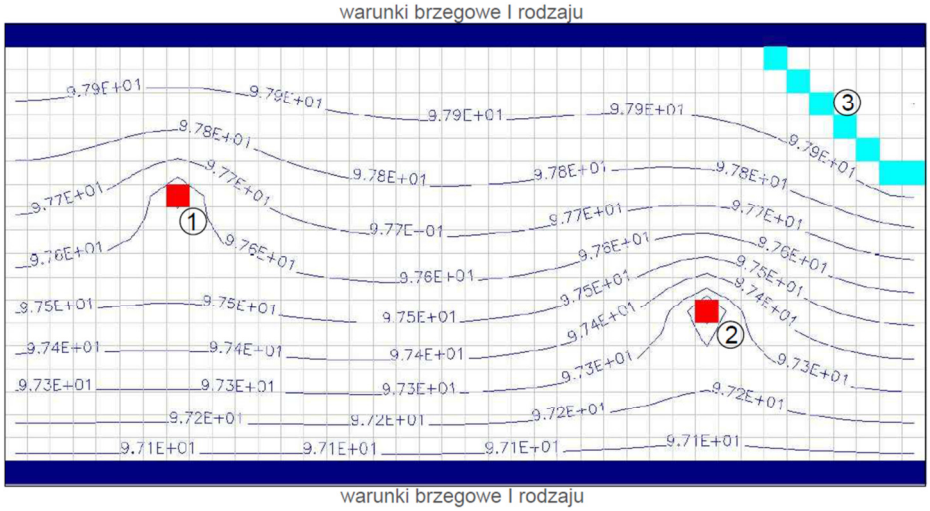
Przesiąkanie wód infiltracyjnych zależy od pionowej i poziomej przewodności hydraulicznej, co wiąże się z właściwościami podłoża, na którym zalegają warstwy wodonośne. Przewodności te, stanowią zdolność ośrodka skalnego do pionowej, bądź poziomej infiltracji wody podziemnej. Przewodność hydrauliczna pionowa stanowi 10% wartości przewodności poziomej [4;14].

Na podstawie rozeznania literatury [7;8;16] do modelu przyjęto przewodność hydrauliczną poziomą dla piasku drobnego równą 1 $m \cdot d^{-1}$, natomiast dla

iłów – 0,4 $m \cdot d^{-1}$ oraz gęstość nasypową dla piasku drobnego wynoszącą 1850 $kg \cdot m^{-3}$, a dla iłów – 1600 $kg \cdot m^{-3}$ oraz porowatość dla piasku drobnego – 0,42, dla iłów – 0,3.

Położenie zwierciadła wód podziemnych określa wysokość hydrauliczna (warunek brzegowy I rodzaju), której nadano w modelu wartość 97 m n.p.m., a następnie przypisano rzędowi usytuowanemu na północy wartość 98 m n.p.m.

Położenie hydroizohips dla modelowanego obszaru przedstawiono na rysunku nr 3.



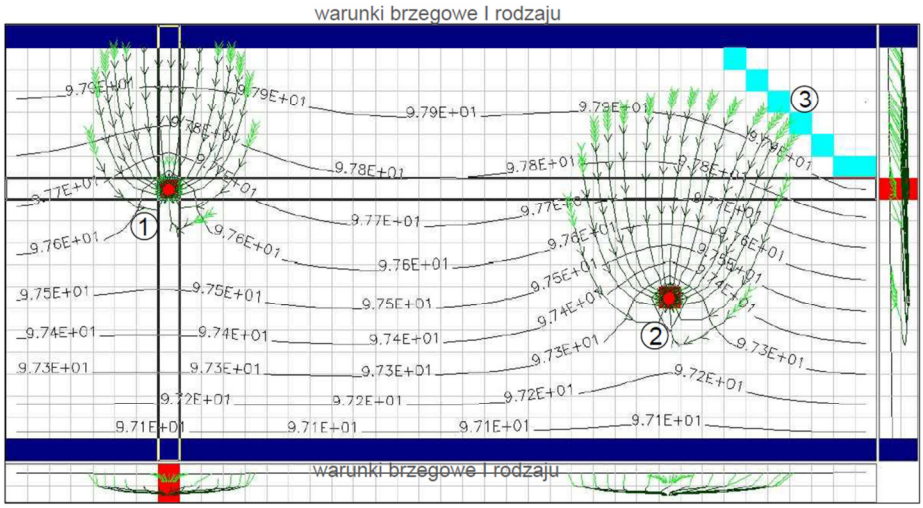

Rys. 3. Położenie hydroizohips dla warstwy B (1,2–studnie, 3–rzeka) (opracowanie własne)

Fig. 3. A contour map of the hydraulic heads in the B layer (1,2–wells, 3–river) (made by the author)

W celu określenia strumienia przepływu wód podziemnych dla omawianego terenu konieczne jest podanie czasu symulacji. Założono, że czas symulacji będzie przedstawiony w sekundach. Maksymalna długość czasu trwania symulacji wynosi 5 lat, co odpowiada 1,7784E+08 s.

W programie Modflow istnieje możliwość otrzymania obszaru zasilania studni w przeciągu dowolnego czasu. Przeprowadzono symulację dla 5 lat, a wyniki, jakie uzyskano przedstawiono na rysunku nr 4.

Czas symulacji wynoszący 5 lat pozwolił na uzyskanie wyników, które pokazują linie spływu wód do poszczególnych ujęć z dokładnych źródeł. Zasilanie ujęcia pierwszego wynika z różnicy wysokości hydraulicznych zwierciadła wód podziemnych, co wymusza przepływ w kierunku występującej studni. Natomiast spływ wód do ujęcia drugiego pochodzi ze źródła powierzchniowego, jakim jest rzeka oraz tak jak dla pierwszej studni, z różnicy wysokości poziomu wodonośnego.




Rys. 4. Obszar zasilania studni nr 1 i 2 dla 5 lat (1,2–studnie, 3–rzeka) (opracowanie własne)

Fig. 4. 5-years-capture zone of the pumping well no. 1 and 2 (1,2–wells, 3–river) (made by the author)

Wykonanie modelu pozwoliło na otrzymanie bilansu wodnego, który umożliwia dokładnie określić zasilanie i drenaż wód podziemnych, na które wpływają: wysokość zwierciadła wód podziemnych, infiltracja opadów atmosferycznych oraz infiltracja wód pochodzących z cieków powierzchniowych i wielkość pobierania wody ze studni.

Bilans natężenia przepływu wód podziemnych dla modelu przedstawiono w tabeli nr 1, gdzie oprócz strumienia filtracyjnego, zamieszczono procentowy udział poszczególnych składników do całkowitej sumy bilansu wodnego.

Z danych zamieszczonych w tabeli nr 1 wynika, że największa ilość wód zasilających zbiornik wód podziemnych pochodzi z infiltracji opadów atmosferycznych, co stanowi aż 37,73% udziału w całkowitym bilansie. Z kolei drenaż

Tabela 1. Bilans natężenia przepływu wód podziemnych (opracowanie własne)

Table 1. Groundwater flow budget (made by the author)

| **Składnik bilansu wód podziemnych** | **Natężenie przepływu strumienia filtracyjnego [$m^3 \cdot s^{-1}$]** | | **Udział w ogólnym bilansie [%]** | |
|---|---|---|---|---|
| | **Zasilanie** | **Drenaż** | **Zasilanie** | **Drenaż** |
| Zwierciadło wód *Constant Head* | $1{,}7522306 \cdot 10^{-3}$ | $7{,}2415043 \cdot 10^{-3}$ | 8,09 | 33,43 |
| Pobór z ujęcia wód podz. *Wells* | - | $3{,}6000002 \cdot 10^{-3}$ | 0 | 16,62 |
| Infiltracja opadów atm. *Recharge* | $8{,}1720185 \cdot 10^{-3}$ | - | 37,73 | 0 |
| Rzeka *River Leakage* | $8{,}924338 \cdot 10^{-4}$ | $2{,}803695 \cdot 10^{-6}$ | 4,12 | 0,01 |
| Suma składników bilansu | 0,010817 | 0,010844 | 49,94 | 50,06 |

wód w głównej mierze wynika z różnicy wysokości hydraulicznych zwierciadła wód podziemnych, które wymuszają przepływ wód, a co za tym idzie – również ich odprowadzenie poza obszar zasilania studni. Procentowy udział tego rodzaju drenażu wynosi 33,43%.

Ostatecznie stwierdzono, że drenaż przeważa nad zasilaniem wód podziemnych, gdyż w końcowych obliczeniach dla pierwszego uzyskano 49,94%, a dla drugiego – 50,06%. Przy długotrwale utrzymującym się drenażu wód przewyższającym zasilanie warstw wodonośnych, może dojść do pogłębiania się leja depresyjnego, skąd może wynikać obniżenie zwierciadła wód, a także konieczność zmiany lokalizacji istniejących ujęć wody.

### 3.2. Charakterystyka procesów przebiegających w modelu MT3D

Symulacja transportu zanieczyszczeń odbywa się w modelu MT3D, który stanowi jedną z funkcji programu Processing Modflow. Model ten, przedstawia transport substancji rozpuszczonej wykorzystując wysokości hydrauliczne zwierciadła wód podziemnych i przepływ wód podziemnych z funkcji Modflow. Ponadto, program oblicza zmiany w stężeniach pojedynczego zanieczyszczenia w wodach podziemnych za pomocą procesów adwekcji, dyspersji i reakcji chemicznych [4].

Model MT3D proponuje cztery metody przeprowadzania adwekcji: metodę cech charakterystycznych (MOC), zmodyfikowaną metodę cech charakterystycznych oraz hybrydową metodę cech charakterystycznych. Dodatkowo, przepływ cząstek zanieczyszczeń można obliczyć za pomocą metody Eulera, metody Runge-Kutta czwartego rzędu i połączenia tych dwóch metod [4]. Wprowadzenie danych dotyczących adwekcji opiera się na oszacowaniu ilości cząstek i gradientu stężeń, który napędza przepływ cząstek zanieczyszczeń.

Kolejny proces wymagający określenia to dyspersja, która opiera się na zjawisku rozpraszania jednej fazy w drugiej o charakterze ciągłym. Program wymaga podania poziomej, pionowej i podłużnej stałej dyspersji oraz współczynnika dyfuzji molekularnej substancji rozpuszczonej.

Następnie do programu Modflow należy podać dane wymagane do przeprowadzenia reakcji chemicznych. Reakcje chemiczne opierają się na określeniu rodzaju sorpcji, który jest wyrażony za pomocą współczynnika opóźnienia R. Istnieją trzy typy izoterm proponowanych przez program Modflow:

- izoterma liniowa,
- izoterma Langmuira,
- izoterma Freundlicha.

Do przeprowadzanej w pracy symulacji zastosowano izotermę liniową. Izoterma liniowa mówi, że stężenie substancji zaabsorbowanej jest wprost proporcjonalna do stężenia substancji rozpuszczonej. Współczynnik opóźnienia R jest zatem niezależny od stężenia i można go obliczyć posługując się równaniem (2) [4]:

$$R_{k,i,j} = 1 + \frac{\rho_b}{n_{k,i,j}} \cdot K_d[-] \tag{2}$$

gdzie:
$\rho_b$ – gęstość nasypowa porowatego materiału skalnego, wyrażona jako stosunek suchej masy gleby do całkowitej jej objętości, kg·m$^{-3}$,
$n_{k,i,j}$ – porowatość skały, [-],
$K_d$ – współczynnik podziału zależny od rodzaju substancji rozpuszczonej i materiału skalnego, m$^3$·kg$^{-1}$.

Jak już wspomniano, wartość współczynnika opóźnienia R świadczy o procesach sorpcji związków w glebie. Dodatkowo określa, o ile wolniej przebiega proces migracji danej substancji, ulegającej sorpcji, od rzeczywistej prędkości przepływu wód podziemnych. Im wyższy współczynnik opóźnienia, tym intensywniej zachodzą procesy sorpcji substancji w glebie.

Zależność intensywności sorpcji od współczynnika opóźnienia R przedstawia tabela nr 2.

Tabela 2. Zależność intensywności sorpcji od współczynnika opóźnienia R, na podstawie [10]

Table 2. Relationship between sorption intensity and retardation factor R, based on [10]

| Intensywność sorpcji | Współczynnik opóźnienia R |
|---|---|
| Sorpcja nie zachodzi | 1 |
| Sorpcja mała | 1-2 |
| Sorpcja średnia | 2-10 |
| Sorpcja duża | 10-100 |
| Sorpcja bardzo duża | 100-1000 |
| Sorpcja nieograniczona | >1000 |

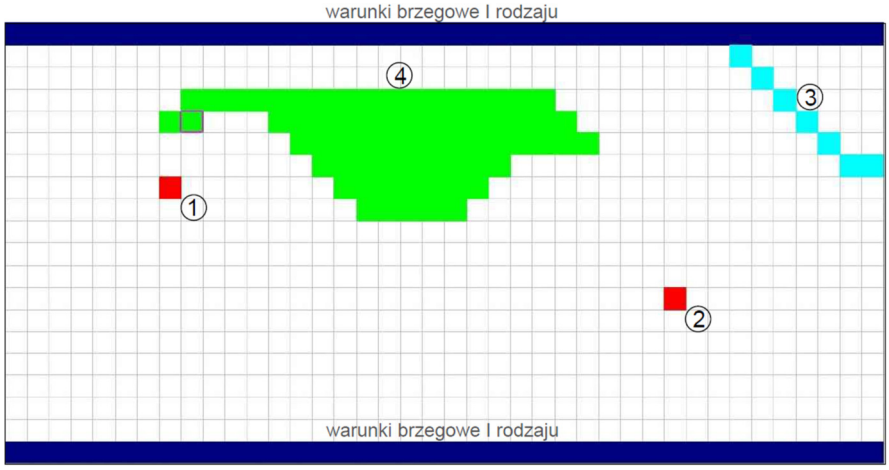
Intensywność sorpcji zmienia się dla danego pierwiastka w stosunku do rodzaju gruntu. Sorpcja zależy od zawartości w glebie cząstek koloidalnych, ilastych i próchnicy. Im mniejsze średnice posiadają cząstki koloidalne, tym silniejsze właściwości sorpcyjne gleba wykazuje. Oznacza to, że każda gleba ma zdolność zatrzymywania danej substancji przez część sorbującą. Taka cecha gleby jest nazywana kompleksem sorpcyjnym [10].

### 3.3. Modelowanie transportu kadmu w warstwie wodonośnej

Zanieczyszczeniem, które analizowano to kadm. Do tego celu wykorzystano model MT3D. Założono, że na obszarze, poddanym modelowaniu, występuje zakład przemysłowy, jakim jest huta cynku, w okolicach dwóch ujęć wody. Stąd też, wynika zagrożenie zanieczyszczenia kadmem gleb, a tym samym warstwy wodonośnej. Kadm łatwo rozpuszcza się w środowisku kwaśnym i może zostać wyługowany z gleby szybciej od innych metali ciężkich. Występowanie w drugiej warstwie iłów sprzyja sorbowaniu kadmu w kompleksie sorpcyjnym.

Gleby w okolicach huty cynku zawierają stężenie kadmu na poziomie 103 ppm, co stanowi 103000 mg·m$^{-3}$ i taką wartość wprowadzono do programu.

Obszar obejmujący zanieczyszczenie gleby kadmem, został przedstawiony na rysunku nr 5.




Rys. 5. Zasięg występowania zanieczyszczenia na początku symulacji (1, 2 – studnie, 3 – rzeka, 4 – obszar zanieczyszczony kadmem) (opracowanie własne)

Fig. 5. Extent of contamination at the beginning of simulation (1,2 – wells, 3 – river, 4 – area contaminated by cadmium) (made by the author)

Na podstawie rysunku nr 5 oszacowano powierzchnię występowania kadmu. Całkowity obszary zanieczyszczony składa się z 67 pól elementarnych o wymiarach jednego pola 50 m x 50 m, co stanowi całkowitą powierzchnię o wartości 0,1675 $km^2$.

W celu uzyskania informacji na temat zasięgu rozprzestrzeniania substancji rozpuszczonej względem czasu, należy wprowadzić dane dotyczące transportu tego zanieczyszczenia. Tak jak wspomniano wcześniej, transport ten opisują procesy adwekcji, dyspersji i reakcji chemicznych.

Najprostszą metodą przebiegu adwekcji jest metoda cech charakterystycznych (MOC) i taką też wybrano do modelowania.

Rozpraszanie substancji rozpuszczonej w ośrodku skalnym wyraża się za pomocą stosunku pionowej poprzecznej dyspersyjności do podłużnej dyspersyjności (TRPV) oraz poziomej poprzecznej dyspersyjności do podłużnej dyspersyjności (TRPT). Dyspersyjność podłużna dla piasków drobnych wynosi 1,5 m [11], natomiast dla iłów – 1 m [6]. Dla dyspersyjności poprzecznej poziomej i pionowej przyjmuje się wartości mniejsze o jeden rząd wielkości. Dlatego też, parametrom (TRPV i TRPT) przypisano wartość 0,1. Z kolei współczynnik dyfuzji molekularnej dla kadmu nie występuje.

Przebieg reakcji chemicznych w programie opiera się na określeniu rodzaju sorpcji, opisanego za pomocą współczynnika opóźnienia, który obliczono posługując się wybraną izotermą liniową:

- dla piasku drobnego (warstwa A)

$$R_{k,i,j} = 1 + \frac{1850\ kg \cdot m^{-3}}{0{,}42} \cdot 0{,}00068\ m^3 \cdot kg^{-1} \cong 4[-]$$

gdzie:
$1850\ kg \cdot m^{-3}$ – gęstość nasypowa dla piasku drobnego [9],
$0{,}42$ – porowatość piasku drobnego [9],
$0{,}00068\ m^3 \cdot kg^{-1}$ – współczynnik podziału dla kadmu (piasek) [5].

- dla iłów trzeciorzędowych (warstwa B)

$$R_{k,i,j} = 1 + \frac{1600\ kg \cdot m^{-3}}{0{,}3} \cdot 0{,}00017\ m^3 \cdot kg^{-1} \cong 2[-]$$

gdzie:
$1600\ kg \cdot m^{-3}$ – gęstość nasypowa dla iłów [9],
$0{,}3$ – porowatość iłów [9],
$0{,}00017 m^3 \cdot kg^{-1}$ – współczynnik podziału dla kadmu (ił) [5].

Porównując uzyskane wyniki z danymi literaturowymi [5], wnioskuje się, że intensywność sorpcji kadmu jest mała przy występowaniu tego pierwiastka w glebach piaszczystych, co potwierdzają wyniki obliczeń współczynnika opóźnienia R = 4. Z kolei na gruntach ilastych sorpcja kadmu zachodzi w stopniu nieograniczonym, natomiast na podstawie wykonanych obliczeń współczynnika opóźnienia R = 2, stwierdzono, że sorpcja jest mała (występują pewne niezgodności). Jednakże, do modelowania transportu zanieczyszczenia wprowadzono obliczone wartości współczynników opóźnienia R.

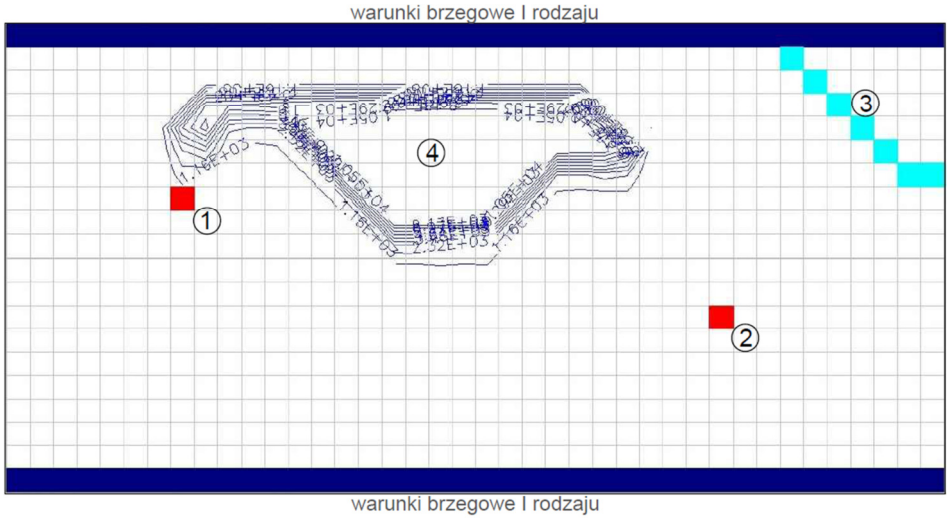
W celu zobrazowania zasięgu rozprzestrzeniania kadmu względem czasu, wybrano czas symulacji wynoszący 5 lat.

Na rysunkach 6 i 7 przedstawiono obszar występowania kadmu po 5 latach w warstwie A i B.

Analizując przebieg symulacji dla 5 lat, jednoznacznie stwierdza się zmianę zasięgu występowania zanieczyszczenia wraz z upływem czasu. Wyniki symulacji transportu składnika zanieczyszczającego pozwalają na ocenę ryzyka przedostania się danego zanieczyszczenia do warstwy wodonośnej. Niestety program Modflow operuje modelem jednowymiarowym w przedstawieniu zasięgu rozprzestrzeniania się zanieczyszczeń.

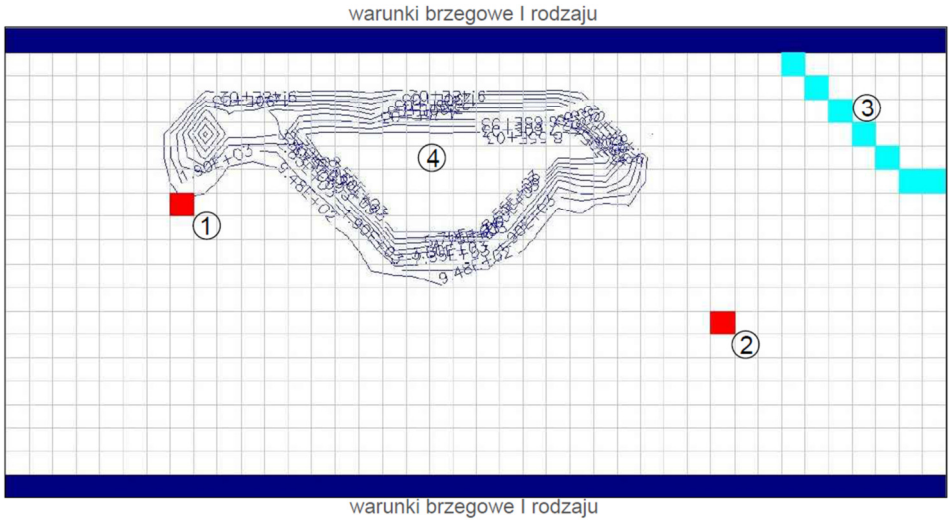
Czas trwania symulacji wynoszący 5 lat pokazuje rozbieżność w zasięgu występowania zanieczyszczenia dla warstwy A i B. Różnice te mogą wynikać z odmiennych ośrodków skalnych pod względem rodzaju, porowatości, gęstości i przewodności hydraulicznej oraz właściwości kadmu, który inaczej reaguje w kontakcie z różnymi rodzajami gleb. Wszystkie te parametry wpływają na szybkość transportu substancji rozpuszczonej.

Wraz z upływem czasu zmienia się nie tylko powierzchnia obszaru zanieczyszczonego, ale również stężenie samego zanieczyszczenia. Na początku mo-




Rys. 6. Zasięg występowania zanieczyszczenia po 5 latach w warstwie A (1,2 – studnie, 3 – rzeka, 4 – obszar zanieczyszczony kadmem) (opracowanie własne)

Fig. 6. Extent of contamination in the A layer in five years time (1,2 – wells, 3 – river, 4 – area contaminated by cadmium) (made by the author)




Rys. 7. Zasięg występowania zanieczyszczenia po 5 latach w warstwie B (1,2 – studnie, 3 – rzeka, 4 – obszar zanieczyszczony kadmem) (opracowanie własne)

Fig. 7. Extent of contamination in the B layer in five years time (1,2 – wells, 3 – river, 4 – area contaminated by cadmium) (made by the author)

delowania wprowadzono stężenie kadmu wynoszące 103000 mg·m$^{-3}$. Analizując przebieg transportu zanieczyszczenia po 5 latach symulacji, zauważono znaczne

przesunięcie linii stężeń w kierunku ujęć wody. Może to być związane z kierunkiem spływu wód, który wymusza przepływ danej substancji w stronę ujęcia wody. Dla warstwy A uzyskano wartości stężeń od 1160 $mg \cdot m^{-3}$ do 10500 $mg \cdot m^{-3}$, a dla warstwy B od 948 $mg \cdot m^{-3}$ do 1900 $mg \cdot m^{-3}$. Dopuszczalna wartość kadmu w glebie wynosi 5 – 10 $mg \cdot g^{-1}$ (9,25 – 18,5 $mg \cdot m^{-3}$) [12], a dla wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi – 5 $\mu g \cdot l^{-1}$ (5 $mg \cdot m^{-3}$) [13].

## 4. Podsumowanie

Modelowanie hydrogeologiczne pełni istotną rolę w ocenie zasobów wodnych i zasięgu rozprzestrzeniania zanieczyszczenia. W wyniku przeprowadzonej symulacji określającej bilans wodny, stwierdzono, że na zasilanie i drenaż wód wpływają warunki hydrogeologiczne terenu. Po ostatecznej analizie otrzymanego bilansu wodnego wnioskuje się, że drenaż przeważa nad zasilaniem wód podziemnych.

Na podstawie programu Processing Modflow wygenerowano mapy zasięgu rozprzestrzeniania kadmu w warstwach: (A) stanowiącej piaski drobne i (B) zbudowanej z iłów trzeciorzędowych. Stężenia kadmu są znacznie przekroczone w każdej warstwie. Pomimo, że stężenie początkowe kadmu uległo znacznej redukcji, to nadal istnieje ryzyko skażenia ujęć wody po upływie czasu symulacji wynoszącego 5 lat. Skażony teren stanowi zagrożenie dla ujęć wody pod względem jej jakości oraz dla warstwy wodonośnej, stąd też oprócz szukania nowych lokalizacji studni, należy przewidzieć remediację skażonego środowiska wodno-gruntowego poprzez zastosowanie technik poprawiających stan zanieczyszczonego obszaru.

## Literatura

[1] ATSDR, Draft Toxicological Profile for Cadmium, Atlanta, Georgia: US Department of Health and Human Services, 2008, s. 1-6.
[2] Balcerzak W., Uzdatnianie wód kopalnianych zawierających metale ciężkie, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture. JCEEA, t. XXXI, z. 61 (4/14), październik–grudzień 2014, s. 5-20, DOI:10.7862/rb.2014.123.
[3] Bernhoft R.A., Cadmium Toxity and Treatment, Hindawi Publishing Corporation, The Scientific World Journal, Volume 2013, Article ID 394652, 7 pages, 2013.
[4] Chiang W.-H., 3D Groundwater Modeling with PMWIN: A Simulation System for Modeling Groundwater Flow and Transport Processes, Springer Berlin Heidelberg New York 2005.
[5] Dokument Ministerstwa Środowiska pt. „Metody wyznaczania wartości parametrów hydrodynamicznych oraz parametrów migracji zanieczyszczeń w wodach podziemnych, 2006, s. 11-36.
[6] Harpaz Y., Field experiments In re charge and mixing through Wells. Underground Water Storage Study Tech. Report 17. Publ. 483. Tahal-Water Plann. For. Isr., Tel Aviv 1965.
[7] Koda E., Wiencław E., Kołanka T., Modelowanie przepływu wód podziemnych i infiltracji zanieczyszczeń w korpusie odpadów składowiska, Katedra Geoinżynierii SGGW, 2007, s. 4-7.
[8] Lovanh N., Zhang Y.-K., Heathcote R.C., Alvarez P.J.J., Guidelines to determine site-specific parameters for modeling the fate and transport of monoaromatic hydrocarbons in groundwater, The University of Iowa, Iowa City, 2000, s. 10-15.

[9] Masterson J., Barlow P.M., Effects of Simulated Groundwater Pumping and Recharge on Groundwater Flow in Cape Cod, Martha's Vineyard, and Nantucket Island Basins, Massachusetts, U.S. Geological Survey Water-Supply Paper 2447, 1998, s. 26-27.
[10] Osmęda-Ernst E., Witczak S., Parametry migracji wybranych zanieczyszczeń w wodach podziemnych. [in:] Ochrona wód podziemnych w Polsce. Stan i kierunki badań. Wyd. SGGW-AR, Warszawa 1991.
[11] Papadopulos S.S., Larson S.P., Aquifer storage of heated water: II. Numerical simulation of field results. Groundwater, 1978, s. 242-248.
[12] Przeździecki Z., „Biologiczne skutki chemizacji środowiska", Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1980.
[13] Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 13 listopada 2015r. w sprawie jakości wody przeznaczonej do spożycia przez ludzi (Dz.U. 2015 poz. 1989).
[14] Zelenakova M., Hudakova G., The necessity of hydrogeological survey in infiltration systems design, Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury – Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture. JCEEA, t. XXXI, z. 61 (3/I/14), lipiec–wrzesień 2014, s. 401-409, DOI:10.7862/rb.2015.68.
[15] http://geografia_liceum.republika.pl/struktura/struktury.html [data dostępu: 24.02.2016].
[16] http://pracownik.kul.pl/files/11694/public/gig9.pdf „Fizyczne właściwości gleb" [data dostępu: 24.02.2016].
[17] http://www.usgs.gov/ [data dostępu: 14.03.2016].

## USING OF PROCESSING MODFLOW PACKAGE TO SIMULATE SPREADING OF CADMIUM IN THE AQUIFER

**S u m m a r y**

Contamination, which are presented in the aquifer, can be natural and anthropogenic. Soil contamination by chemical compounds or heavy metals leads to migration of those contaminants into groundwater. It can be destroyable. There is an opportunity to estimate spreading of contamination theoretically. Every programme based on numerical modeling is helpful. One of them, Processinf Modflow, is used in this thesis. First part of simulation contains hydrogeological data about analyzed area and subregional water budget which includes recharge and discharge of groundwater. It leads to get information about those two processes. There are two aquifers which consist of first layer of fine sand (A) and second layer of silt (B). These soils varies according to physical and hydrogeological properties which have an impact on filtration time. Two wells are also simulated. Maps of 5-years capture zone of the pumping well and hydraulic heads are generated. Next part of simulation contains migration of contaminant. Cadmium is the contaminant which is simulated. Programme simulates processes of advection, dispersion and chemical reaction. Simulation time is 5 years. Maps of spreading of contaminant is given with all the concentration lines. Impact of hydrogeological conditions and processess ocurring in contaminant transport on recharge and discharge of groundwater and migration of cadmium is analyzed All the input data comes from scientific data. This simulation confirms that this programme is useful in assessment of contaminant transport in the aquifer.

**Keywords:** hydrogeological modeling, Processing Modflow, water budget, cadmium, sorption

DOI: 10.7862/rb.2016.218

*Przesłano do redakcji: 30.09.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 365-372

**Estera PRZENZAK**[1]
**Justyna TARNOWSKA**[2]
**Mariusz FILIPOWICZ**[3]

# SYMULACJE ODBIORNIKA CIEPŁA WYSOKOTEMPERATUROWEGO PRACUJĄCEGO W UKŁADZIE HELIOENERGETYCZNYM

W niniejszym artykule przedstawione zostały wyniki symulacji komputerowych układu absorpcji skoncentrowanego promieniowania słonecznego przez odbiornik ciepła wysokotemperaturowego. Przedstawiono metodę Śledzenia Promienia opartą na algorytmie Monte Carlo (Ray Tracing Monte Carlo - RTMC).
Przeanalizowany został układ dwuelementowego koncentratora promieniowania słonecznego i różnych wersji odbiornika ciepła wysokotemperaturowego. Zaproponowano odbiorniki: płaski, wypukły oraz wklęsły. Przy tym dwa ostatnie przeanalizowano w wersjach z różnymi promieniami ich krzywizny tj. dla promienia 40, 60 oraz 90cm. Symulacje przebiegu promieni w układzie optycznym koncentratora przeprowadzono dla odbiorników umiejscowionych w różnych odległościach od powierzchni lustra skupiającego.
W efekcie przeprowadzonych badań wygenerowano znormalizowane mapy rozkładu natężenia promieniowania na powierzchniach absorpcyjnych odbiorników oraz obliczono wzmocnienie promieniowania na analizowanych powierzchniach. Na ich podstawie wskazano najkorzystniejsze wersje odbiornika z optymalnym umiejscowieniem względem koncentratora.
Wykazano, że pomimo osiągnięcia najwyższego wzmocnienia przez odbiornik wypukły, najlepszym rozwiązaniem będzie zastosowanie odbiornika płaskiego. Jest to spowodowane przede wszystkim bardzo niekorzystnym rozkładem natężenia na powierzchni odbiornika wypukłego oraz zbyt małym wzrostem wzmocnienia promieniowania względem odbiornika płaskiego. Zaznaczono, że dodatkową zaletą odbiornika płaskiego jest jego prostota konstrukcji.

**Słowa kluczowe:** Ray Tracing, Monte Carlo, symulacje komputerowe, skoncentrowane promieniowanie słoneczne, absorpcja promieniowania słonecznego

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Estera Przenzak, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 126173428; esterap@agh.edu.pl

[2] Justyna Tarnowska, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tarnowska.justynna@gmail.com

[3] Mariusz Filipowicz, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków; tel. 126175192; filipow@agh.edu.pl

# 1. Wprowadzenie

Energia promieniowania słonecznego jest coraz częściej wykorzystywana. Zaspokojenie potrzeb związanych z ogrzaniem wody użytkowej czy centralnego ogrzewania nie stanowi już wyzwania. Obecnie na całym świecie badane i projektowane są instalacje słoneczne umożliwiające m.in. produkcję chłodu, generację energii mechanicznej czy zgazowanie paliw stałych. Jest to możliwe głównie dzięki zastosowaniu koncentratorów promieniowania słonecznego [1-4]. Realizacja badań eksperymentalnych nad układami skupiającymi promieniowanie słoneczne jest jednak dość trudna. Wynika to z faktu, iż promieniowanie słoneczne jest niewidoczne, a w ognisku skupionych promieni panują wysokie temperatury. W kwestii efektywności, istotną rolę odgrywają układy absorberów skoncentrowanego promieniowania tj. odbiorniki ciepła wysokotemperaturowego. Wyznaczenie optymalnych warunków pracy takich układów ich badanie i pomiary są często bardzo trudne lub czasem niemożliwe do zrealizowania. Ułatwieniem są tutaj symulacje komputerowe [5-7].

# 2. Opis procedury badawczej

## 2.1. Metoda Śledzenia Promienia typu Monte Carlo

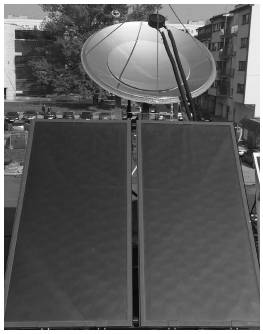
W celu przeprowadzenia badań nad systemami helioenergetycznymi stosuje się często zmodyfikowaną algorytmem Monte Carlo metodę Śledzenia Promieni (RTMC). Standardowa metoda Śledzenia Promienia wykorzystywana jest do generowania realistycznych obrazów graficznych. W metodzie tej śledzone są tylko te promienie, które przechodząc przez scenę optyczną trafiają do oka obserwatora (kamery). Zmodyfikowana metoda zaś polega na śledzeniu wszystkich promieni generowanych przez źródło światła. Dzięki algorytmowi Monte Carlo promienie emitowane są losowo z różnych punktów powierzchni źródła światła oraz w różnych kierunkach. RTMC wykorzystuje techniki redukcji wariancji w celu zmniejszenia liczby promieni koniecznych do wyemitowania. Czas obliczeń jest zatem dość krótki. Wyniki analiz systemów helioenergetycznych poprzez symulacjekomputerowe oparte na metodzie RTMC opisane zostały m.in. w [1-4, 8].

## 2.2. Charakterystyka analizowanego systemu helioenergetycznego

Oprogramowanie do symulacji propagacji promieni wykorzystane zostało do wykonania wstępnej optymalizacji hybrydowego systemu kolektorów słonecznych z koncentratorem promieniowania słonecznego. Wysokotemperaturowe ciepło generowane za pomocą analizowanej instalacji ma służyć do produkcji chłodu oraz zasilenia wody użytkowej. System zasilany jest w pełni energią promieniowania słonecznego.

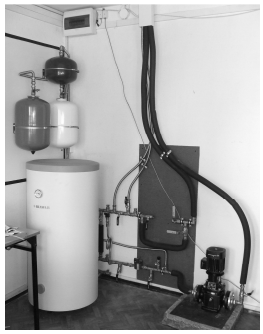
Czynnik roboczy (olej termiczny) ogrzewany jest wstępnie w dwóch płaskich kolektorach słonecznych. Wysoką temperaturę generuje się natomiast za

pomocą koncentratora promieniowania słonecznego (rys.1). Jest to paraboliczna czasza o średnicy 1.8 m pokryta folią refleksyjną. W centralnej jej części umieszczono paraboliczne lustro o grubości ścianki 4 mm i średnicy 1.2 m. W analizowanym systemie helioenergetycznym występują dwa ogniska skupienia promieni: w odległości 70 cm oraz 85 cm od powierzchni lustra. Koncentrator wyposażony został w układ śledzenia położenia Słońca oparty na czujniku różnicowym. Instalacja zamontowana została na dachu Katedry Zrównoważonego Rozwoju Energetycznego, AGH w Krakowie. Wysokotemperaturowe ciepło ma służyć do zasilenia chłodziarki absorpcyjnej.



Rys. 1. Widok kolektorów słonecznych i koncentratora promieniowania słonecznego

Fig. 1. The view of solar radiation concentrator and solar panels installation



Rys. 2. Dodatkowe wyposażenie instalacji w laboratorium

Fig. 2. Additional equipment in the laboratory

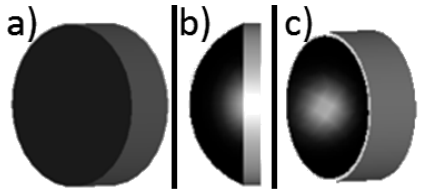
Armatura i pozostałe urządzenia instalacji zamontowane zostały w laboratorium (rys.2). Wymuszenie przepływu medium roboczego następuje za pomocą pompy obiegowej o mocy 370W. Obecnie, generowane ciepło wykorzystywane jest do zasilania zbiornika buforowego wody użytkowej. Instalacja dodatkowo wyposażona została w naczynie przeponowe z układem przedwstępnego chłodzenia, a także w chłodnicę wentylatorową wykorzystywaną w przypadku osiągnięcia zbyt wysokich temperatur (zabezpieczenie instalacji w trakcie trwania całodniowych badań). System wyposażony został również w automatykę kontrolno-pomiarową opartą na sterowniku programowalnym (PLC). Do sterownika podpiętych jest szereg elementów pomiarowych takich jak: czujniki temperatury, ciśnienia, natężenia promieniowania słonecznego, przepływomierz. Układ automatyki pozwala również na sterowanie wydajnością pompy obiegowej (za pomocą falownika) oraz chłodni wentylatorowej.

Ważnym elementem instalacji pod kątem generacji wysokotemperaturowego ciepła jest odbiornik umieszczany w ognisku skupionego promieniowania słonecznego. Na efektywność absorpcji promieniowania ma wpływ przede wszystkim kształt oraz umiejscowienie odbiornika w układzie geometrycznym koncentratora. Z kolei efektywność odbioru ciepła wysokotemperaturowego przez medium robocze zależna jest od geometrii wewnętrznej odbiornika.

## 3. Metodyka i wyniki badań

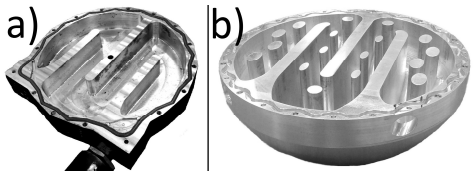
W celu optymalizacji procesu absorpcji skoncentrowanego promieniowania słonecznego zaproponowano różne geometrie zewnętrzne odbiornika wysokotemperaturowego ciepła. Następnie wykorzystano metodę Śledzenia Promienia do wykonania symulacji analizowanych odbiorników pracujących w różnym umiejscowieniu układu koncentratora. Mianowicie, zmieniano odległość odbiornika od środka powierzchni lustra parabolicznego (odległość L).

Na rysunku 3 przedstawiono geometrię odbiorników płaskiego, wypukłego oraz wklęsłego. Każdy z nich ma średnicę 18cm. Wersje wypukła oraz wklęsła wykonane zostały w trzech wariantach każda, różniących się promieniem krzywizny: 40, 60 i 90cm (oznaczenia odpowiednio R40, R60, R90). Odbiorniki płaski oraz wypukły R60, zostały zrealizowane w rzeczywistości (rys.4) i prowadzone są badania eksperymentalne opisane m.in. w [5-7]. Odbiorniki ciepła wysokotemperaturowego wykonane zostały z aluminium z wyfrezowanym wewnątrz kanałem przez który przepływa olej termiczny. Powierzchnia absorpcyjna pokryta została czarną farbą.




Rys. 3. Geometria odbiorników: a) płaskiego, b) wypukłego oraz c) wklęsłego

Fig. 3. Geometry of heat receivers: a) flat, b) convex and c) concave

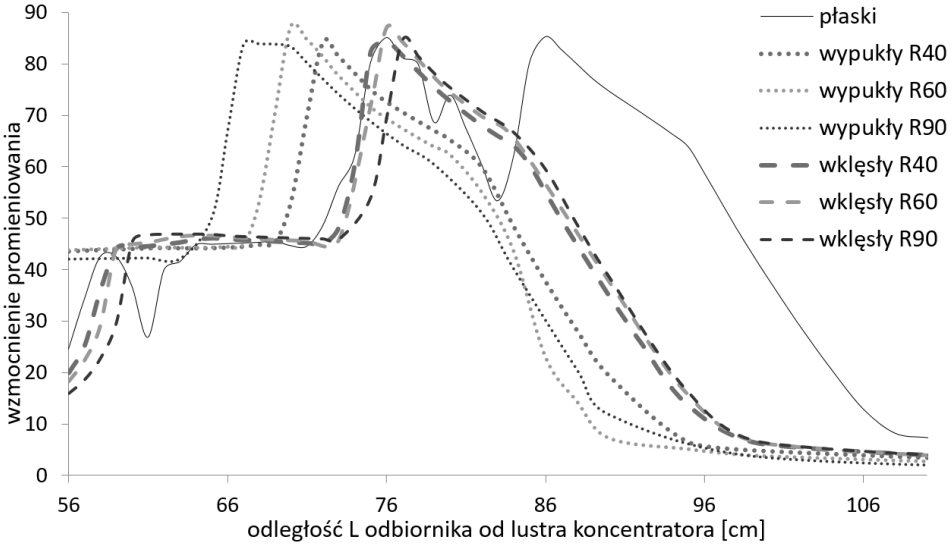



Rys. 4. Widok geometrii wewnętrznej rzeczywistych odbiorników: a) płaskiego, b) wypukłego

Fig. 4. The view of inside geometry of real heat receivers: a) flat, b) convex

Symulacje komputerowe wykonano przy pomocy oprogramowania TracePro firmy Lambda Research [9]. Program pozwala na import geometrii w standardowych dla techniki CAD rozszerzeniach (m.in. *.SAT). TracePro posiada bogaty zasób danych zawierających informacje o właściwościach różnorodnych materiałów oraz powierzchni. Użytkownik ma również możliwość ich edytowania oraz wprowadzania własnych. Główne właściwości wykorzystywane na potrzeby omawianego układu helioenergetyczne wymieniono poniżej:
– powierzchnie refleksyjne (lustro i czasza): współczynnik refleksyjności 0.95,
– powierzchnie absorpcyjne (czarna farba): współczynnik absorpcji 0.9,
– źródło światła (Słońce): Spektrum promieniowania słonecznego zgodne ze standardem: ASTM E-490-00 [10].

W wyniku przeprowadzonych analiz, na podstawie wyników symulacji obliczono wzmocnienie promieniowania na powierzchni absorpcyjnej omawianych odbiorników ciepła (rys. 5).




Rys. 5. Wzmocnienie promieniowania na powierzchni różnych rodzajów odbiorników wysokotemperaturowego ciepła w zależności od ich umiejscowienia

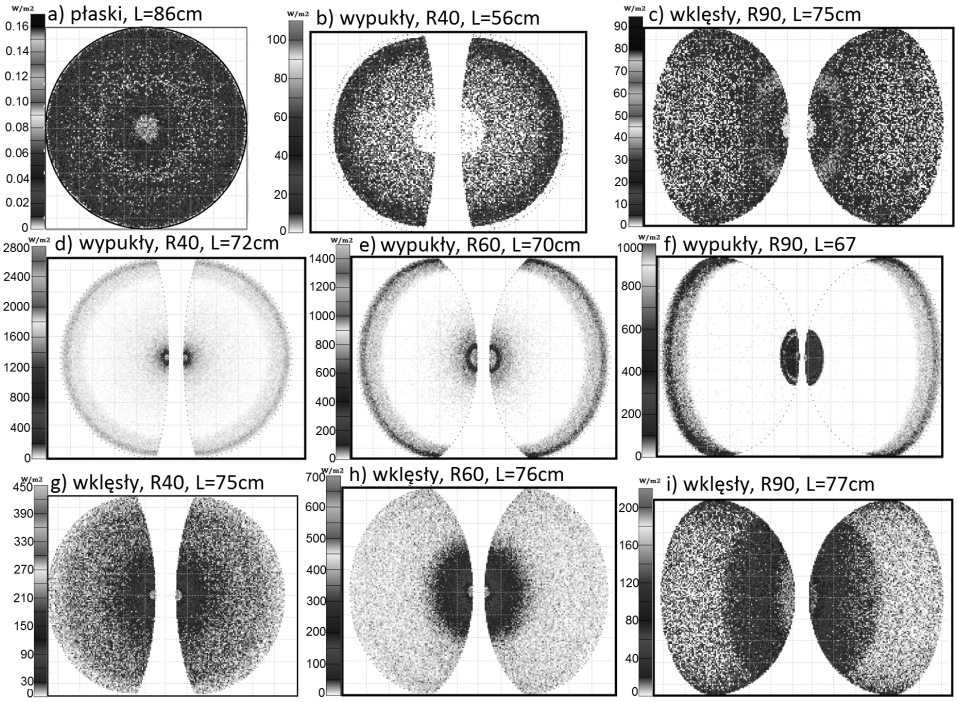
Fig. 5. The radiation reinforcement on high temperature heat receivers placed in different distances from focusing mirror

Na wykresie wzmocnienia (rys.5) zaobserwować można, że każdy odbiornik posiada zazwyczaj jedno optymalne umiejscowienie w układzie koncentratora. Wyjątkiem jest odbiornik płaski dla którego zarówno odległość L równa 76 jak i 86cm jest efektywna. Z kolei zaletą odbiornika wypukłego R90 jest to, że w odległościach 67-70cm wzmocnienie jest stałe. Najwyższą wartość równą ok. 90 osiąga odbiornik wypukły R60.

Oprogramowanie TracePro pozwala również na generację map rozkładu natężenia promieniowania na wybranych powierzchniach analizowanego układu optycznego (rys.6). Na potrzeby omawianych badań przeanalizowano mapy znormalizowanej mocy promieniowania emitowanego przez źródło-Słońce dla powierzchni absorpcyjnej odbiornika. Moc znormalizowana wynosiła 1W, natomiast nieznormalizowana około 2980W (średnica źródła światła wynosi 1.95m co daje powierzchnię 2.98m$^2$, przy natężeniu promieniowania słonecznego 1000W/m$^2$).

Mapy z oznaczeniem a) oraz d) -i) przedstawiają rozkład natężenia dla odbiorników charakteryzujących się najwyższym wzmocnieniem promieniowania na ich powierzchniach. Widoczne jest, że najkorzystniejszy rozkład natężenia promieniowania osiąga się w przypadku odbiornika płaskiego. Najgorzej pod tym kątem prezentuje się odbiornik wypukły. Dla każdej z krzywizn odbiornik ten charakteryzuje się bardzo nierównomiernym rozkładem natężenia promieniowania na powierzchni absorpcyjnej. Promienie skupiają się na niewielkim obszarze w centralnej części odbiornika (ok 0,5cm$^2$) oraz w mniejszym stopniu na powierzchni w kształcie pierścienia po zewnętrznej części absorbera. Z kolei

wyniki dla odbiornika wklęsłego są dość zróżnicowane. Najlepszy rozkład obserwuje się w przypadku krzywizn R40 oraz R90, najgorszy natomiast w przypadku R60.




Rys. 6. Znormalizowane mapy rozkładu natężenia promieniowania na powierzchni absorpcyjnej odbiornika

Fig. 6. Normalized maps of flux distribution on receiver absorption surface

Widoczne jest, że mapy dla odbiorników wklęsłego i wypukłego (dla odległości najwyższego wzmocnienia) nie przedstawiają wystarczająco dobrego rozkładu natężenia. Symulacje pokazują jednak, że istnieje takie umiejscowienie dla obu odbiorników, które jest korzystne pod kątem rozkładu natężenia promieniowania na absorberze (rys. 6 mapy b oraz c). Umiejscowienia te nie są jednak tak dobre jak wyniki uzyskane dla odbiornika płaskiego. Ponadto, wzmocnienie promieniowania jest dużo niższe niż dla map d-i. Mianowicie, wybranie najkorzystniejszego rozkładu promieniowania w przypadku odbiornika wklęsłego wiąże się ze spadkiem wzmocnienia prawie o 40% (w odniesieniu do odbiornika wklęsłego o najwyższym wzmocnieniu), natomiast w przypadku odbiornika wypukłego o połowę.

Biorąc pod uwagę mapy rozkładu natężenia promieniowania na powierzchni absorpcyjnej odbiornika, strumień zaabsorbowanej energii oraz stopień komplikacji odbiornika najlepszym rozwiązaniem wydaje się być właśnie odbiornik płaski. Jednak konieczne jest przeprowadzenie dodatkowych badań eksperymen-

talnych oraz symulacji dotyczących przekazu ciepła do medium roboczego. Pozwoli to określić również wpływ wiatru (straty ciepła przez konwekcję) oraz straty ciepła na drodze promieniowania. W kolejnych badaniach rozważyć należy możliwość zastosowania izolacji termicznej składającej się z warstwy zabezpieczającej tylną część oraz boki odbiornika, a także sensowność osłonięcia absorbera przeźroczystą izolacją cieplną.

## 4. Wnioski

Koncentratory promieniowania słonecznego stają się powoli alternatywą dla klasycznych instalacji z kolektorami słonecznymi. Dają one bowiem szersze możliwości wykorzystania energii promieniowania słonecznego. Ważnym jednak elementem w optymalizacji takich układów jest odbiornik ciepła wysokotemperaturowego. Prowadzenie badań eksperymentalnych jest konieczne, ale wiąże się często z wysokimi kosztami wyprodukowania prototypów oraz długim czasem realizacji. Dlatego najlepszym rozwiązaniem jest posiłkowanie się symulacjami komputerowymi już na etapie projektowania.

Analizując mapy dla przedstawionych geometrii odbiornika ciepła wysokotemperaturowego, najrozsądniejszym wydaje się wskazanie odbiorników płaskiego (L=86cm) oraz wklęsłego (R90, L=77 cm) jako wariantów najlepszych. Absorber wypukły, przy którym zanotowano najwyższy strumień zaabsorbowanego promieniowania tj. 2kW (R60, L=70) będzie stanowił problem nie tylko pod kątem materiałowym (niekorzystny rozkład natężenia promieniowania), ale również pod kątem zabezpieczenia przed stratami ciepła. Najkorzystniejsze wzmocnienie dla odbiorników płaskiego i wklęsłego jest jedynie o 1-3% mniejsze od odbiornika wypukłego, przy czym to odbiornik płaski charakteryzuje się lepszym rozkładem natężenia promieniowania słonecznego i prostotą konstrukcji.

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

## Literatura

[1] Leon N., Aguayo H., Garcia H., Anaya A.: Computer aided optimization/innovation of passive tracking solar concentration Fresnel lens, IFIP AICT no 355, 2011, pp. 57-70.
[2] Bader R., Haueter P., Pedretti A., Steinfeld A.: Optical design of a novel 2-stage solar through concentrator based on pneumatic polymeric structures, Jornal of Solar Energy Engineering no 131, 2009, pp. 031007-1/9.
[3] Pujol-Nadal R., Martinez-Moll V., Sallaberry F., Moia-Pol A.: Optical and thermal characterization of a variable geometry concentrator using ray-tracing tools and experimental data, Applied Energy, no 155, 2015, pp. 110-119.
[4] Rodriguez-Sanchez D., Rosengarten G.: Improving the concentration ratio of parabolic troughs using a second-stage flat mirror, Applied Energy, no 159, 2015, pp. 620-632.

[5] Przenzak E., Filipowicz M.: Hybrid solar receiver as a source of high-temperature medium for an absorption chiller supply, Experimental Fluid Mechanics, 2015, pp. 656-663.
[6] Bożek E., Zdunek M.: Nowoczesne systemy chłodnicze zasilane skoncentrowanym promieniowaniem słonecznym, Bezpieczeństwo energetyczne – rynki surowców i energii: energetyka w czasach politycznej niestabilności, 2015, s. 687-694.
[7] Bożek E., Szubel M.: The numerical model of the high temperature receiver of the concentrated solar radiation, SDEWES 2015, Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems, Dubrownik, (2015), pp.1-12.
[8] Kim Y., Han G. Y., Seo T.: An evaluation on thermal performance of CPC solar collector, International Communications in Heat and Mass Transfer 35, 2008, pp. 446-457.
[9] TracePro software, Lambda Research Corporation, www.lambdaresearch.com, last access 12.06.2016.
[10] Allen C. W., Astrophysical Quantities, The Athlone Press, London, 1963.

## SIMULATIONS OF HIGH-TEMPERATURE HEAT RECEIVER IN HELIOENERGETIC SYSTEM

**S u m m a r y**

This article presents the results of computer simulations of high-temperature heat receiver powered by concentrated solar radiation. Ray Tracing Monte Carlo (RTMC) methodology was presented.

Installation uses two optical elements with different versions of high-temperature heat receiver was analyzed. Flat, convex and concave geometry of the concentrated radiation absorber were proposed. Convex, and concave receivers were analyzed in three more variants – with different radius curvature ie. 40, 60 and 90cm. In addition, the Ray Tracing simulations was performed for varied distances of heat receivers from the focusing mirror.

As the results of computer simulations, normalized maps of flux distribution on the absorbing surfaces of the heat receivers were generated. The best versions of the receivers with the optimal location of them were indicated. Not only the flux distribution but also the radiation gain were taken into consideration.

It has been shown that, despite the highest gain on the convex heat receiver, the flat one is the best solution. This is primarily caused by very disadvantageous flux distribution on convex receiver and insignificant difference in radiation gain in both cases. Also the simplicity the flat heat receiver was emphasized.

**Keywords:** Ray Tracing, Monte Carlo, computer simulations, concentrated solar radiation, solar radiation absorpcion

DOI:10.7862/rb.2016.219

*Przesłano do redakcji: 13.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 373-380

**Adam RUSZAJ**[1]

# BIOINSPIRACJE W INŻYNIERII ŚRODOWISKA

Żadna maszyna czy proces zaprojektowane przez inżynierów nie dorównują doskonałości organizmów żywych i procesów zachodzących w środowisku naturalnym, które stworzyła Natura w procesie ewolucji. Bardzo prężny rozwój technologii wymusza poszukiwanie nowych racjonalnych rozwiązań technicznych przyjaznych dla środowiska naturalnego. Dzięki temu może uda się zmniejszyć skutki „efektu cieplarnianego" czy „dziury ozonowej" oraz poprawić jakość powietrza, wody i żywności. Jednym z bardzo ważnych problemów środowiskowych jest produkcja energii i jej racjonalne wykorzystanie. Produkcja energii w Polsce oparta jest na spalaniu węgla, ropy gazowej oraz gazu ziemnego co wywiera niekorzystny wpływ na środowisko. Dlatego należy intensywnie rozwijać i udoskonalać produkcję „czystej energii". Ponadto bardzo ważnym zagadnieniem jest racjonalne wykorzystanie energii zarówno w gospodarstwach indywidualnych (ocieplenie budynków, sprzęt AGD i RTV) jak i przy projektowaniu i eksploatacji wszystkich innych urządzeń: zaczynając od samolotów i samochodów przez maszyny rolnicze i budowlane do sprzętu komputerowego czy medycznego. Oszczędzać energię można również pośrednio przez zmniejszanie masy urządzeń oraz zwiększanie trwałości ich elementów. Skutkuje to oszczędnością materiałów a tym samym energii, która zostałaby zużyta na ich wyprodukowanie. Pomost pomiędzy rozwiązaniami spotykanymi w przyrodzie a techniką tworzy dziedzina nauki nazywana „bioniką", która bada materiały, struktury, kształty i powierzchnie występujące w roślinach czy zwierzętach oraz ich wytwory (plaster miodu, kopiec termitrów) i zachowania społeczne (mrówki, ryby, muchy, pszczoły). Wyniki tych badań stanowią inspiracje w rozwiazywaniu zagadnień konstrukcyjnych, eksploatacyjnych, organizacyjnych, medycznych a nawet informatycznych. W artykule przedstawiono wybrane zastosowania osiągnięć „bioniki" w technice z punktu widzenia inżynierii środowiska ze szczególnym uwzględnieniem produkcji i zużycia energii.

**Słowa kluczowe:** bionika, konstrukcje lekkie, czysta energia, energooszczędne urządzenia, odporność na zużycie

## 1. Wprowadzenie

Rozwój naszej cywilizacji przez ostatnie kilka tysięcy lat był niezwykle dynamiczny ale nie naruszający równowagi w środowisku naturalnym. Ludzkość gospodarowała w wyznaczonych przez naturę granicach biosfery, nie było zagrożeń globalnych dla życia na kuli ziemskiej z wyjątkiem naturalnych zjawisk niezależ-

[1] Adam Ruszaj, Instytut Technologii Maszyn I Automatyzacji Produkcji Politechniki Krakowskiej; ruszaj@mech.pk.edu.pl

nych od człowieka (wybuchy wulkanów, powodzie itp.) oraz wojen czy epidemii np. dżumy, czarnej ospy czy cholery. Sytuacja zmieniła się skokowo od momentu wynalezienia silnika parowego przez Thomasa Newcomena (1712 r. ), udoskonalonego przez James Watta w 1763 r., co zapoczątkowało pierwszą rewolucji przemysłową. Nastąpił gwałtowny wzrost produkcji przemysłowej i związane z tym zapotrzebowanie na energię. Energia była i jest głównie uzyskiwana przez spalanie węgla, ropy i gazu ziemnego. Związana z tym emisja zanieczyszczeń gazowych i pyłów do atmosfery, odprowadzanie, ścieków i odpadów stałych z zakładów przemysłowych i gospodarstw indywidualnych, powszechne stosowanie środków ochrony roślin znacząco zmieniły warunki funkcjonowania ekosystemów zarówno w skali lokalnej jak i globalnej (efekt cieplarniany, dziura ozonowa, kwaśnie deszcze). Oczywiście rozwoju gospodarczego nie można zatrzymać bo wymusza go wciąż rosnąca konsumpcja już 7 miliardów ludzi, z których każdy potrzebuje, pożywienia, ubrania, dobrze wyposażonego mieszkania, często samochodu, motoru, roweru itp. Ale muszą być podjęte radykalne działania, żeby ograniczyć wpływ rozwoju przemysłu czy komunikacji na stan środowiska naturalnego.

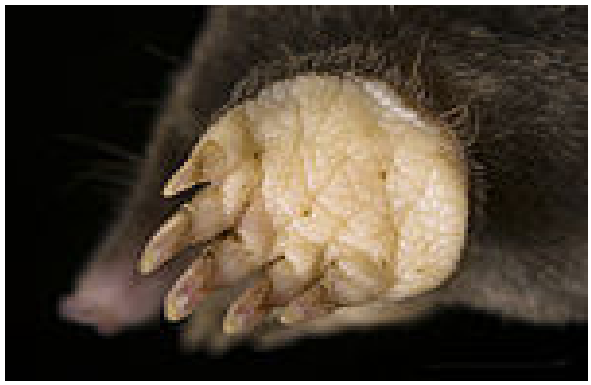
## 2. Sformułowanie problemu

Nawet pobieżna analiza stanu środowiska naturalnego wskazuje, że produkcja energii oparta na spalaniu węgla, ropy naftowej czy gazu w połączeniu z nieekonomicznym jej wykorzystaniem wywiera niekorzystny wpływ na środowisko naturalne. Należy zatem rozwijać produkcję energii czystej wykorzystując biomasę, energię słoneczną, energię rzek i oceanów czy energię wiatru. Ale równocześnie niezwykle ważne jest ograniczenie zużycia energii oraz ekonomiczne jej wykorzystanie. Oczywiście podejmowane są działania we wszystkich wymienionych powyżej obszarach, ale często najkorzystniejsze rozwiązania można znaleźć w organizmach żywych (rośliny, zwierzęta), które Natura wytworzyła w wyniku procesu ewolucji. Pomost pomiędzy światem roślin i zwierząt a techniką tworzy nauka nazywana bioniką. Nazwa „bionika" pochodzi od słów greckich: bios – życie oraz mimesis –naśladować. Poniżej przedstawiono przykłady racjonalnego wykorzystania bioinspiracji w aspekcie produkcji i racjonalnego wykorzystania energii.

## 3. Charakterystyka kształtów, struktur i powierzchni występujących w naturze

W większości rozwiązań technicznych zwykle stosowane są regularne kształty (walec, prostopadłościan, ostrosłup, stożek, kula itp.), regularne struktury (elementy prostoliniowe ułożone równomiernie i zwykle równolegle lub prostopadle) oraz gładkie powierzchnie. W organizmach żywych regularne kształty, struktury czy gładkie powierzchnie nie występują ponieważ nie są one optymalne ze względu na warunki w jakich organizmy żyją [1-6]. I tak kształt ciała kreta oraz jego łapy są przystosowane do życia pod ziemią i kopania korytarzy (Rys.1). Występu-

jące w organizmach żywych struktury zadziwiają różnorodnością wynikającą z konieczności przystosowania organizmów do warunków życia. Najbardziej pospolite organizmy jak drzewa, krzewy, pędy bambusa mają optymalnie ukształtowane pod względem wytrzymałościowym korony oraz użyłkowanie liści. Również szkielety ptaków czy ssaków stanowią lekkie, funkcjonalne i wytrzymałe układy przestrzenne [7, 8]. Warto podkreślić, że szkielet gołębia waży tylko 8-9% jego masy całkowitej [7]. Wynika to z faktu, że wewnętrzna struktura kości jest niejednorodna i z pustymi przestrzeniami. Analogicznie można scharakteryzować strukturę wewnętrzną roślin.



Rys.1. Przednia łapa kreta [1]

Fig.1. The fore paw of mole rat [1]

Specyficzną budowę wewnętrzną umożliwiającą tłumienie drgań posiadają dzioby ptaków (szczególnie tukana czy dzięcioła). Dzięki temu drgania generowane podczas uderzenia dziobem nie przenoszą się na cały organizm. W przyrodzie nie występują również tzw. „gładkie" powierzchnie. Na przykład muszle skorupiaków mają charakterystyczne prążki, które istotnie zwiększają wytrzymałość i odporność na zużycie. Również żuk gnojowy (Rys.2) posiada zróżnicowaną strukturę skrzydeł, tułowia czy głowy. Zdjęcia zrobione skaningowym mikroskopem elektronowym (SME) wykazują, że skrzydła mają strukturę prążkową, w tułowiu znajdują się liczne wgłębienia i delikatne wypukłości. Żuk gnojowy przekopuje duże ilości nawozu i gleby oraz przemieszcza się sprawnie w glebie lub nawozie ponieważ dzięki niepłaskiej i zróżnicowanej strukturze powierzchni ciała minimalizuje opory ruchu. Wynika to z faktu, że pomiędzy glebę a ciało żuka dostaje się powietrze i woda powodując efekt smarowania a w konsekwencji zmniejszenie oporów ruchu.

Nawet tak delikatne narządy jak skóra czy skrzydła motyla nie są gładkie; posiadają one specyficzną łuskową i warstwową strukturę ukształtowaną w procesie ewolucji trwającym kilkaset milionów lat [3]. Warto podkreślić, że pierwsze owady latające w okresie Carbonu" miały powierzchnie skrzydeł gładkie i dlatego ich



Rys.2. Żuk gnojowy [2]

Fig.2. The dung beetle [2]



Rys.3. Motyl czerwończyk (*Lycaena virgaureae)* - skrzydła z wyraźnymi łuskami [3]

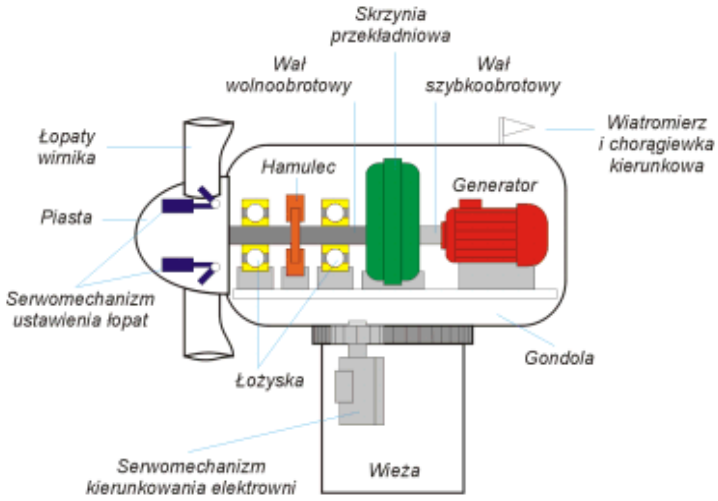
Fig.3. Butterfly (*Lycaena virgaureae) - wings with clear* scale coverage [3]

lot był stosunkowo wolny i głośny. Z tego względu stanowiły łatwy łup dla napastników co było przyczyną ich wyginięcia. Motyle ze złożoną strukturą łuskową skrzydeł pojawiły się w okresie Jurajskim. Struktury łusek skrzydeł motyli są różnorodne i bardzo złożone (Rys.3). W przypadku motyla Monarch (*Danaus plexippus*) [3,4,5] budowa łuski jest szczególnie złożona, co powoduje, że ten gatunek jest rekordzistą zasięgu lotu: 3200 km w 3 tygodnie [3]. W łusce jego skrzydła można wyróżnić dwie powierzchnie oddzielone podporami tworzącymi pusta przestrzeń o grubości kilku μm. Przez otwory w górnej warstwie wpływa do przestrzeni pomiędzy warstwami powietrze powodując zwiększenie siły nośnej, prędkości i sterowności lotu oraz zmniejszenie jego głośności. Dzięki temu te motyle skuteczniej mogą unikać zagrożeń, co pozwala im przetrwać. Charakterystyczną niegładką strukturę powierzchni zmniejszającą tarcie a w konsekwencji opory ruchu mają również inne zwierzęta żyjące na powierzchni gleby (np. węże) oraz w wodzie (szczególnie rekiny, tuńczyki itp.) [7,8].

## 4. Praktyczne przykłady wykorzystania bioinspiracji

Z powyższej charakterystyki jednoznacznie wynika, że proces ewolucji organizmów żywych trwający miliony lat ukierunkowany był na przystosowanie do warunków życia ich kształtu, struktury i powierzchni zewnętrznych. Maszyny i urządzenia projektowane przez inżynierów też powinny mieć kształty, struktury i powierzchnie optymalne ze względu na warunki pracy. Wiedzę w tym zakresie inżynierowie mogą uzupełnić miedzy innymi przez analizę i adaptację rozwiązań wypracowanych przez Naturę w procesie ewolucji. Poniżej przedstawione zostaną wybrane przykłady praktycznego wykorzystania inspiracji biologicznych w rozwiązywaniu wybranych problemów związanych z produkcją i wykorzystaniem energii [9-14].

Jednym z ekologicznych sposobów **produkcji energii** jest zastosowanie turbin wiatrowych. Energię wiatru przejmują łopatki turbiny i przez odpowiednie mechanizmy napędzają generator wytwarzający prąd elektryczny (Rys.4).




Rys.4. Uproszczony schemat budowy typowej siłowni wiatrowej [9]

Fig.4. Simplified scheme of typical wind plant [9]

Wzorując się na budowie łusek skrzydła motyla (Rys.3) opracowano bioniczną dwuwarstwową strukturę powierzchni łopatek turbiny wiatrowej o łącznej grubości ok 1 mm [3,4,5]. W warstwie górnej z rowkami i występami laserowo wykonano otwory o powierzchni 0.16 $mm^2$, przez które podczas pracy turbiny wpływa powietrze i wypełnia przestrzeń pomiędzy warstwami, której grubość wynosi 0.4 – 0.7 mm. Badania turbiny z bionicznymi łopatkami przeprowadzono w tunelu aerodynamicznym. Wykazały one, że wykorzystanie energii kinetycznej wiatru wzrasta o 15% w stosunku do turbin o klasycznej (gładkiej) powierzchni łopatek. Stwierdzono również zmniejszenie współczynnika oporu aerodynamicznego i zmniejszenie głośności pracy turbin wiatrowych [3,4,5].

**Zmniejszenie oporów ruchu** samochodów, samolotów, pociągów czy pojazdów wodnych przekłada się na zmniejszenie zużycia paliwa czyli energii [7]. W tym zakresie inżynierowie wzorowali się w przypadku projektowania samolotów na budowie i locie ptaków a w przypadku statków na budowie ryb. Dwa powszechnie znane przypadki bioinspiracji to wytworzenie specjalnej folii o strukturze wzorowanej na strukturze skóry rekina i oklejanie nią kadłubów samolotów (Lufthansa) oraz zaprojektowanie przez Firmę Mercedes Bionicznego samochodu wzorowanego na rybie „boxfish" charakteryzującej się bardzo małym oporem ruchu. W obydwu przypadkach uzyskano istotne zmniejszenie zużycie paliwa [7].

**Zmniejszenie masy urządzeń** prowadzi do zmniejszenia zużycia materiałów i oszczędności energii, którą zużyto by na ich wyprodukowanie. Wzorując się na budowie roślin w skali makro i mikro (np. pędów bambusa, trzciny, kaktusa meksykańskiego, liści drzew czy lilii wodnej) oraz ptaków i ssaków (budowa szkieletu, kształt kości i ich struktura wewnętrzna, struktura wewnętrzna dziobu dzięcioła)[9] opracowano bioniczne konstrukcje korpusów obrabiarek i elementów lotniczych. W zależności od rodzaju elementu i wzorca biologicznego bioniczne konstrukcje charakteryzowały się zwiększeniem wytrzymałości o 53 -124 %, zwiększeniem sztywności o 21 – 43 %, zmniejszeniem masy o 3 – 43%, zmniejszeniem odkształceń o 16 – 44%. Bioniczne konstrukcje charakteryzowały się ponadto zwiększoną odpornością na drgania [8].

**Zwiększenie trwałości elementów maszyn** uzyskuje się przez zastosowanie na powierzchniach współpracujących struktury bionicznej. Badania z takimi bionicznymi powierzchniami przeprowadzono dla próbek wykonanych z szarego żeliwa odlewniczego GCI [10]. W badaniach uwzględniono kilkanaście różnych wariantów struktury bionicznej wzorowanych na strukturze powierzchni skrzydeł, tułowia i głowy żuka gnojowego (Rys.2). Porównanie próbek z powierzchniami bionicznymi z próbkami o płaskiej powierzchni wykazało, że wszystkie próbki z bioniczną strukturą posiadają większa wytrzymałość zmęczeniową. Największy wzrost wytrzymałości (o 53%) wykazują próbki z bioniczną strukturą siatkową (kąt krzyżowania się rowków $60^0$ ). Wzrost wytrzymałości wynika przede wszystkim z: opóźnienia pojawiania się mikropęknięć oraz hamowania i zmiany kierunku propagacji. W analogiczny sposób istotnie poprawiono właściwości warstwy wierzchniej próbek stalowych przez zastosowanie bionicznej struktury siatkowej typu „reseau" [10].

**Zmniejszenie zużycia energii** urządzeń przemysłowych, rolniczych czy budowlanych daje ogromne oszczędności energii ze względu na duża liczbę stosowanych urządzeń oraz zwykle długi czas ich pracy. Istotny wzrost efektywności pracy maszyn do uprawy ścierniska uzyskano przez zaprojektowanie tarczy tnącej wzorowanej na łapach kreta z Rys.1 [12]. Kolejnym przykładem jest bioniczna kosa (piła) do maszynowego ścinania zboża wzorowana na siekaczach świerszcza (Rys.5.), które posiadają szczególne zdolności do cięcia włókien roślinnych [13].



Rys.5. Świerszcz na łodydze zboża [13]
Fig.5. Grasshopper on grass stalk [13]

Zastosowanie bionicznego rozwiązania umożliwiło zmniejszenie średniej siły ciecia (koszenia) o 28.17 %.( z 71.88 N do 51.56 N). Równocześnie zużycie energii zmniejszyło się o 12.85 % . Powyższe efekty wynikają optymalnego kształtu bionicznej kosy, której ostrza były wzorowane na siekaczach świerszcza. Zęby kosy tradycyjnej były jednorodne i miały kształt pochylonego trójkąta o ostrym wierzchołku. Zęby kosy bionicznej były różnej wysokości i miały kształt wpisany w trójkąt równoramienny. Wierzchołek każdego zęba był zaokrąglony [14].

## 5. Podsumowanie

W niniejszym artykule pokazano możliwości rozwiązania problemów związanych z produkcją, oszczędnością oraz zmniejszeniem zużycia energii. Należy zwrócić uwagę, że w rozwiązaniach, które zostały wypracowane w trwającym miliony lat procesie ewolucji nie występują, w przeciwieństwie do systemów technicznych, regularne kształty, struktury i gładkie powierzchnie. Ich budowa została perfekcyjnie przystosowana do warunków życia w środowisku naturalnym. Wzorując się na kształcie łap kreta, budowie siekaczy świerszcza, strukturze zewnętrznej i wewnętrznej roślin (pędy, liście) oraz powierzchniach skrzydeł motyla, skrzydeł, tułowia i głowy żuka gnojowego, węża, rekina czy tuńczyka można poprawić efektywność produkcji energii w turbinie wiatrowej, udoskonalić narzędzia rolnicze i zmniejszyć ilość zużywanej przez nie energii, zmniejszyć tarcie i zużycie powierzchni współpracujacych elementów maszyn, zwiększyć sztywność przy jednoczesnym zmniejszeniu masy elementów lotniczych czy obrabiarkowych. Rozwój bioniki integruje środowiska naukowe i inżynierskie bo racjonalne korzystanie z rozwiązań Natury wymaga pracy zespołowej i współpracy różnych specjalistów (biolog, chemik, inżynier mechanik, inżynier energetyk, informatyk, fizyk, lekarz itp.). Bionika daje również nowe argumenty do ochrony i szacunku dla środowiska naturalnego, które jest i powinno być w coraz większym zakresie źródłem inspiracji i wiedzy wykorzystywanej dotychczas przez nasza cywilizację w niewielkim stopniu (~10%).

## Literatura

[1] https://pl.wikipedia.org/wiki/Kret_europejski, {dostęp 2016-05-22}.

[2] https://pl.wikipedia.org/wiki/Żuk_gnojowy, {dostęp 2016-05-22}.

[3] https://pl.wikipedia.org/wiki/Motyle, {dostęp 2016-05-22}.

[4] Kovalev I., The Functional Role of the Hollow Region of the Butterfly Pyrameis atalanta (L.) Scale, Journal of Bionic Engineering 5 (2008) 224-230.

[5] Kovalev I., "Butterfly Skin' for Wind Turbines". http://bioinspired.sinet.ca, {dostęp 2016-05-22}.

[6] Kovalev I., "From Butterfly to Wind Turbine", Wind Engineering Vol. 34, No 4, 2010 pp. 351-360.

[7] Ruszaj A.,; Bioinspiracja w rozwiązywaniu problemów technicznych; Szkoła Naukowa Obróbek Erozyjnych - Artykuły naukowe z 2015 r., Mechanik 2015 (12) s. 255-260.

[8] Ruszaj A., Bionic Impact on Industrial Production Development, Advances in Manufacturing Science and Technology, Vol.39, No 4 2015 pp. 5-22.

[9] www.elektrownie-tanio.net/schemat.html, {dostęp 2016-05-22}.

[10] Chen Z., Lu S., Song X., Zhang H., Yang W., Zhou H., Effects of bionic units on the fatigue wear of grey iron surface with different shapes and distributions, Optics & Laser Technology 66 (2015) pp. 166-174.

[11] Lu J., Yang CH., Zhang L., Feng A., Jang Y., Mechanical Properties and Microstructure of Bionic Non-Smooth Stainless Steel Surface by Laser Multiple Processing, Journal of Bionic Engineering 6 (2009) pp.180-185.

[12] Li M., Chen D., Zhang S., Tong J.; "Biomimetic Design of a Stubble - Cutting Disc Using Finite Element Analysis", Journal of Bionic Engineering 10 (2013) p. 118-127.

[13] https://en.wikipedia.org/wiki/File:Young_grasshopper_on_grass_stalk02.jpg, {dostęp 2016-05-22}.

[14] Jia1H., Li Ch., Zhang Z., Wang G., Design of Bionic Saw Blade for Corn Stalk Cutting, Journal of Bionic Engineering 10 (2013) pp. 497-505.

## BIOINSPITATIONS IN ENVIRONMENTAL ENGINEERING

**S u m m a r y**

Any machine tool or process design by engineers is not as excellent as alive organisms or processes occurring in natural surroundings, which have been created by the Nature in evolution process. Very intensive technology development is the reason for looking for a new and better solutions which are friendly for natural surroundings. Thanks to this fact it is possible to decrease the negative results of "greenhouse effect", ozone layer thickness decreasing in stratosphere and improve air, water and food quality. One of very important environment problem is energy production and its rational consumption. Production energy in Poland is connecting with coal, oil and natural gas burning what is harmful for natural environment. Because of this fact it is necessary to increase and develop the „clean energy" production. The very important problem is also rational energy consumption in individual households (wall isolation, kitchen equipment, radio and television) as well as in exploitation of: aircrafts, cars, agriculture machines, machines used for houses or road building, computers. Energy can be saved indirectly by decreasing machines weight and details or units wear. In this way we can save Energy which would be used for saved materials production. The bridge between solutions which can be met in alive organisms and technical application create the „bionic". The "bionic" investigates materials, structures, shapes and surfaces of plants and animals. It also investigates animals products (honeycombs, ant-hills) and specific behaviour (ants, flies, fishes). Results of this research create inspirations for construction, production, exploitation, medical or informatics tasks solving. In the paper some bionic applications in technical problems solutions in aspects of energy production and consumption are presented.

**Keywords:** bionic, lightweight construction, clean energy, energy efficient equipment

DOI:10.7862/rb.2016.220

*Przesłano do redakcji: 16.05.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 381-390

**Elżbieta RYBAK-WILUSZ**[1]
**Paulina SAWICKA-CHUDY** [2]
**Marian CHOLEWA**[3]

# ANALIZA WYKORZYSTANIA ENERGII SŁONECZNEJ W BUDYNKU NA PODSTAWIE DANYCH EKSPLOATACYJNYCH

Wielkość potencjału energetycznego określonego źródła energii, sposób wykorzystania energii oraz rodzaj zastosowanego rozwiązania technicznego są najczęściej rozpatrywane w ocenie efektywności i racjonalności wykorzystania energii odnawialnej. W opracowaniu przedstawiono analizę efektywności instalacji słonecznej pracującej dla potrzeb przygotowania ciepłej wody w budynku zamieszkania zbiorowego (dom studencki) w Rzeszowie.
Warunki nasłonecznienia zostały poddane analizie na podstawie informacji przyjętych z bazy danych klimatycznych stacji meteorologicznej Rzeszów-Jasionka. Posłużyły one do opracowano dla Rzeszowa sezonowego i rocznego napromieniowania płaszczyzny poziomej i odchylonej od niej pod różnymi kątami. W ramach opracowania przedstawiono charakterystykę analizowanego budynku oraz rozkład liczby mieszkańców i zużycie ciepłej wody użytkowej z lat 2009-2014. Na podstawie zapotrzebowania na ciepło obliczonego w oparciu o zużycie ciepłej wody na osobę, danych z pomiarów zużycia ciepłej wody oraz pomiarów dostarczonego ciepła sieciowego analizowano efektywność wykorzystania energii słonecznej po zamontowaniu kolektorów słonecznych. Relacje pomiędzy wartościami zapotrzebowania na ciepło wyznaczonego na podstawie zapotrzebowania na ciepło na osobę a zużyciem ciepła z pomiarów zostały poddane analizie.
Wykazano, że powierzchnia kolektorów powinna uwzględniać zapotrzebowanie na ciepło do ogrzania ciepłej wody, zwłaszcza w okresie wiosenno-letnim. Wyznaczony roczny (miesięczny) stopnień wykorzystania energii słonecznej do ogrzania ciepłej wody pozwolił wykazać, w jakim stopniu zastosowane kolektory słoneczne obniżają roczne zużycie ciepła dostarczanego z sieci cieplnej. Oceniono oszczędność ciepła w budynku zamieszkania zbiorowego uzyskaną po zamontowaniu kolektorów słonecznych oraz wskazano jakie czynniki wpływają na obliczenie optymalnej powierzchni kolektora słonecznego. Wnioski zawierają propozycje usprawnień, które mogą podwyższyć efektywność cieplną instalacji słonecznej i skrócić czas zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych.

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Elżbieta Rybak-Wilusz, Politechnika Rzeszowska, Zakład Ciepłownictwa i Klimatyzacji, ul. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów; e-mail: elrywi@prz.edu.pl, tel. 178651445

[2] Paulina Sawicka-Chudy, Uniwersytet Rzeszowski, Katedra Biofizyki, Rzeszow, ul. Pigonia 1, 35-310 Rzeszów, e-mail: sawicka61@wp.pl

[3] Marian Cholewa, Uniwersytet Rzeszowski; mcholewa@ur.edu.pl, tel. 178518752

**Słowa kluczowe:** efektywność energetyczna, napromieniowanie słoneczne, kolektory słoneczne, budynek zamieszkania zbiorowego

## 1. Wprowadzenie

Dzisiejszy świat stoi przed problemem zmian klimatycznych i stopniowego zużywania konwencjonalnych źródeł energii. Z tego powodu poprawa efektywności energetycznej, rozwój wykorzystania odnawialnych źródeł energii oraz ograniczenie oddziaływania energetyki na środowisko to główne kierunki przemian sektora energetycznego. Na świecie jak również w Polsce wzrasta wykorzystanie energii słonecznej. Pozyskanie energii słonecznej w Polsce w 2005 r. wynosiło 6,0 TJ, a już w roku 2014 r. wzrosło do 720 TJ. W porównaniu z 2010 (350 TJ) nastąpił ponad dwukrotny wzrost [1]. W okresie 2010-2014 udział energii słonecznej w krajowym pozyskaniu i wykorzystaniu energii ze źródeł odnawialnych wzrósł z 0,12% do 0,21% [2].

W ostatnich latach w Polsce wzrostowi wykorzystania odnawialnych źródeł energii towarzyszył intensywny postęp w badaniach nad kolektorami słonecznymi [3-5]. Dąży się do udoskonalenia technicznego tak, aby ich czas eksploatacji wynosił około 20 lat i były one cenowo opłacalne. Dlatego prowadzonych było wiele badań nad pracą instalacji solarnych [1] Głównym celem artykułu jest analiza efektywności cieplnej istniejącej instalacji kolektorów słonecznych zastosowanej do ogrzewania ciepłej wody użytkowej w budynku użyteczności publicznej, w którym ilość mieszkańców nie jest stała w ciągu roku. Wnioski z przeprowadzonej analizy będą pomocne dla projektantów i wykonawców zajmującymi się pozyskaniem energii ze Słońca.

## 2. Potencjał energii słonecznej Rzeszowa

Analizę napromieniowania dla Rzeszowa przeprowadzono na podstawie informacji zamieszczonych w bazie danych Ministra Infrastruktury i Rozwoju dla stacji meteorologicznej Rzeszów-Jasionka [6]. Warunki meteorologiczne w Rzeszowie (tak jak i w całej Polsce) charakteryzują się bardzo nierównym rozkładem promieniowania słonecznego w cyklu rocznym [7].

W oparciu o wzór (1) obliczono udział procentowy nasłonecznienia w półroczu letnim i zimowym dla różnych wartości nachylenia powierzchni kolektora w Rzeszowie. Wyniki obliczeń prezentuje tab. 1.

$$p = \frac{H_s}{H_y} \cdot 100\%, [\%] \tag{1}$$

gdzie: $H_s$ - napromieniowanie (sezonowe, w półroczu zimowym lub letnim) [kWh/m$^2$· sezon], $H_y$ - średnie roczne napromieniowanie [kWh/m$^2$· rok].

Roczne całkowite nasłonecznienie jednostkowej płaszczyzny horyzontalnej wynosi dla Rzeszowa 1051 kWh/m$^2$. Zwiększenie kąta nachylenia kolektora do 45$^o$ powoduje wzrost wartości energii o 101 kWh (1152 kWh/m$^2$ ). Przy położeniu S45 kolektora 70% (806 kWh/m$^2$) całkowitej rocznej sumy nasłonecznienia przypada na sześć miesięcy sezonu wiosenno-letniego. W pozostałym okresie suma nasłonecznienia wynosi 30% (346 kWh/m$^2$). W półroczu zimowym najwięcej energii można otrzymać stawiając kolektor pod kątem 60$^o$.

Tab. 1. Nasłonecznienie w półroczu letnim i zimowym dla Rzeszowa, kierunek S i N, na podstawie [6]

Tab. 1. Irradiation in summer and winter semester in Rzeszow, at S and N direction, based on [6]

| Kierunek | $H_y$ [kWh/m$^2$· rok] | Lato (IV-IX) | Zima (X-III) |
|---|---|---|---|
| S 30$^o$ | 1149 | 68% | 32% |
| S 45$^o$ | 1152 | 70% | 30% |
| S 60$^o$ | 1122 | 72% | 28% |
| N 0$^o$ | 1051 | 75% | 25% |

Usytuowanie kolektorów słonecznych na pochylonym dachu zwiększa roczną efektywność systemu słonecznego. Średnioroczne miesięczne nasłonecznie dla kierunku S i kąta 45$^o$ wynosi 96 kWh/(m$^2$·mies.), natomiast dla pozycji horyzontalnej jest około 10% niższe. Tylko w maju, czerwcu i lipcu uzyskuje się więcej energii, gdy kolektor ustawiony jest poziomo.

## 3. Charakterystyka budynku

### 3.1. Liczba mieszkańców

Analizowanym budynkiem zamieszkania zbiorowego jest 5-cio kondygnacyjny dom studencki „Promień” w Rzeszowie. W budynku na każdym piętrze znajduje się 26 trzy osobowych pokoi oraz pralnia i kuchnia. Na każdym piętrze znajdują się ogólnodostępne łazienki z prysznicami, w których zastosowano zawory czerpalne jednouchwytowe wyposażone w perlatory [8].

Na podstawie danych [8] z lat 2009–2014 można stwierdzić, że liczba mieszkańców od października do czerwca waha się od 263 do 324 osób. Natomiast w miesiącach letnich kiedy trwa przerwa wakacyjna (okres remontów i doraźnego pobytu studentów) liczba mieszkańców jest zdecydowanie niższa (tab. 2), (maksymalnie 120).

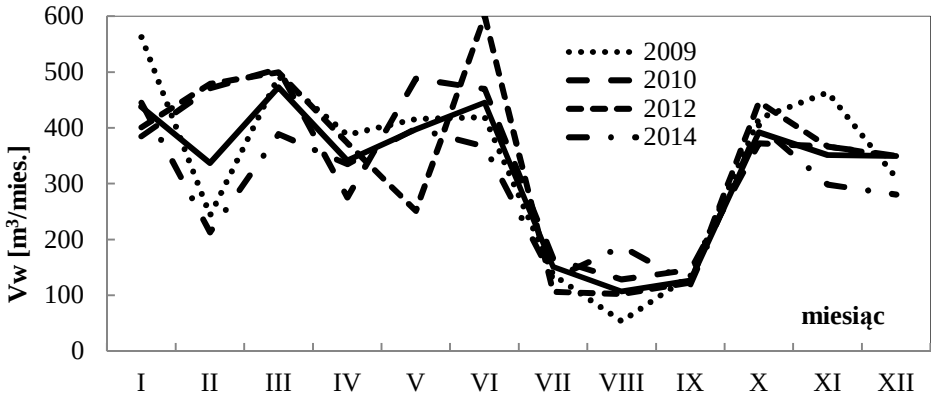
Tab. 2. Średnia miesięczna liczba mieszkańców w latach 2009-2014, na podstawie [8]

Tab. 2. The average monthly quantity inhabitants of in 2009-2014, based on [8]

| Rok/średnia liczba mieszańców | 2009 | 2010 | 2011 | 2012 | 2013 | 2014 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| okres X–VI (9 mies.) | 318 | 315 | 305 | 302 | 300 | 278 |
| okres VII–IX (3 mies.) | 80 | 105 | 94 | 51 | 66 | 92 |

### 3.2. Zużycie ciepłej wody użytkowej

Ze względu na charakter budynku i rodzaj odbiorców zużycie ciepłej wody użytkowej w akademiku utrzymuje się na wysokim poziomie. Analizowano zużycie ciepłej wody ($V_{w,z}$) w latach 2009–2014 uzyskane na podstawie wyników pomiarów [8] (rys. 1).




Rys. 1. Miesięczne zużycie ciepłej wody użytkowej w latach 2009–2014, na podstawie [8]

Fig. 1. Monthly hot water consumption in 2009-2014, own study based on [8]

Średnio roczne zużycie ciepłej wody wynosi około 3900 m$^3$, przy czym od października do czerwca średnio miesięcznie 390 m$^3$, (43 dm$^3$/(d·os.)). Natomiast w okresie wakacyjnym, średnio miesięcznie tylko 128 m$^3$, (51 dm$^3$/(d·os)). Wynika to, ze wspomnianej już, małej liczby mieszkańców w okresie letnim. Na podstawie danych można wskazać, że w okresie maksymalnego nasłonecznienia zużycie ciepłej wody w budynku wynosi 40,1% wartości rocznego zużycia.

### 3.3. Potrzeby cieplne budynku

Potrzeby cieplne domu studenta - ogrzewanie i przygotowaniem ciepłej wody zapewnia węzeł cieplny dwustopniowy. Węzeł c.w.u. był zasilany do 2009 roku tylko z miejskiej sieci cieplnej. Ciepła woda użytkowa podgrzewana była za pomocą 4 przepływowych wymienników typu Jad, a następnie magazynowana w dwóch zasobnikach o pojemności 1000 dm$^3$ każdy. Pomiar dostarczonego ciepła umożliwia ciepłomierz. System sterowania węzła c.w. nie został zintegrowany z systemem sterowania i regulacji instalacji słonecznej.

Zapotrzebowanie na ciepło do przygotowania ciepłej wody w budynku można wyznaczyć na podstawie liczby mieszkańców, w oparciu o pomiar zużytego ciepła oraz na podstawie rzeczywistego zużycia ciepłej wody. Obliczeniowe roczne zapotrzebowanie na energię końcową do przygotowania ciepłej wody z uwzględnieniem sprawności akumulacji ($Q_{W,Nd}$) wyznaczamy w oparciu o wzór [10]:

$$Q_{W,Nd} = V_{CWi} \cdot L_i \cdot \rho_W \cdot c_w \cdot \left(\theta_W - \theta_0\right) \cdot k_t \cdot \frac{t_{UZ}}{3600 \cdot \eta}, \left[\frac{\text{kWh}}{\text{rok}}\right] \text{ lub } \left[\frac{\text{kWh}}{\text{mies.}}\right] \quad (2)$$

Przyjęto [8]: $V_{CWi}$ = 0,07 m$^3$/(os · d) jest to jednostkowe dobowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę określone na podstawie dokumentacji projektowej; $c_w$ -pojemność właściwa cieplna wody, $c_w$ = 4,19 kJ/(kg · K); $\rho_w$ - gęstość wody, $\rho_w \approx$ 1000 kg/m$^3$; $\theta_W$ = 55°C; $\theta_0$ = 10°C; $t_{UZ}$ = 365 d/rok, $t_{UZ}$ = 31 (30) d/mies.; $k_t$ - mnożnik korekcyjny dla temperatury innej niż 55°C, $k_t$ = 1; $L_i$ – liczba osób.

Roczne zapotrzebowanie na energię końcową ($Q_{W,z}$) do przygotowania c.w.u. uwzględniające sprawność akumulacji na podstawie rzeczywistego zużycia c.w.u. wyznaczamy z zależności [10]:

$$Q_{W,z} = V_{w,z} \cdot \rho_W \cdot c_w \cdot \frac{(\theta_W - \theta_0)}{3600 \cdot \eta}, \left[\frac{\text{kWh}}{\text{rok}}\right] \text{ lub } \left[\frac{\text{kWh}}{\text{mies.}}\right] \quad (3)$$

gdzie: $V_{w,z}$ [m$^3$/rok] jest to rzeczywiste zużycie c.w. (dane z pomiarów) [8].

Na podstawie zależności (2) i (3) zostały wyznaczone miesięczne zapotrzebowania na energię $Q_{W,Nd}$; $Q_{W,z}$. Sprawność akumulacji w elementach pojemnościowych systemu ciepłej wody przyjęto na podstawie [10], $\eta$ = 0,86. Sprawności wytwarzanie i przesyłu ciepła z uwagi na lokalny charakter produkcji ciepła i niskie oszacowane straty przesyłu przyjęto równą 1,0. $Q_{W,z}$ jest obliczane na podstawie pomierzonego zużycie ciepłej wody, natomiast $Q_{W,Nd}$ obliczono uwzględniając liczbę osób oraz teoretyczne średnie dobowe zapotrzebowanie na ciepłą wodę na osobę. Zużycie ciepła w ciągu roku (miesiąca) ($Q_{W,p}$) są danymi otrzymanymi z pomiarów [8]. W okresie pracy instalacji ciepłej wody bez kolektorów słonecznych przyjęto założenie:

$$Q_{W,p} \approx Q_{W,z,} \approx Q_{W,Nd}, \text{ [kWh/rok] lub [kWh/mies.]} \quad (4)$$

### 3.4. Energia dostarczona ze Słońca

W celu zmniejszenia kosztów wytworzenia ciepła w domu studenckim zamontowano jesienią 2009 r. cztery zespoły baterii płaskich kolektorów słonecznych (po 5 kolektorów w każdym) o powierzchni 36 m$^2$. Wspomagają one instalację centralnej ciepłej wody użytkowej zasilaną z istniejącego węzła cieplnego, podłączonego do miejskiej sieci ciepłowniczej.

Energia cieplna z kolektorów słonecznych dostarczana jest do trzech pojemnościowych podgrzewaczy ciepłej wody o pojemności 750 dm$^3$ każdy, włączonych szeregowo w system podgrzewu ciepłej wody z sieci miejskiej. Ogrzana w podgrzewaczach pojemnościowych woda przepływa przez wymienniki węzła c.w., w których w okresach obniżonego nasłonecznienia dogrzewana jest

do docelowej temperatury lub dostarczana bez podgrzewu do zasobników buforowych. W celu schłodzenia cieczy grzewczej kolektorów, gdy temperatura glikolu wzrośnie powyżej 110°C zastosowano chłodnicę glikolu [9]. Instalacja słoneczna nie została wyposażona w licznik ciepła. W celu wyznaczenia energii dostarczonej ze Słońca $E_{kol}$ skorzystano ze wzoru:

$$E_{kol} = H_M \cdot A_{kol} \cdot \eta_k \left[\frac{\text{kWh}}{\text{mies.}}\right] \text{lub } [\frac{\text{kWh}}{\text{rok}}] \tag{5}$$

Przyjęto: $H_M$ [6] , $A_{kol}$ = 36 m$^2$ [8], założono $\eta_k$ = 0,81[1].

Stopień pokrycia zapotrzebowania na ciepło przez kolektory słoneczne ($\lambda$) obliczono ze wzorów:

$$\lambda = E_{kol} \cdot \frac{100}{Q_{W,Nd}} \tag{6}$$

$$\lambda = E_{kol} \cdot \frac{100}{Q_{W,z}} \tag{7}$$

$$\lambda = E_{kol} \cdot \frac{100}{Q_{W,p}} \tag{8}$$

W okresie pracy kolektorów słonecznych przyjęto następujące założenie:

$$Q_{W,z} = Q_{W,p} + E_{kol\ ex}, \text{ [kWh/rok],[kWh/mies.]} \tag{9}$$

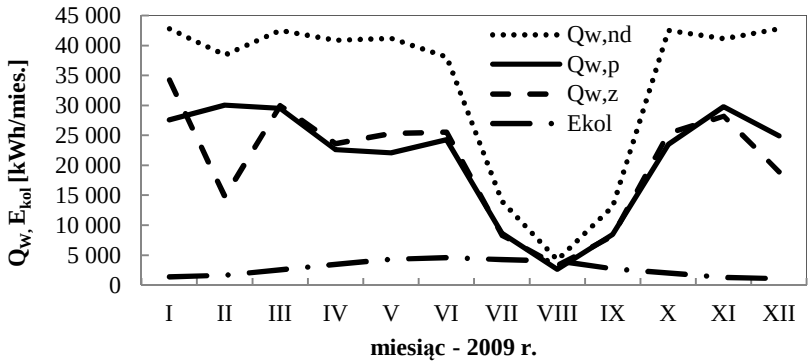
gdzie $E_{kol\ ex}$ jest to eksploatacyjny zysk energii słonecznej z kolektora.

## 4. Wyniki

Do 2009 r. ciepło do budynku dostarczane było tylko z miejskiej sieci cieplnej, natomiast w 2010 r. zastosowano kolektory słoneczne [11].

Wyniki obliczeń miesięcznego zapotrzebowania na energię końcową w 2009 r. $Q_{W,Nd}$ (2), $Q_{W,z}$ (3), $E_{kol}$ (5) oraz zużycia energii cieplnej na podstawie pomiarów $Q_{W,p}$ [8] przedstawiono na rys. 2.

Dla przyjętego stałego nachylenia kolektorów 45°, kierunek S energia dostarczona ze Słońca $E_{kol}$ w ciągu roku wynosi 33 580 kWh, w okresie wiosenno-letnim 23 500 kWh, a zimą 10 080 kWh. Obliczenia wykazały, że roczne wartości $Q_{W,\ Nd}$ w latach 2009-2014 są o ok. 49% - 70% większe od $Q_{W,z}$.

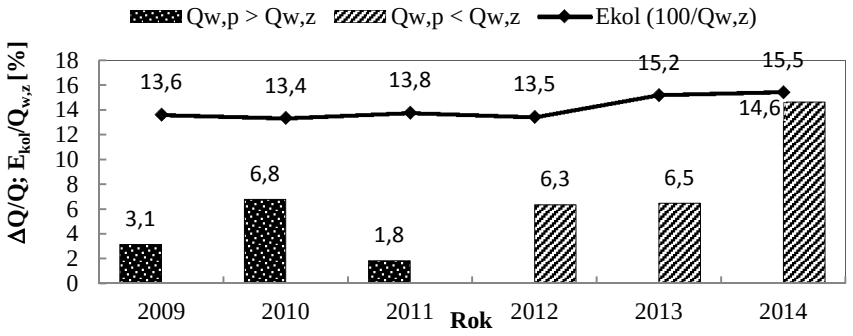



Rys. 2. Miesięczne wartości $Q_{W,\,Nd;}$ $Q_{W,\,z;}$ $Q_{W,\,p}$ oraz $E_{kol}$ w roku 2009

Fig. 2. Summary of monthly values of $Q_{W,\,Nd}$; $Q_{W,\,z}$; $Q_{W,\,p}$ and $E_{kol}$ in 2009

Średni miesięczny stopień pokrycia zapotrzebowania na ciepło przez kolektory słoneczne obliczony w oparciu o wzór (6) w 2009 r. wynosił dla okresu letniego 29,8%, w okresie zimy 4,0%, a średnioroczny 16,7%. Natomiast wyznaczony na podstawie pomiarów zużycia ciepła $Q_{W,\,p}$ (wzór 8) w 2009 wyniósł odpowiednio: 39,3% (lato); 6,1% (zima) i 22,7% (średnioroczny). Wynika to z większych wartości obliczeniowego zapotrzebowania na ciepło $Q_{W,\,Nd}$ w stosunku do wartości pomierzonych $Q_{W,p}$ (rys. 2).

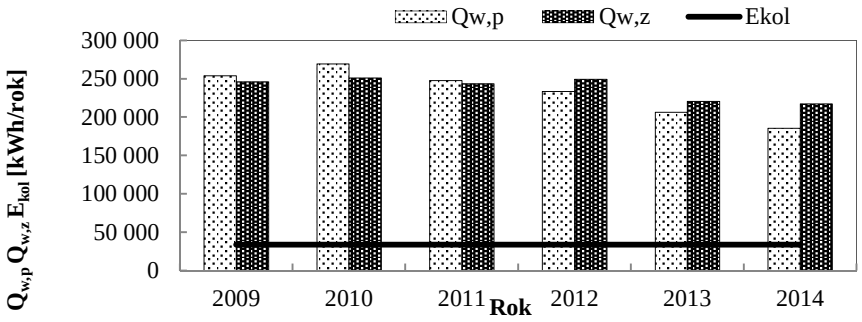
Na podstawie obliczeń, (wzór (7), ($Q_{W,\,z}$)), przyjęta powierzchnia kolektorów powinna zapewnić od 13,6% (2009 r.) do 15,5% (2014 r.) rocznych potrzeb cieplnych (rys. 3). W okresie wiosenno-letnim od 23,1% (2009) do 25,1% (2014).




Rys. 3. Procentowa różnica pomiędzy QW, p ; QW, z i λ w latach 2009-2014

Fig. 3. Percentage difference between QW, p ; QW, z and λ from 2009 to 2014

Przeprowadzona analiza ekonomiczna opłacalności wykorzystania kolektorów słonecznych wykazała, że prosty czas zwrotu kosztów modernizacji (SPBT) obliczony jako stosunek kosztów inwestycyjnych do oszczędności wyniesie około 16 lat [9]. Należy zaznaczyć, że w 2010 r. wykonano instalacją kolektorową. Rzeczywiste pomierzone zużycie ciepła w latach 2011-2014 ($Q_{W,\ p}$) jest energią dostarczoną z miejskiej sieci cieplnej. W latach 2010-2014 do ogrzewania wody wykorzystywano energię promieniowania słonecznego oraz ciepło z miejskiej sieci cieplnej. Wyniki rocznego zużycia ciepła $Q_{W,p}$ (pomiar), $Q_{W,z}$ (2) oraz $E_{kol}$ (4) w latach 2010-2014 przedstawia rys. 4.




Rys. 4. Zestawienie porównawcze QW, p; QW, z oraz Ekol w 2009 r. i latach 2010-2014

Fig. 4. Comparison of QW, p, QW, z and Ekol in 2009 and in from 2010 to 2014

## 5. Analiza i wnioski

Analizując zebrany materiał badawczy można zauważyć, że:

- Wartości zapotrzebowania na ciepło obliczone na podstawie obliczeniowego zapotrzebowania na energię na osobę $Q_{W,Nd}$ (na podstawie przepisów) są od 49% do 70% większe od rzeczywistego zużycia ciepła (z pomiarów).
- Kolektory słoneczne do ogrzewania ciepłej wody należy stosować w budynkach o dużym i stałym w okresie wysokiego nasłonecznienia (od kwietnia do września) zużyciu ciepłej wody. W analizowanym budynku 36 m$^2$ powierzchni kolektorów może dostarczyć średnio w okresie lata tylko do 25% ciepła do ogrzewania ciepłej wody (średnio w roku 15,5%), (wzór (6) rys. 3, 4). Nie przynosi to dużych oszczędność ciepła natomiast wydłuża czas zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych.
- Celem obliczeń było wykazanie oszczędności ciepła przy zastosowaniu instalacji kolektorowej. W roku 2010 nastąpił montaż instalacji, rok 2011 to uruchomienie instalacji - okres przejściowy. Kolejne lata ukazują zmniejszenie zużycia ciepła sieciowego. Spowodowane jest to przede wszystkim pracą instalacji słonecznej oraz zmniejszającą się liczba użytkowników. Od 2012 r. zużycie

ciepła sieciowego $Q_{W,p}$ maleje, w stosunku do zapotrzebowania na energię cieplną do przygotowania ciepłej wody $Q_{W,z}$. W analizowanej instalacji wykazano, że zastosowane kolektory słoneczne obniżają roczne zużycia ciepła dostarczanego z sieci cieplnej od 6,3% do 14,6% (rys.3). Niska efektywność cieplna jest spowodowana małą powierzchnią kolektorów, nie dostosowaną do wysokiego zużycia ciepła do ogrzewania ciepłej wody w domu studenckim.

Wnioski ogólne.

- W systemach zasilanych z sieci ciepłowniczej dobór oraz ocenę efektywności kolektorów słonecznych należy wykonać na podstawie zużycia ciepła otrzymanego z pomiaru (metoda zużyciowa).
- Instalacje słoneczne powinny być wyposażone w liczniki ciepła zwłaszcza w budynkach o dużym zużyciu ciepła solarnego (budynki użyteczności publicznej). Pozwoli to na ocenę pracy i efektywności instalacji słonecznej w warunkach eksploatacyjnych.
- Powierzchnia absorbera zamontowanych kolektorów powinna wynikać z zużycie ciepła w okresie maksymalnego nasłonecznienia (okres letni). W tym okresie zużycie ciepła do ogrzewania ciepłej wody powinno być największe. Wówczas to duża oszczędność ciepła z powodu wysokiego współczynnika wykorzystania energii słonecznej obniży czas zwrotu poniesionych nakładów inwestycyjnych.
- W celu ograniczenia wydatków wynikających z dużego rozbioru wody, proponuje się:
  – zwiększenie powierzchni kolektorów słonecznych (co najmniej dwukrotnie) uwzględniając możliwość lokalizacji bez ingerencji w układ akumulacji ciepła,
  – zwiększenie liczby odbiorców w okresie letnim (akademicka baza hotelowa),
  – dostosowanie systemu sterowania i regulacji instalacji słonecznej do systemu sterowania węzła cieplnego.

Wykonana analiza obrazuje przykład instalacji słonecznej, w której oczekiwane efekty związane z wykorzystaniem energii słonecznej nie przekładają się na korzyści eksploatacyjne.

## Literatura

[1] Główny Urząd Statystyczny. Portal Informacyjny. http://stat.gov.pl, dostęp 14.10.2015.

[2] Eurostat. http://ec.europa.eu/eurostat, dostęp 14.10.2015.

[3] Z. Pluta "Evacuated tubular or classical flat plate solar collectors?," Journal of Power Technologies 91 (3) (2011) 158-164.

[4] E. Zambolin, D. D. Col, "Experimental analysis of thermal performance of flat plate and evacuated tube solar collectors in stationary standard and daily conditions, Solar Energy 84 (8) (2010) 1383–1396.

[5] R. Tang, W. Gao, Y. Yu, H. Chen, Optimal tilt-angles of all-glass evacuated tube solar collectors, Energy 34 (2009) 1387-1395.

[6] Ministerstwo Infrastruktury i Budownictwa, http://www.mib.gov.pl, dostęp 20.08.2015.

[7] Chwieduk Dorota, "Solar Energy in Buildings. Thermal Balance for Efficient Heating and Cooling", 1st Edition, Elsevier Science & Technology Books, 2014.

[8] Dział Utrzymania Ruchu, Politechnika Rzeszowska, http://www.prz.edu.pl, dostęp 28.08.2015.

[9] P. Sawicka, E. Rybak-Wilusz, V. Pisarev, "Analiza systemu zaopatrzenia w wodę ciepłą w akademiku Promień Politechniki Rzeszowskiej", Prace Kół Naukowych Politechniki Rzeszowskiej 2009/2010, 293-301, (2011) ISBN 978-83-7199-656-6.

[10] Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z dnia 6.11.2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku (Dz.U. Nr 201/2008 poz. 1240).

[11] http://www.prolandsklep.co/pl/p/HEWALEX-KS-2000SP/276, dostęp 28.08.2015.

## ANALYSIS THE SOLAR ENERGY UTILIZATION IN THE BUILDING BASED ON OPERATING DATA

**S u m m a r y**

In the assessment of the efficiency and rational use of renewable energy taken into account they are the size of the energy potential of a particular source of energy, the use of energy and kind of the technical solution. This paper presents an analysis of a solar thermal system which is working to produce hot water in a collective residence building in Rzeszow. Irradiance exposure were analyzed based on information obtained from database available online for the meteorological station in Rzeszow-Jasionka.

The following part presents the characteristic of the analyzed building and the distribution of population and consumption of hot water from the years 2009-2014. The heat demand was calculation based on hot water consumption per person per day, dataset from measurements of consumption of hot water and also the measurement of heat consumption. The efficiency of solar energy conversion after installing solar thermal collectors had analyzed. The paper presents also way of calculation annually (monthly) ratio of utilization of solar energy to heat water. It was calculating reducing of heat demand from heat distribution network after installing the solar thermal collectors.

It presented elements that may impact on the calculation optimal area of solar thermal collectors. The improvements which are proposed may to increase the efficiency of solar thermal installation. It was experimentally proved that area of solar thermal collectors should take into account hot water demand of the building in summer season. It causes that the investments payback cost time is shortened.

**Keywords:** thermal efficiency, irradiation, solar thermal collectors, collective residence building

DOI:10.7862/rb.2016.221

*Przesłano do redakcji: 20.05.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 391-398

**Beata SADOWSKA**[1]

# EFEKTYWNY EKONOMICZNIE I EKOLOGICZNIE STANDARD ENERGETYCZNY BUDYNKÓW MIESZKALNYCH JEDNORODZINNYCH W WOJEWÓDZTWIE PODLASKIM

W referacie przedstawiono wybrane aspekty projektowania i wznoszenia budynków o niskim zapotrzebowaniu na energię w województwie podlaskim na tle aktualnych wymagań ochrony cieplnej w Polsce. Przedstawiono uwarunkowania klimatyczne oraz inne czynniki, wpływające na energochłonność budynków obejmujące zarówno rozwiązania architektoniczne, materiałowe, jak i instalacyjne. Dla zaprojektowanych i rzeczywiście eksploatowanych jednorodzinnych budynków mieszkalnych, zlokalizowanych w północno-wschodniej Polsce, wyznaczono charakterystyki energetyczne i zbadano wpływ poszczególnych rozwiązań na bilans cieplny. Przeanalizowano zmiany wskaźników energetycznych przedmiotowych budynków przy usytuowaniu ich w różnych strefach klimatycznych Polski oraz wpływ ostrości klimatu na zużycie energii cieplnej podczas ich eksploatacji oceniając sytuację województwa podlaskiego na tle innych regionów Polski. Oszacowano wysokość nakładów inwestycyjnych związanych z zastosowanymi w budynkach rozwiązaniami poprawiającymi ich jakość energetyczną ponad minimalne wymagania techniczne i możliwe do osiągnięcia oszczędności finansowe w fazie eksploatacji budynków. Oceniono efektywność ekonomiczną podwyższania standardu energetycznego budynków mieszkalnych jednorodzinnych wzniesionych w województwie podlaskim względem budynków typowych, zaprojektowanych według aktualnie obowiązujących wymagań ochrony cieplnej. Dyskusji poddano również możliwości ograniczania emisji szkodliwych gazów i pyłów do atmosfery związanego z polepszaniem standardu energetycznego budynków mieszkalnych jednorodzinnych w świetle wybranych krajowych uregulowań dotyczących jej ograniczenia.

**Słowa kluczowe:** budynek niskoenergochłonny, uwarunkowania regionalne, efektywność ekonomiczna, niska emisja

## 1. Wprowadzenie

Wśród obszarów działań na rzecz ograniczenia i racjonalizacji zużycia energii znajduje się sektor budynków, będący jednym z jej największych konsumentów [1]. Rozwój rynku wyrobów budowlanych i instalacyjnych, w tym

[1] Beata Sadowska, Politechnika Białostocka, Zakład Podstaw Budownictwa i Fizyki Budowli, ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok; tel. 502 200 249; b.sadowska@pb.edu.pl

odnawialnych technologii energetycznych, sprawił iż wznoszenie budynków o obniżonych potrzebach cieplnych nie stanowi w obecnych czasach problemu technicznego. Nie zawsze jednak przesłanki polityczne czy środowiskowe idą w parze z efektywnością ekonomiczną. Zastosowanie technologii czy materiałów poprawiających jakość energetyczną budynku ponad minimalne wymagania techniczne wymaga poniesienia wyższych nakładów inwestycyjnych, które nie zawsze mają szansę być zrekompensowane przez niższe koszty ogrzewania budynku w czasie jego eksploatacji.

Aktualne wymagania ochrony cieplnej budynków w Polsce (WT2014) określone są w Rozporządzeniu w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [2] (w artykule skrótowo oznaczanym jako WT). Rozporządzenie to podaje również wytyczne które będą obowiązywały od 1 stycznia 2017 r. (WT2017) oraz 2021 r. (WT2021) kiedy to wszystkie nowe budynki, zgodnie z dyrektywą 2010/31/UE [3], mają być *budynkami o niemal zerowym zużyciu energii*. W Polsce definicja tego typu budynków została podana, zgodnie z zapisami Ustawy o charakterystyce energetycznej [4], w Krajowym planie mającym na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii [1]. Ustalono, że w warunkach krajowych *budynek o niemal zerowym zużyciu energii* będzie utożsamiany i określany jako *budynek o niskim zużyciu energii* i będzie spełniał wymogi WT2021. Wymogi te dotyczą izolacyjności cieplnej przegród oraz wyposażenia technicznego budynku, maksymalnej powierzchni okien o współczynniku przenikania ciepła nie mniejszym niż 0,9 W/(m$^2$·K), a także wskaźnika nieodnawialnej energii pierwotnej *EP* obliczonego według przepisów dotyczących metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynków. Wskaźnik ten wyraża jednostkowe roczne zapotrzebowanie na energię zawartą w kopalnych surowcach energetycznych, która nie została poddana procesowi konwersji lub transformacji [5]. Obejmuje on nie tylko efektywność energetyczną samego budynku, lecz również wykorzystywane w nim nośniki energii, stąd też nie nadaje się do oceny jego jakości energetycznej [6].

Na jakość energetyczną budynku, a co za tym idzie na zużycie energii, wpływ mają czynniki zarówno wewnętrzne, jak i zewnętrzne. Wiele zależy od lokalnych warunków klimatycznych, ale i od umiejętnego wykorzystania uwarunkowań urbanistycznych (usytuowanie budynku względem stron świata, wysokość i zacienienie od sąsiadującej zabudowy, otaczająca zieleń i położenie w terenie pozwalające zmniejszyć niekorzystne oddziaływanie wiatru i maksymalnie wykorzystać zyski od słońca, a także oświetlenie światłem naturalnym). Inne czynniki, które powinny być wzięte pod uwagę już na etapie projektowania budynku to:

- prawidłowo ukształtowana bryła budynku zapewniająca relatywną jej zwartość, a także odpowiednią organizację przestrzeni wewnętrznej poprzez właściwe rozplanowanie położenia pomieszczeń i stosowanie ich zblokowania,
- odpowiednio dobrane właściwości wyrobów budowlanych i rozwiązań konstrukcyjnych zastosowanych w obudowie budynku (opłacalna ekonomicznie grubość izolacji termicznej, poprawne rozwiązanie detali architektonicznych,

minimalizujące wpływ mostków cieplnych, wyroby zapewniające wysoką szczelność na infiltrację powietrza, stolarka okienna i drzwiowa o niskich wartościach współczynnika przenikania ciepła, oszklone werandy przyległe do budynku, buforowe pomieszczenia nieogrzewane, przegrody akumulujące ciepło, czy specjalne elementy obudowy),

- technika instalacyjna na poziomie zapewniającym wysoką sprawność wytwarzania, magazynowania, dystrybucji i emisji ciepła w budynku oraz regulację pracy instalacji, a także ograniczenie zapotrzebowania na pomocniczą energię elektryczną związaną z działaniem instalacji w budynku; odzysk ciepła ze zużytego powietrza wentylacyjnego, wykorzystanie źródeł ciepła na biopaliwa, kogeneracji i źródeł energii odnawialnej (wiatrowej, geotermalnej i słonecznej pozyskiwanej bezpośrednio przez kolektory lub fotoogniwa bądź pośrednio pompami ciepła i w wymiennikach gruntowych).

W obecnych czasach ważna jest także dbałość o ograniczanie emisji szkodliwych gazów i pyłów do atmosfery. Polskie regulacje wdrażające postanowienia dyrektyw Unii Europejskiej w tej kwestii zawarte są m.in. w ustawie Prawo ochrony środowiska [7]. W artykule podjęto próbę określenia efektywnego ekonomicznie i ekologicznie standardu energetycznego budynków jednorodzinnych [8], zlokalizowanych w północno-wschodniej Polsce.

## 2. Opis budynków niskoenergetycznych i ich charakterystyka energetyczna w różnych lokalizacjach w Polsce

Do analizy wybrano dwa mieszkalne budynki jednorodzinne, zlokalizowane w województwie podlaskim (w Białymstoku lub jego okolicach).

Budynek B1 (o powierzchni 177,0 $m^2$, parterowy z poddaszem użytkowym, o rzucie w kształcie zbliżonym do kwadratu) to energooszczędny budynek wzniesiony w 2000 roku, dla którego średni wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię końcową do ogrzewania $EK_{co}$, odniesiony do warunków sezonu standardowego wynosi 52,1 kWh/($m^2$·rok). Ściany zewnętrzne budynku B1 trójwarstwowe (o $U$=0,20 W/$m^2$·K) wykonano z cegły silikatowej, z warstwą wełny mineralnej gr. 18 cm. W dachu zastosowano wełnę mineralną gr. 18 cm między krokwiami i dodatkowo 2 cm styropianu w ruszcie pod krokwiami i osiągnięto $U$=0,18 W/$m^2$·K. W podłodze na gruncie zastosowano styropian gr. 10 cm, zaś okna o $U_w$=1,90 W/$m^2$·K.

Budynek B2 (o powierzchni 145,7 $m^2$, parterowy, o rzucie w kształcie litery T) zaprojektowano w standardzie NF15 wg wymagań NFOŚiGW, w technologii tradycyjnej [9]. Ściany zewnętrzne przewidziano z betonu komórkowego ($\lambda$=0,12 W/m·K) z warstwą styropianu gr. 30 cm i $\lambda$=0,037 W/m·K co pozwoliło osiągnąć $U$=0,10 W/$m^2$·K. Stropodach wentylowany ($U$=0,09 W/$m^2$·K) posiada wełnę mineralną gr. 40 cm i $\lambda$=0,035 W/m·K. W podłodze na gruncie termoizolacja ma gr. 35 cm (o $\lambda$=0,031 W/m·K), wykonano również izolację termiczną obwodową. Zastosowano stolarkę okienną z profilami ramowymi o wy-

sokich parametrach izolacyjności cieplnej, z ciepłymi zestawami szybowymi i ciepłymi ramkami, o wypadkowym współczynniku $U_w = 0{,}74 \div 0{,}80$ W/(m$^2$·K).

Oba budynki są wyposażone w wentylację mechaniczną nawiewno - wywiewną z odzyskiem ciepła (o sprawnościach odpowiednio 93 i 55 %), zaś budynek B1 dodatkowo w gruntowy wymiennik ciepła do wstępnego podgrzewu powietrza wentylacyjnego. Jako źródło ciepła zastosowano kotły gazowe kondensacyjne (o sprawności wytwarzania równej 0,91 w budynku B1 i 0,94 w budynku B2), sprawność instalacji c.o. to odpowiednio 0,85 i 0,90, zaś instalacji c.w.u. 0,58.

Wyniki przeprowadzonych na podstawie [5, 10] obliczeń wskaźników energetycznych rocznego zapotrzebowania na: energię użytkową (*EU*), końcową (*EK*) i nieodnawialną energię pierwotną (*EP*) zestawiono w tab. 1.

Tabela 1. Zapotrzebowanie energetyczne budynków B1 i B2

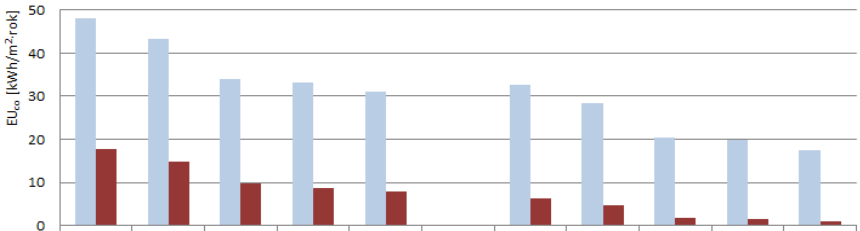
Table 1. Energy performance of the building B1 and B2

| **Charakterystyka** | **Budynek** | ***EU*** | ***EK*** | ***EP*** |
|---|---|---|---|---|
| | | [kWh/(m$^2$·rok)] | | |
| Wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła, zyski 3,0 W/m$^2$ | | | | |
| Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię dla systemu ogrzewania (c.o.) | B1 | 43,3 | 60,1 | 74,6 |
| | B2 | 14,9 | 22,0 | 32,6 |
| Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię dla systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.) | B1 | 24,1 | 41,9 | 46,6 |
| | B2 | 24,1 | 41,9 | 46,6 |
| Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię budynku (łącznie c.o. i c.w.u.) | B1 | 67,4 | 102 | 121,2 |
| | B2 | 39,0 | 63,8 | 79,2 |
| Wentylacja mechaniczna nawiewno-wywiewna z odzyskiem ciepła / wentylacja naturalna, zyski 6,8 W/m$^2$ | | | | |
| Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię dla systemu ogrzewania (c.o.) | B1 | 28,3 / 41,3 | 40,8 / 56,1 | 53,3 / 67,3 |
| | B2 | 4,6 / 19,1 | 9,9 / 25,5 | 19,3 / 33,7 |
| Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię dla systemu przygotowania ciepłej wody użytkowej (c.w.u.) | B1 | 24,1 | 41,9 | 46,6 |
| | B2 | 24,1 | 41,9 | 46,6 |
| Wskaźnik rocznego zapotrzebowania na energię budynku (łącznie c.o. i c.w.u.) | B1 | 52,4 / 65,4 | 82,7 / 98,0 | 99,9/113,9 |
| | B2 | 28,7 / 43,2 | 51,7 / 67,3 | 65,9 / 80,3 |

Uzyskano znaczne rozbieżności przy przyjęciu zysków wewnętrznych na poziomie 3,0 W/m$^2$ wg wymagań NFOŚiGW dla budynków energooszczędnych i 6,8 W/m$^2$ wg [5]. W przypadku budynku B1 zmiana tego jednego parametru spowodowała spadek wskaźnika $EU_{co}$ o blisko 35%, zaś w przypadku budynku B2 aż o 69% więc czym budynek jest „lepszy energetycznie" tym wpływ ten jest istotniejszy. Oba analizowane budynki (B1 i B2) przy zastosowaniu w nich wentylacji nawiewno-wywiewnej z odzyskiem ciepła spełniły aktualne wymaganie dotyczące wskaźnika *EP* ($EP_{max}$=120 kWh/(m$^2$·rok)), pomimo nie wypełnienia przez stolarkę okienną budynku B1 wymagań szczegółowych dotyczących współczynników przenikania ciepła. Również w przypadku, gdyby w budynkach zastosowana była wentylacja grawitacyjna, oba budynki spełniłyby aktualne wymaganie dotyczące wskaźnika *EP*, jednakże byłby problem z zapewnieniem przez budynek energooszczędny (B1) wymagań które będą obowiązywać od

1 stycznia 2017 wg [2] ($EP_{max}$=95 kWh/(m$^2$·rok)), zaś w przypadku wymagań które będą obowiązywać od 1 stycznia 2021 wg [2] ($EP_{max}$=70 kWh/(m$^2$·rok)) oba budynki (B1 i B2) nie mogły by być zrealizowane.

W przypadku budynku energooszczędnego (B1) udział ciepłej wody w strukturze zapotrzebowania na poszczególne rodzaje energii (*EU, EK i EP)* wyznaczone wg obowiązujących przepisów [5] wyniósł odpowiednio 46, 51 i 47 %, zaś w przypadku budynku NF15 (B2) 84, 81 i 71%. Tak więc, aby spełnić wymagania WT2021 należy albo znacznie obniżyć wartości współczynników przenikania ciepła przegród (jak w budynku B2) i zastosować w nim wentylację mechaniczną z wysokosprawnym odzyskiem ciepła, albo wykorzystać OZE (szczególnie do podgrzewu c.w.u.) czy niekonwencjonalne źródła energii.




| | Suwałki | Białystok | Warszawa | Wrocław | Szczecin | | Suwałki | Białystok | Warszawa | Wrocław | Szczecin |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | zyski 3,0 W/m2 | | | | | | zyski 6,8 W/m2 | | | | |
| budynek B1 | 48,2 | 43,3 | 34,0 | 33,1 | 31,1 | | 32,6 | 28,3 | 20,4 | 19,8 | 17,4 |
| budynek B2 | 17,7 | 14,9 | 9,9 | 8,8 | 8,0 | | 6,4 | 4,6 | 1,7 | 1,5 | 1,0 |

Rys. 1. Wpływ lokalizacji budynków na zapotrzebowanie na energię użytkową

Fig. 1. The effect of the location of buildings on demand for usable energy

Jak widać z rys. 1 zlokalizowanie analizowanych budynków w innej części województwa podlaskiego (Suwałki) powoduje wzrost wskaźnika $EU_{co}$ o 11% (w przypadku budynku B1) i o 18% (w przypadku budynku B2) przy zyskach wewnętrznych na poziomie 3,0 W/m$^2$. Przy zyskach wg [5] wynoszących 6,8 W/m$^2$ (wielkość zdecydowanie zawyżona) wzrost ten jest jeszcze większy.

Budynek B1 położony w Suwałkach (przy zyskach 3,0 W/m$^2$) ma zapotrzebowanie na energię użytkową o 55 % większe niż taki sam zlokalizowany w Szczecinie, zaś w przypadku budynku B2 różnica ta sięga 120% (rys. 1).

## 3. Aspekty ekonomiczne i ekologiczne wzniesienia budynków niskoenergetycznych w województwie podlaskim

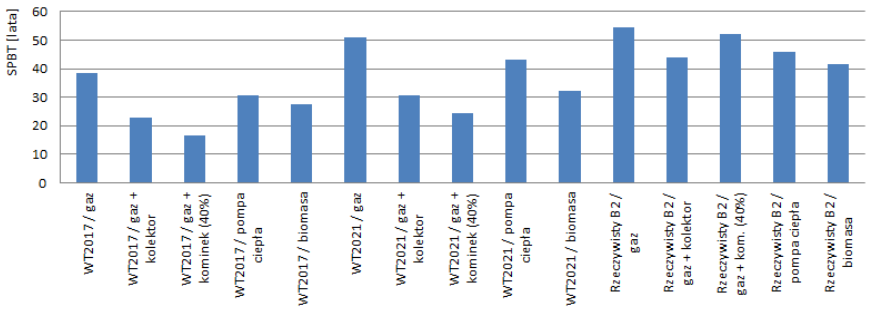
Wyznaczono zapotrzebowanie na energię, koszty ogrzewania i podgrzewu ciepłej wody oraz emisje $CO_2$ budynku B2 w różnych wersjach jego wykonania (WT2014, WT 2017 i WT2021 z wentylacją naturalną oraz rzeczywisty B2 z wentylacją mechaniczną) przy zastosowaniu różnych źródeł ciepła (tab. 2) i czas zwrotu nakładów na polepszenie standardu energetycznego (rys. 2). W przypadku biomasy wyliczono rzeczywistą emisję $CO_2$ oraz wyznaczoną wg [5].

Tabela 2. Porównanie efektywności poszczególnych wariantów

Table 2. Comparison of the effectiveness of the analysed variants

| Nr | Wariant (zyski 3,0 W/m2) | $EU_{co}$ | EK | EP | Koszt c.o. i c.w. | $\Delta E_{CO2}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | [kWh/(m$^2$·rok)] | | | [PLN/rok] | [Mg $CO_2$/rok] |
| 1 | WT2014 / gaz | 70,0 | 127,4 | 146,3 | 3 863 | 4,03 |
| 2 | WT2014 / gaz + kolektor | | 104,8 | 122,7 | 3 375 | 3,41 |
| 3 | WT2014 / gaz + kominek (40%) | | 134,3 | **117,9** | 3 098 | 5,37 / 3,06 |
| 4 | WT2014 / pompa ciepła | | 38,1 | **114,2** | 3 327 | 4,62 |
| 5 | WT2014 / biomasa | | 164,6 | **42,1** | 3 811 | 5,12 / 0,40 |
| 6 | WT2017 / gaz | 60,3 | 116,0 | 133,8 | 3 597 | 3,70 |
| 7 | WT2017 / gaz + kolektor | | 93,4 | **110,1** | 3 110 | 3,09 |
| 8 | WT2017 / gaz + kominek (40%) | | 121,9 | **109,2** | 2 937 | 4,85 / 2,86 |
| 9 | WT2017 / pompa ciepła | | 34,8 | **104,5** | 3 044 | 4,22 |
| 10 | WT2017 / biomasa | | 149,2 | **39,0** | 3 475 | 4,67 / 0,40 |
| 11 | WT2021 / gaz | 52,9 | 107,2 | 124,1 | 3 462 | 3,44 |
| 12 | WT2021 / gaz + kolektor | | 84,6 | **100,5** | 2 974 | 2,76 |
| 13 | WT2021 / gaz + kominek (40%) | | 112,4 | **102,6** | 2 815 | 4,45 / 2,71 |
| 14 | WT2021 / pompa ciepła | | 32,4 | **97,1** | 3 044 | 3,93 |
| 15 | WT2021 / biomasa | | 137,4 | **36,6** | 3 218 | 4,32 / 0,40 |
| 16 | Rzeczywisty B2 / gaz | 14,9 | 63,8 | **79,2** | 2 478 | 2,31 |
| 17 | Rzeczywisty B2 / gaz + kolektor | | 41,3 | **55,6** | 1 990 | 1,70 |
| 18 | Rzeczywisty B2 / gaz + kom. (40%) | | 65,4 | **73,2** | 2 314 | 2,58 / 2,10 |
| 19 | Rzeczywisty B2 / pompa ciepła | | 21,7 | **65,1** | 1 896 | 2,63 |
| 20 | Rzeczywisty B2 / biomasa | | 78,6 | **29,0** | 2 028 | 4,83 / 0,57 |

Nie we wszystkich z analizowanych wariantów udało się spełnić aktualne wymagania dotyczące wskaźnika *EP* (nr 1, 2, 6 i 11), natomiast tylko w trzech z nich (17, 19 i 20) są spełnione wymagania które będą obowiązywać od 1 stycznia 2021 roku.




Rys. 2. Prosty czas zwrotu nakładów na polepszenie standardu energetycznego budynku B2

Fig. 2. Simply Pay Back Time to recoup investment costs of the improvement in energy standard of building B2

## 4. Wnioski

Lokalne warunki klimatyczne w sposób istotny wpływają na zużycie energii cieplnej. Budynki w województwie podlaskim, w zależności od ich jakości energetycznej, charakteryzują się wskaźnikami energetycznymi wyższymi nawet o 120% niż te same budynki zlokalizowane w innych rejonach Polski.

Wypełnienie wymagań szczegółowych określonych w WT nie gwarantuje spełnienia wymagania dotyczącego wskaźnika rocznego zapotrzebowania na energię pierwotną *EP*.

Osiągnięcie przez jednorodzinny budynek mieszkalny zlokalizowany w województwie podlaskim określonego w WT2021 wskaźnika *EP* jest możliwe przy znacznie obniżonych wartościach współczynników przenikania ciepła przegród (rzędu 0,10 $W/m^2 \cdot K$) i wentylacji mechanicznej z wysokosprawnym odzyskiem ciepła, albo przy wykorzystaniu alternatywnych źródeł energii.

Kolektor słoneczny pozwolił obniżyć *EP* o 16-30% (jak również emisję $CO_2$), pompa ciepła o 18-22% (przy wzroście emisji $CO_2$), zaś biomasa znacznie obniżyła *EP* o (nawet o ponad 70%), jednak rzeczywista emisja $CO_2$ jest wyższa niż w przypadku innych źródeł energii.

Prosty okres zwrotu nakładów na polepszenie jakości bryły budynku waha się od 38 do 55 lat, zaś przy wykorzystaniu OZE lub alternatywnych źródeł energii, pomimo ich znacznego kosztu inwestycyjnego jest niższy nawet o 36%.

## Literatura

[1] Krajowy Plan mający na celu zwiększenie liczby budynków o niskim zużyciu energii. Zał. do Uchwały Nr 91 Rady Ministrów z dnia 22 czerwca 2015 r. (poz. 614).

[2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (D.U. z dnia 13 sierpnia 2013 r. poz.926).

[3] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/EU z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (D.U. UE z 18.6.2010, L153/13).

[4] Ustawa z dnia 29 sierpnia 2014 r. o charakterystyce energetycznej budynków (Dz. U. poz. 1200, z późn. zm.).

[5] Rozporządzenie Min. Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku świadectw charakterystyki energetycznej (D.U. z dnia 18 marca 2015 r. poz.376).

[6] Sarosiek W., Sadowska B.: Jakość energetyczna budynków a wskaźniki zamieszczone w świadectwach, Materiały Budowlane 08/2010, s. 51-53.

[7] Ustawa z dnia 27 kwietnia 2001 r. Prawo ochrony środowiska (Dz.U. 2001 Nr 62 poz. 627 z późn. zm.).

[8] Sadowska B. „Model operacyjny projektowania energooszczędnych budynków mieszkalnych w zabudowie jednorodzinnej", Rozprawa doktorska, Białystok 2010.

[9] Weryfikacja projektu budynku jednorodzinnego w standardzie NF15, Narodowa Agencja Poszanowania Energii S.A., Białystok.

[10] PN-EN ISO 13790:2009 „Energetyczne właściwości użytkowe budynków. Obliczanie zużycia energii do ogrzewania i chłodzenia".

*Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr S/WBiIŚ/3/2016 i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW*

## AN EFFECTIVE ECONOMICALLY AND ECOLOGICALLY ENERGY STANDARD OF DETACHED HOUSES IN PODLASKIE REGION

**S u m m a r y**

In the paper are presented selected problems of design, construction and use of low energy housing situated in Podlaskie region in relation to current requirements and minimum performance for new buildings in Poland. The climatic conditions and other factors affecting the energy demand of the building including architectural and materials solutions as well as installation are listed. Author expressed the energy performance of two detached houses located in north-east Poland and examined the influence of individual solutions on the heat balance. The effect of the location of buildings in five climatic zones in Poland on energy indicators and the influence of climatic conditions on the energy use and consumption were analysed.

The investment costs result from applied in buildings solutions improving their energy quality above of minimum current requirements and financial savings of exploitation energy are calculated. There is presented economic efficiency of increasing of the energy standard of one-family detached houses in Podlasie voivodship in relation to typical buildings, designed according to current requirements. Additionally the study shows possibilities of reducing the emissions of harmful gases and dust into the atmosphere of related to improving of the energy standard of detached houses refer to chosen current legal status in Poland conducive to reducing emissions.

**Keywords:** low energy house, conditionings regional, economic efficiency, low emission

DOI:10.7862/rb.2016.222

*Przesłano do redakcji: 15.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2015, s. 399-411

**Tomasz SALATA**[1]
**Barbara PRUS**[2]
**Krzysztof GAWROŃSKI**[3]

# OCENA ROZWIĄZAŃ PLANISTYCZNYCH Z WYKORZYSTANIEM PRZESTRZENNYCH BAZ DANYCH W ASPEKCIE SKALOWALNOŚCI ROZWOJU ZABUDOWY

Artykuł prezentuje możliwości zastosowania metod geomatycznych do oceny jakości sporządzonych rysunków miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego w aspekcie możliwości ich kontrolowanego rozwoju. Skalowalność, badana w poniższym artykule jest miarą możliwego powielania rozwiązań planistycznych z zakresu komunikacji, optymalizacji wielkości działek budowlanych, rozwoju terenów podmiejskich i racjonalnego wykorzystywania możliwych terenów inwestycyjnych dla budownictwa mieszkaniowego. Analizę przestrzenną wykonano w oparciu o techniki GIS i funkcje zaimplementowane do obsługi przestrzennych baz danych. Skorzystano z wolnego oprogramowania: SQLite/Spatialite, SpatiaLite_GUI, QGIS.

**Słowa kluczowe:** geoinformatyka, wolne oprogramowanie GIS, planowanie miejscowe, skalowaność MPZP

## 1. Wstęp

Według założeń ustawy o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym [12] ład przestrzenny jest to ukształtowanie przestrzeni, które tworzy harmonijną całość oraz uwzględnia w uporządkowanych relacjach uwarunkowania i wymagania funkcjonalne, społeczno-gospodarcze, środowiskowe, kulturowe oraz kompozycyjno-estetyczne. Ten idealny stan zagospodarowania przestrzennego powinien

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Tomasz Salata, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Gospodarki Przestrzennej i Architektury Krajobrazu, ul. Balicka 253c, 30-149 Kraków, tel. (12) 662 45 43, kgpiak@ur.krakow.pl
[2] Barbara Prus, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Gospodarki Przestrzennej i Architektury Krajobrazu, ul. Balicka 253c, 30-149 Kraków, tel. (12) 662 45 43, kgpiak@ur.krakow.pl
[3] Krzysztof Gawroński, Uniwersytet Rolniczy w Krakowie, Katedra Gospodarki Przestrzennej i Architektury Krajobrazu, ul. Balicka 253c, 30-149 Kraków, tel. (12) 662 45 43, kgpiak@ur.krakow.pl

odpowiadać kryteriom: funkcjonalnym, estetycznym, społecznym, gospodarczym, technicznym i przyrodniczym. Ład przestrzenny uważany jest za cel nadrzędny, za pożądany w określonym czasie i miejscu stan zagospodarowania przestrzennego. Ład przestrzenny jest realizowany między innymi poprzez politykę planistyczną władz gminy wyrażoną w procesie planowania miejscowego, w ramach którego na poziomie gminy powstają: studia uwarunkowań i kierunków zagospodarowania przestrzennego oraz miejscowe plany zagospodarowania przestrzennego. Zgodnie z zapisami ustawowymi w miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego określa się kierunki rozwoju gmin, w tym między innymi:

- dopuszczalny zakres zmian w strukturze przestrzennej gminy oraz w przeznaczeniu terenów, a także ograniczenia dotyczące tych zmian,
- minimalne i maksymalne parametry oraz wskaźniki urbanistyczne do zagospodarowania i użytkowania terenu z uwzględnieniem ładu przestrzennego.

Ograniczenia dla realizacji ładu przestrzennego stanowi wiele czynników, zarówno tych o charakterze ekonomicznym jak i fizjograficznym czy historycznym. Planowanie przestrzenne na terenach już zagospodarowanych powinno łączyć elementy zagospodarowania już istniejące z nowopowstającymi. Ważną cechą przestrzeni jest ograniczoność, stąd rozwiązania planistyczne powinny dążyć do jak najbardziej racjonalnego jej wykorzystania [11], [5].

W ostatnich latach można zaobserwować niepokojące zjawisko przeznaczania znacznych powierzchni rolniczej przestrzeni produkcyjnej na cele zabudowy mieszkaniowej [8]. Zabudowa powstaje wzdłuż dróg, w istniejących nieciągłościach lecz także na terenach wcześniej niezamieszkałych. Szczególnie dużą presją urbanizacyjną objęte są tereny położone na peryferiach miast [1], [10]. Tam też można zaobserwować zjawisko suburbanizacji [9], które przejawia się przeznaczaniem obszarów użytkowanych rolniczo na strefy zabudowane i zurbanizowane posiadające charakter quasi miejski [7].

Przyjęte rozwiązania planistyczne zawarte w dokumentach planistycznych będą w dużej mierze zależne od zastanego stanu zagospodarowania przestrzennego. Na obszarach wiejskich strefy mieszkaniowe są realizowane zgodnie z zamierzeniami prywatnych inwestorów. Strefy mieszkaniowe powstają najczęściej w bliskim sąsiedztwie działek siedliskowych (rodzinnych) lub w miejscach wnioskowanych przez prywatnych inwestorów [3]. Nowo projektowana zabudowa uzupełnia istniejące nieciągłości zabudowy lub przewiduje strefy mieszkaniowe wzdłuż ciągów komunikacyjnych. Nie jest natomiast praktykowane projektowanie zabudowy tzw. drugiego rzędu, głównie ze względu na prywatny charakter własności gruntów. Stąd wniosek, iż możliwości dalszego rozwoju zabudowy terenów zaprojektowanych niewłaściwie w pierwszej fazie zagospodarowania, są znikome. Jedynie otwarte układy przestrzenne z prawidłowo zaplanowanym układem dróg oraz sieci technicznego uzbrojenia terenu dają możliwość racjonalnego zagospodarowania przestrzeni. Pojęcie skalowalności oznacza zdolność (pojemność) układu do ponoszenia kolejnych obciążeń związanych z dalszym zagospodarowaniem przestrzeni. Osiedla mieszkaniowe charakteryzu-

jące się dużym stopniem skalowalności są możliwe do dalszej rozbudowy [6]. Tereny o niskiej skalowalności, są obszarami na których zasób przestrzeni został wyczerpany i nie może powstać nowa zabudowa. Skalowalność jest więc wielkością, która charakteryzuje możliwości rozwoju obszaru pod kątem przyjmowania (ponoszenia obciążeń) przyszłej zabudowy. Niekorzystnym z punktu widzenia rozwoju zrównoważonego jest zapełnianie terenami zabudowanymi i zurbanizowanymi wszystkich możliwych ciągów komunikacyjnych. Doprowadzi do stworzenia "zamkniętego" układu zabudowy, do utraty walorów krajobrazowych czy naturalnych korytarzy ekologicznych. Należy także pamiętać że wraz z rozwojem zabudowy pojawia się także problem ponoszenia obciążeń przez ciągi komunikacyjne a także problem wyposażenia oddalonych od siebie terenów w sieci technicznego uzbrojenia terenu.

Celem pracy jest wykazanie, że lokalna mikro koncentracja zabudowy, pomimo niemal ogólnej społecznej dezaprobaty jest niejednokrotnie jedynym wyjściem dla kreowania poprawnej polityki przestrzennej w gminie. Praca ma także na celu porównanie dwóch układów posiadających różne stopnie skalowalności – niski oraz wysoki. Wyznaczono parametry wpływające na ocenę przyjętych rozwiązań planistycznych, w tym skalowalności zabudowy. Do badań wykorzystano przestrzenne bazy danych.

## 2. Obszar badań oraz metoda badawcza

Badania przeprowadzono w oparciu o dwa obiekty badawcze zlokalizowane na terenie gminy Michałowice. Obszary badawcze nie zostały wybrane przypadkowo. Są to tereny zlokalizowane w strefie podmiejskiej Krakowa. Ponadto od kilkunastu lat są to obszary, na których można zaobserwować ożywioną dynamikę ruchu budowlanego [4]. Do analiz wybrano dwa obiekty które charakteryzują się odmiennym sposobem zabudowy. Pierwszy, na którym nowa zabudowa wpasowuje się w historycznie zastaną rozproszoną zabudowę zagrodową (funkcja rolnicza - Ryc.1. obiekt 1). Jej fizjonomia jest uwarunkowana w dużej mierze stosunkami własnościowymi. Drugi obszar to teren inwestycji developerskiej, w pełni zaplanowany do zabudowy i zagospodarowania (Ryc.1. obiekt 2).

W ramach analiz dokonano konfrontacji lokalizacji przyszłej i istniejącej zabudowy na obu obiektach a także porównano ustalenia miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego. Podejmowana problematyka obejmuje badanie natężenia skupienia i rozmieszczenia obiektów budowlanych, kształtu i powierzchni przeznaczonych do inwestycji w Miejscowym Planie Zagospodarowania Przestrzennego (skr. MPZP) oraz możliwości jego rozwoju poprzez powtarzanie struktury zabudowy na innych obszarach, stopnia wypełnienia przeznaczonego terenu obiektami inwestycyjnymi, możliwością kaskadowego wypełnienia obszarów inwestycyjnych powtarzalnymi modułami rozwiązań projektowych. Wszystkie wymienione cechy autorzy rozumieją jako pojęcie skalowalności, czyli zdolności do ekspansji lub intensyfikacji zabudowy bez konieczności korekty obiektów już istniejących.




Ryc.1. Obszar badań 1 i 2 wraz z ustaleniami MPZP

Fig. 1. Study area 1 and 2 with Master Development Plan establish

Analizę porównawczą skalowalności układów przeprowadzono w oparciu o wybrane miary koncentracji zbioru punktów na płaszczyźnie obrazujące stan zagospodarowania przestrzennego obiektów. Z porównania obiektów wynika stopień odchylenia od siebie obu układów.

Do analiz posłużyły materiały źródłowe w postaci:

- mapy zasadniczej w formacie GML według stanu z kwietnia 2015 r.,
- mapy ewidencji gruntów i budynków w formacie SWDE, stan z kwietnia 2015 r.,
- rysunku Miejscowego Planu Zagospodarowania Przestrzennego (Ryc.2) w formacie wektorowym ShapeFile (SHP), który został zaimportowany do bazy SpatiaLite, według stanu na 2006 rok (publikacja MPZP).

Porównanie dotyczyło różnic w możliwości skalowalności obu układów. Różnice te mogą wynikać z wielu uwarunkowań, m.in. rodzaju praw własności gruntów podlegających planowaniu miejscowemu czy fizjograficznych, ograniczających sposoby przeznaczenia terenu na określone cele.

Analizując obiekt 1 pod kątem ustaleń miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego w zakresie wyznaczenia stref zabudowy mieszkaniowej rolniczej można zauważyć przede wszystkim niekorzystne zjawisko przeznaczania coraz większych powierzchni rolnych na cele inwestycyjne.

Strefa MRj - zabudowy rolniczej obejmuje tereny wzdłuż wszystkich istniejących ciągów komunikacyjnych. W ten sposób powstała zamknięta enklawa terenów rolniczych pomiędzy układem dróg. W przypadku realizacji ustaleń tak przyjętego planu nie będzie zatem możliwości zachowania istniejących korytarzy ekologicznych, czy też utrzymania walorów krajobrazowych naturalnego




Ryc. 2. Ustalenia MPZP dla obiektu nr 1

Fig. 2. Master Development Plan establish for object 1

środowiska. Wyraźnie widać, iż powstaje zabudowa jedynie pierwszego rzędu. Powstanie zabudowy w drugiej linii za istniejącą zabudową będzie bardzo utrudnione, co wynika z braku odpowiednio zaprojektowanej sieci drogowej. Biorąc pod uwagę sposób wyznaczenia szerokości strefy MRj na poszczególnych działkach, można zauważyć, że w części przypadków strefy te zostały dwukrotnie powiększone tworząc nieregularną granicę pomiędzy strefą rolną i mieszkaniową. Dokonując porównania z obrazem zdjęć lotniczych badanego obszaru można zauważyć, iż taki przebieg granicy jest zgodny z użytkowaniem terenu (linią wyznaczaną przez sady znajdujące się bezpośrednio za zabudową rolniczą).

Szerokość wyznaczonej strefy MRj, ciągnącej się wzdłuż drogi głównej jest różna w różnych odcinkach. Na uwagę zasługuje również fakt, że w zapisach miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego nie ma ustaleń dotyczących przeznaczania działek na określone cele w zależności od ich geometrii, wielkości, czy też usytuowania w stosunku do drogi. Na badanym obszarze pojawił się przypadek przeznaczenia obszaru działki (przylegającej całą długością) na cele zabudowy rolniczej (RM) pomimo iż, na tej działce już znajduje się zabudowa zagrodowa. W konsekwencji takiego działania projektanta istniejąca funkcja rolnicza terenów będzie zanikać na korzyść terenów zabudowanych.

Analizując rozmieszczenie oraz geometrię wyznaczonych w planie miejscowym terenów inwestycyjnych wykonany został szereg operacji geoprocessin-

gu [2], mających na celu identyfikację obszarów możliwych do faktycznej zabudowy, w odróżnieniu stref wyznaczonych w planie miejscowym jako tereny MN - mieszkaniowe jednorodzinne, MRj - mieszkaniowe jednorodzinne zagrodowe oraz U - usługowe. Wymaga to uwzględnienia następujących założeń co do:

- wymaganej odległości względem granic nieruchomości,
- wymaganej odległości względem zabudowy sąsiadującej,
- usunięcia obszarów nie nadających się do zabudowy z powodu nieregularnego kształtu i zbyt małej powierzchni.

Przygotowane w ten sposób obiekty w bazie poddano działaniu narzędzia odcinania w oparciu o granice obszarów inwestycyjnych wyznaczonych w planie miejscowym a następnie usunięto szczątkowe poligony, których powierzchnia była mniejsza niż 30 m2 oraz wymiary boków mniejsze niż 8 m. Proces technologiczny powstawania zidentyfikowanych obszarów przeznaczonych do zabudowy prezentuje poniższa rycina (Ryc. 3).




Ryc. 3. Identyfikacja obszarów możliwych do zabudowy

Fig. 3. Buildable areas identification

Etap 1: wydzielenie z nieruchomości stref wyjętych z zabudowy w oparciu o §12 Rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, wygenerowanie obiektów zmniejszonych o 3 m pasa wokół granic,

Etap 2: określenie stref wynikających z przepisów przeciwpożarowych i § 13 i 60 w/w rozporządzenia - strefy 8 metrów wokół obrysu budynków,

Etap 3: eliminacja stref, które z uwagi na zbyt małą powierzchnię (< 30 m2) oraz niekorzystne wymiary boków (< 8 m) i niekorzystny kształt - strefy oznaczone kolorek czerwonym; ograniczenie stref efektywnej zabudowy do linii rozgraniczających MPZP.

Przyjęto że wartością skuteczności wyznaczenia obszarów inwestycyjnych jest stosunek powierzchni stref wyznaczonych w MPZP do obszaru, który może zostać faktycznie zainwestowany. Podstawowym czynnikiem warunkującym badane zjawisko jest układ granic nieruchomości i wzajemne położenie nieruchomości budynkowych względem siebie. W większości przypadków zabudowie będą podlegać obszary oddalone od granic nieruchomości zgodnie z zapisami prawa budowlanego [13] i Rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [14]. Minimalne odległości od granic nieruchomości zgodnie z §12 to 3 m dla ściany bez okien i 4 m dla ściany budynku z otworami okiennymi. Do obliczeń przyjęto odległość 3 m.

Obszary przeznaczone w planie miejscowym na cele inwestycyjne mogą być również częściowo zabudowane. W takim przypadku o możliwości usytuowania budynku na działce decydują wymagania przeciwpożarowe oraz wymogi zapewnienia naturalnego oświetlenia (zgodnie z § 13 i 60 warunków technicznych). Warunek naturalnego oświetlenia pomieszczeń przeznaczonych na pobyt ludzi (pokoi) uznaje się za spełniony, jeżeli między ramionami kąta 60° wyznaczonego w płaszczyźnie poziomej, z wierzchołkiem usytuowanym w wewnętrznym licu ściany na osi okna pomieszczenia przesłanianego nie znajduje się inny obiekt przesłaniający w odległości mniejszej niż wysokość przesłaniania. Wysokość przesłaniania jest mierzona od poziomu dolnej krawędzi (parapetu) najniżej położonych okien budynku przesłanianego do poziomu najwyższej zacieniającej krawędzi obiektu przesłaniającego (dachu) [Rozporządzenie 2002]. Powyższe przepisy warunkują usytuowanie budynku w sposób dynamiczny. Im wyższe budynki sąsiadujące tym większa odległość pomiędzy nimi. Można w sposób uproszczony założyć, że dla budynków o wysokości do 12 m odległość pomiędzy nimi nie może być mniejsza niż 8 m, po 4 m względem wspólnej granicy. Wygenerowano zatem strefy o szerokości 8 m względem obrysu budynków istniejących i wyłączono je z możliwości zabudowy.

Obliczona powierzchnia „efektywnej" zabudowy (Ryc. 4.) jest wynikiem zastosowania algorytmów geoprocessingu realizujących jedynie wybrane zapisy Prawa Budowlanego.

Powyższe reguły zastosowane zostały do testów na obiekcie 2, czyli osiedlu realizowanym przez developera. Powierzchnia przeciętnej działki budowlanej wynosi 9-10 arów gruntu, budynki są wolnostojące i powstała sieć wewnętrznych "ślepych" dróg dojazdowych wraz z drogami przejezdnymi osiedlowymi. Wyniki identyfikacji i kategoryzacji obszarów inwestycyjnych przedstawia rycina 5.




Ryc. 4. Strefy ustawowego wykluczenia obszarów z inwestycji

Fig. 4. The statutory zone exclusion areas of investment

## 3. Wyniki badań

Ocena poprawności określania obszarów zabudowanych powinna uwzględniać znaczny wpływ subiektywnego podejścia projektanta, organu zatwierdzającego miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego oraz właścicieli nieruchomości, którzy zawsze są za przeznaczeniem swojej nieruchomości na cele inwestycyjne. Modele przedstawione w niniejszej pracy (obszar 1 oraz obszar 2) różnią się stanem własności, co warunkuje wszystkie dalsze efekty planistyczne. W obiekcie 1 - tradycyjnym układzie zabudowy prawo własności do przedstawionych nieruchomości posiada ok. 90 właścicieli. W obiekcie 2 jest ich 5, z czego większość gruntów posiada developer. Obiekt 1 będzie wykazywał niezwykle dużą bezwładność w podejmowaniu decyzji o zmianie sposobu wykonywania własności, czego nie ma w obiekcie nr 1. W przypadku projektowania nowych stref pod zabudowę w planie miejscowym, bardziej uzasadnione jest przeznaczanie większych zwartych kompleksów pod zabudowę. Bloki stref ograniczone drogami istniejącymi lub projektowanymi posiadają znacznie wyższe prawdopodobieństwo wypełnienia obszaru w całości inwestycjami (widoczne jest to na obu obiektach), natomiast w przypadku liniowego przeznaczania terenów na cele zabudowy wzdłuż dróg pełne zapełnienie obszaru jest mało prawdopodobne.




Ryc. 5. Identyfikacja stref i kategoryzacja obszarów inwestycyjnych na obiekcie 2

Fig. 5. Investment areas identification and categorization on the object 2

Dla celów poglądowych wykonane zostały obliczenia kategorii powierzchni inwestycyjnej dla porównywanych obiektów. Obliczone lub wygenerowane parametry mogą zostać uznane za części składowe miar oceny rozwiązań planistycznych oraz przyjętego współczynnika skalowalności. W poniższych zestawieniach jako podstawowa informacja została uznana powierzchnia obszarów przeznaczonych w planie miejscowym na cele inwestycyjne i "pozostałe". Wyodrębnione zostały obszary już zainwestowane, które stanowią grunty leżące bezpośrednio pod budynkami i budowlami oraz niezbędne strefy wykluczone z zabudowy wskutek obowiązujących przepisów Prawa budowlanego. Wskaźnik efektywnej powierzchni inwestycyjnej (kolor jasno zielony na rycinach) jest różnicą pomiędzy powierzchnią ogólną kompleksu inwestycyjnego a strefami wyłączonymi i nieefektywnymi. Za strefy nieefektywne przyjęto powierzchnie znajdujące się poza strefami wykluczonymi prawnie, lecz z uwagi na niekorzystną powierzchnię zwartą lub wymiary, niemożliwe do zabudowy (kolor jasno czerwony na rycinach). Dodatkowym współczynnikiem jest uzyskana wielkość, która informuje o tym ile przeciętnie powierzchni nieefektywnej ustawowo przypada na każdą nieruchomość w kompleksie. Ten parametr został nazwany „Współczynnikiem NieEfektywności Ustawowej" (skr. WNEU) , i jest określony przez wzór (1):

$$\mathrm{WNEU} = \frac{\mathrm{P_k} - \sum_{i=1}^{n} \mathrm{T_z} - \sum_{t=1}^{n} -\mathrm{EPI}}{\sum_{i=1}^{n} \mathrm{t_z}} \quad (1)$$

gdzie: $Pk$ – powierzchnia kompleksu w MPZP [ha],
$\sum Tz$ – suma powierzchni obszarów zabudowanych ze strefami wynikającymi z §12, §13 i §60 Rozporządzenia [2002] /ha/,
$\sum EPI$ – suma powierzchni obszarów efektywnych inwestycyjnie /ha/,
$\sum Tzi$ – liczba nieruchomości n kompleksie projektowym /jedn. niemianowana/.

Wyniki analiz przestrzennych zostały zaprezentowane w w postaci zestawień dla obiektów modelowych. Rozliczenie powierzchni inwestycyjnej w Obiekcie 1 wygląda następująco:

- obszarów wyznaczonych w MPZP do inwestycji - 39,8279 ha (100 %),
- w tym już zabudowanych (wg reguł w §12, §13 i §60 Rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie) - 11,3460 ha (28,5 %),
- efektywna powierzchnia inwestycyjna - 23,1627 ha (58,2 %),
- nieefektywna powierzchnia inwestycyjna - 5,3192 ha (13,4 %),
- współczynnik niefektywności ustawowej - 0,0326 ha / nieruchomość.

Rozliczenie powierzchni inwestycyjnej w Obiekcie 2 wygląda następująco:

- obszarów wyznaczonych w MPZP do inwestycji - 21,2943 ha (100 %),
- w tym już zabudowanych (wg reguł w §12, §13 i §60 Rozporządzenia w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie) - 11,8995 ha (55,9 %),
- efektywna powierzchnia inwestycyjna - 5,8299 ha (27,4 %),
- nieefektywna powierzchnia inwestycyjna - 3,5649 ha (16,7 %),
- współczynnik niefektywności ustawowej- 0,0184 ha / nieruchomość.

Z powyższego wynika, że obliczone parametry są bardziej korzystne w przypadku obiektu 2. Taki stan został jednak osiągnięty po wspólnym opracowaniu projektu zagospodarowania działek dla wszystkich działek w kompleksie wyznaczonym w miejscowym planie na cele zabudowy. Gdyby analizie poddać obiekt 2 jeszcze przed wprowadzeniem zmian, obliczone parametry zapewne byłyby zbliżone jak w przypadku obiektu 1.

## 4. Wnioski

Przeprowadzona analiza porównawcza obiektów badawczych pozwoliła na dokonanie oceny rozwiązań planistycznych pod kątem skalowalności zabudowy. Na podstawie przeprowadzonych analiz można stwierdzić, iż:

- Obecnie w na obszarach wiejskich w miejscowych planach zagospodarowania przestrzennego powstają strefy zabudowy mieszkaniowej, oparte o podstawowy układ komunikacyjny miejscowości, bez możliwości zabudowy tzw. dru-

giego rzędu. Układ oparty o takie założenia oraz polityka planistyczna o charakterze „rabunkowym" doprowadzi do szybkiego wyczerpania przestrzeni inwestycyjnych. Może także prowadzić do ograniczenia przestrzeni naturalnej, lub do zamknięcia naturalnych korytarzy ekologicznych, czy też zmniejszenia walorów krajobrazowych poprzez umożliwienie zabudowy wzdłuż każdego ciągu komunikacyjnego.

- Przeprowadzone analizy wykazały odmienny charakter zwartych zabudowań deweloperskich, na których ze względu na działalność nastawioną na maksymalizację zysku, każdy metr przestrzeni jest w pełni wykorzystany, aż do pełnej zabudowy strefy.
- Znaczącą różnicą pomiędzy obiektami badawczymi jest fakt, że na obiekcie developerskim na obszarze nieco ponad 24 ha (obiekt 2) docelowo może powstać ponad 200 domów jednorodzinnych. Gdyby przyjąć sposób lokalizowania zabudowy według obiektu 1 ta sama liczba inwestycji musiałaby zająć znacznie większą powierzchnię.
- Biorąc pod uwagę przeprowadzone analizy można stwierdzić, że skalowalność jest przede wszystkim zależna od przyjętych rozwiązań w procesie projektowania stref w planie miejscowym, ich geometrii i wzajemnego usytuowania. Projektowanie zwartych i większych powierzchniowo stref inwestycyjnych (kształt zbliżony do kwadratu) wraz z równoczesnym naniesieniem sieci komunikacyjnej daje lepszą możliwość przyszłej lokalizacji zabudowy w procesie inwestycyjnym niż ustalenie długich i wąskich stref przeznaczenia w planie miejscowym (wzdłuż dróg), których geometria znacznie ogranicza możliwości zabudowy.
- Projektowanie stref przeznaczenia terenu o charakterze inwestycyjnym jest mało efektywne w przypadku gdy występuje szachownica gruntów (własnościowa i użytkowania).
- Duże znaczenie w wyznaczaniu stref przeznaczenia terenu oraz możliwości zabudowy przyszłych stref inwestycyjnych posiada struktura własnościowa. Rozdrobniona struktura własnościowa w powiązaniu z obowiązującymi przepisami prawnymi powoduje duże "straty" powierzchni możliwej do zabudowy ze względu na ograniczenia zabudowy spowodowane przebiegiem granic nieruchomości. Rozwiązaniem dla tego typu zaistniałej sytuacji mogłyby być porozumienia mieszkańców posiadających działki w wyznaczonej strefie inwestycyjnej zmierzające do objęcia ich wspólnym planem zagospodarowania działek, nie zaś indywidualnymi planami dla każdego z mieszkańców z osobna.
- Standardy planistyczne powinny ograniczać dowolność geometrii i wielkości stref przeznaczenia terenu, uniemożliwiając zabudowę wzdłuż wszystkich dróg dojazdowych. Obok przyjmowanych w planie miejscowym wskaźników urbanistycznych powinna zostać na poziomie gminy ustalona maksymalna powierzchnia będąca w posiadaniu jednego właściciela, która może zostać przeznaczona na cele inwestycyjne. A o wyznaczeniu strefy zabudowy miesz-

kaniowej nie powinna decydować jedynie informacja czy nieruchomość jest położona wzdłuż istniejącej drogi.

- Zastosowanie baz danych GIS umożliwiło szybkie przetworzenie informacji i wykonanie analiz przestrzennych stanu zagospodarowania przestrzennego obiektów oraz ich wzajemne porównanie.
- Ocena stanu zagospodarowania przestrzennego oparta na rozpoznaniu cech przestrzeni i występujących w niej zależności może zostać przeprowadzona w oparciu o aspekt skalowalności rozwoju zabudowy. Daje to możliwość wyznaczenia efektywności wykorzystania przestrzeni w procesie planowania przestrzennego.

## Literatura

[1] Domański R. 2013. Gospodarka przestrzenna. Podstawy teoretyczne. Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

[2] Gotlib D., Iwaniak A., Olszewski R. 2007. GIS. Obszary zastosowań. Wyd. PWN, Warszawa.

[3] Kwaśniak P. 2009. Plan miejscowy w systemie zagospodarowania przestrzennego. Wyd. LexisNexis, Warszawa.

[4] Leszczyńska M. 2010. System wspomagania decyzji optymalizujących rozwój marginalnych obszarów wiejskich. Acta Sci. Pol., Geodesia et Descriptio Terrarum 9(4) 2010, s. 37-48.

[5] Matysiak J. 2004. Człowiek a ład przestrzeni. W: T.J. Chmielewski (red.), Nowa jakość krajobrazu. Ekologia–Kultura–Technika, Komitet PAN Człowiek i Środowisko, Zeszyty Naukowe 36. Warszawa–Lublin, s. 59–69.

[6] Parysek J. 2008. Procesy suburbanizacyjne w aglomeracji poznańskiej. W: T. Kaczmarek, A. Mizgajski (red.), Powiat poznański – jakość przestrzeni i jakość życia. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań, s. 71–90.

[7] Poniży L. 2008. Presja urbanizacyjna i jej wpływ na zmiany przestrzennej struktury użytkowania ziemi na wybranych obszarach podmiejskich Poznania. Problemy Ekologii Krajobrazu, T. XXII. 335–342.

[8] Prus B. 2012. Kierunki zmian przeznaczenia gruntów rolnych i leśnych w Polsce. Acta Scientiarum Polonorum. Geod. Descr. Terr. 11(2), 27-40.

[9] Sokołowski D. 1999. Zróżnicowanie zbioru małych miast i większych osiedli wiejskich w Polsce w ujęciu koncepcji kontinuum wiejsko-miejskiego. Wyd. UMK, Toruń, s. 31.

[10] Springer F. 2013. Wanna z kolumnadą. Wyd. Czarna. Warszawa.

[11] Szulczewska B. 2000. Koncepcja rozwoju zrównoważonego jako podstawa strategii regionalnej – uwagi metodyczne. [w]: B. Szulczewska (red.), Przyrodnicze aspekty zrównoważonego rozwoju.

[12] Ustawa o planowaniu i zagospodarowaniu przestrzennym z dnia 27 marca 2003 r. [Dz.U. 2003 nr 80 poz. 717].

[13] Ustawa Prawo budowlane z dnia 7 lipca 1994 r. [Dz.U. 1994 nr 89 poz. 414].

[14] 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).

*Badania zrealizowane w ramach tematu nr DS 3371/KGPiAK/2015 finansowanego z dotacji celowej Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.*

## PLANNING SOLUTIONS EVALUATION WITH THE USE OF SPATIAL DATABASE IN TERMS OF CONSTRUCTION DEVELOPMENT SCALABILITY

**S u m m a r y**

This article presents the possibility of applying geomatic methods to evaluate the of drawn local development plans quality in terms of of their controlled development possibility. Scalability tested in this article is a measure of the possible duplication of planning solutions, roads communication, size plots optimizing, the development of suburban areas and rational use of possible housing areas. Spatial analysis was performed on GIS technology and functions implemented to spatial databases supporting. A free software: SQLite/SpatiaLite, SpatiaLite_GUI, QGIS was used to perform analises.

**Key words:** geoinformatics, free GIS software, spatial planning, master development plan scalability

DOI:10.7862/rb.2016.223

*Przesłano do redakcji: 15.07.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 413-420

**Karolina SIEDLISKA**[1]
**Agata ZDYB**[2]

# ZASTOSOWANIE WYBRANYCH BARWNIKÓW ORGANICZNYCH W BARWNIKOWYCH OGNIWACH SŁONECZNYCH

Coraz większe potrzeby energetyczne świata oraz nacisk na aspekty ekologiczne wymuszają poszukiwanie nowych, bardziej efektywnych i tanich sposobów wytwarzania energii elektrycznej, stąd wynika wzrost zainteresowania w ostatnich latach barwnikowymi ogniwami słonecznymi (DSSC – Dye Sensitized Solar Cells). Głównym komponentem takiego ogniwa, który odpowiada za absorbcję promieniowania słonecznego padającego na jego powierzchnię, jest półprzewodząca warstwa nanocząstek $TiO_2$ z zaadsorbowanym na niej barwnikiem. Barwnik działający jako sensybilizator jest adsorbowany na powierzchni ditlenku tytanu, ponieważ powoduje zwiększenie zakresu absorpcji promieniowania słonecznego przez oświetlaną elektrodę. W niniejszej pracy przedstawiono zastosowanie wybranych barwników organicznych (alizaryny, chinizaryny, ktecholu, parabutylokatechiny) oraz dwóch technik wytwarzania warstwy półprzewodzącej nanocząstek $TiO_2$ (nanoszenie z roztworu koloidalnego lub pasty) do budowy ogniw DSSC. Wyznaczono widma absorpcji światła dla poszczególnych barwników i zmierzono sprawności ogniw w zależności od rodzaju zastosowanego barwnika oraz metody wytworzenia warstwy $TiO_2$. Każdy z badanych sensybilizatorów trwale adsorbuje się na nanocząstkach $TiO_2$ w czasie jednej doby. Wykorzystanie danych komponentów do budowy ogniwa pozwoliło na uzyskanie najwyższej sprawności rzędu 0,272% w przypadku elektrody wykonanej z pasty oraz zaadsorbowanego na niej barwnika chinizaryny. Przedstawione w artykule wyniki badań pozwalają stwierdzić zasadność zastosowania wybranych barwników oraz konieczność dalszych badań nad zwiększeniem wydajności ogniw typu DSSC.

**Słowa kluczowe:** ogniwo barwnikowe (DSSC), fotowoltaika, substancje sensybilizujące, alizaryna, katechol, chinizaryna, parabutylokatechina

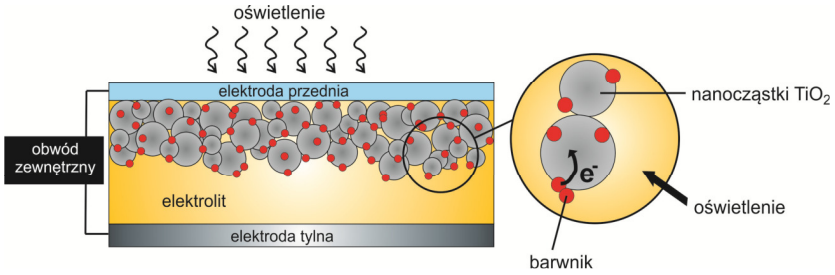
[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Karolina Siedliska, Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Katedra Fizyki, ul. Akademicka 13, 20-950 Lublin; tel. 81-445-69-05; karolina.siedliska@up.lublin.pl

[2] Agata Zdyb, Politechnika Lubelska, Instytut Inżynierii Odnawialnych Źródeł Energii, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin; tel. 81-538-47-47; a.zdyb@pollub.pl

## 1. Wprowadzenie

Ograniczenie kosztów produkcji ogniw słonecznych jest obecnie podstawowym celem badań realizowanych w dziedzinie fotwoltaiki. Tym samym dużą szansę na rozwój upatruje się w barwnikowych ogniwach słonecznych, które są stosunkowo proste w konstrukcji i nie wymagają do konstrukcji budowy drogich i nieprzyjaznych środowisku materiałów. Mimo tego, że prace nad ogniwami elektrochemicznymi trwają już od wielu lat, to przełom w badaniach nastąpił dopiero po opracowaniu modelu ogniwa barwnikowego przez Michaela Graetzela i Briana O'Regana w 1991 roku [1]. Sprawność pierwszych ogniw barwnikowych wynosiła poniżej 7% [2], dziś przy zastosowaniu nowoczesnych technik wytwarzania mezoporowatych półprzewodnikowych elektrod i nowych barwników sprawność przekracza nawet 13,8% [3].

Absorpcja światła w ogniwach DSSC następuje w warstwie półprzewodnika (najczęściej $TiO_2$), na którego powierzchni jest zaadsorbowany barwnik. Dobór odpowiedniego barwnika determinuje w dużym stopniu wydajność ogniwa. Jako substancje sensybilizujące wykorzystuje się zarówno barwniki organiczne, metaloorganiczne, jak i nieorganiczne. Do tej pory najwyższe wydajności ogniw uzyskiwano dla kompleksów rutenu oraz barwników porfirynowych (13%) [4], ale ze względu na ich dużą toksyczność i relatywnie wysoki koszt produkcji próbuje się je zastąpić innymi substancjami. Uwaga wielu naukowców skupia się głównie na barwnikach występujących w przyrodzie, które charakteryzują się dużą dostępnością i różnorodnością. Pomimo uzyskiwania sprawności maksymalnie rzędu 2,9% (dla ekstraktu z *Brassica olercea)* [5] to właśnie barwniki pochodzenia naturalnego np. flawonoidy [6,7], wydają się być obecnie dobrym materiałem na substancje sensybilizujące.




Rys. 1. Budowa barwnikowego ogniwa słonecznego

Fig. 1. Schematic of dye sensitized solar cell

Na Rys. 1 przedstawiono schemat budowy barwnikowego ogniwa słonecznego. Kiedy powierzchnia ogniwa jest oświetlana, zachodzi absorpcja fotonu przez barwnik, co prowadzi do wzbudzenia jego cząsteczki. Następuje wówczas iniekcja elektronu do pasma przewodnictwa półprzewodnika i pozostała cząsteczka barwnika ma postać jonu dodatniego $S^+$. Wprowadzony do pasma prze-

wodnictwa elektron przechodzi przez mezoporowatą warstwę półprzewodnika i dociera do przedniej elektrody, a stamtąd przechodzi do zewnętrznej części obwodu elektrycznego. Po przejściu przez przeciwelektrodę platynową (elektrodę tylną) elektron redukuje cząstkę elektrolitu $I^-/I^{3-}$, co powoduje reakcję regeneracji cząsteczki barwnika i obwód się zamyka [1].

W niniejszej pracy przedstawiono wykorzystanie czterech barwników organicznych w roli sensybilizatorów w ogniwach typu DSSC: alizaryny, chinizaryny, katecholu i parabutylokatechiny, które wybrano ze względu na brak dotychczasowych doniesień literaturowych dotyczących ich zastosowań do budowy ogniw typu DSSC. Przeprowadzono badania wydajności ogniw w zależności od rodzaju zastosowanej substancji sensybilizującej, a także od sposobu wytworzenia warstwy tytanowej. Dla wszystkich barwników określono także widma absorpcji promieniowania w zakresie światła widzialnego.

## 2. Opis procedury badawczej

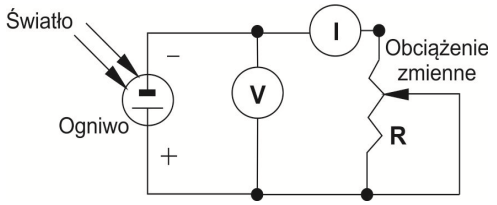
### 2.1. Preparatyka substancji wykorzystanych do badań

Koloidalną zawiesinę nanocząstek ditlenku tytanu o stężeniu 100 $mM \cdot dm^{-3}$ w bezwodnym etanolu (99,8%) otrzymano metodą hydrolizy izopropanolanu tytanu [8]. Pastę sporządzano zaś przy użyciu gotowych nanocząstek ditlenku tytanu zakupionych w postaci proszku o nazwie handlowej DEGUSSA P-25. Elektrody nanoszono na szkło, pokryte warstwą przewodzącego tlenku ITO (*indium thin oxide*), odpowiednio poprzez nakrapianie roztworu koloidalnego lub nanoszenie pasty.

Roztwory substancji sensybilizujących wykonano poprzez rozpuszczenie barwników w bezwodnym etanolu. W ten sposób otrzymano roztwory nasycone, w których zanurzano na 24 godziny szkła przewodzące z naniesionymi warstwami $TiO_2$ w celu uzyskania kompleksów sensybilizator-$TiO_2$.

### 2.2. Konstrukcja barwnikowego ogniwa słonecznego i układ pomiarowy

Badane ogniwa barwnikowe budowano w taki sposób, aby uzyskać następującą kolejność elementów: ITO/$TiO_2$/barwnik/elektrolit/Pt/ITO.




Rys. 2. Układ doświadczalny do pomiaru charakterystyk prądowo-napięciowych ogniw DSSC

Fig. 2. Experimental setup for measuring the current-voltage characteristics of DSSC

Do wyznaczania parametrów pracy badanych ogniw barwnikowych wykorzystano układ pomiarowy, który składał się z lampy halogenowej, amperomierza i woltomierza oraz rezystora o regulowanym obciążeniu (Rys. 2). Do pomiarów wykorzystano mierniki firmy PHYWE oraz lampę halogenową KFB videolight 6 firmy KAISER, typ 93304, o mocy 1000 W i barwie światła 3400 K używaną w przypadku pomiarów ogniw z koloidalną warstwą $TiO_2$. W przypadku stosowania lampy halogenowej ogniwo przesłaniano filtrem podczerwieni w celu eliminacji efektów temperaturowych, powodujących ewaporację elektrolitu. Ogniwa z warstwą $TiO_2$ wytworzoną z preparatu DEGUSSA P-25 badano w warunkach oświetlenia biurowego. Natężenie światła oświetlającego ogniwo wynosiło odpowiednio: w przypadku stosowania lampy halogenowej - 36,6 $mW \cdot m^{-2}$, zaś dla warunków oświetlenia biurowego - 0,35 $mW \cdot m^{-2}$. Wyznaczenie widm adsorpcji barwników przeprowadzono przy użyciu spektrofotometru UV/VIS, Model U-1500, firmy HITACHI.

## 3. Wyniki badań

Badanie własności barwników poprzedzono wyznaczeniem widma absorpcji czystego ditlenku tytanu. Z przeprowadzonej analizy wynika, że zakres absorpcji promieniowania dla czystego ditlenku jest bardzo wąski i zawiera się w zakresie długości fal poniżej 350 nm (Rys. 3b). Widoczne jest wyraźnie, że bez zastosowania sensybilizatorów w ogniwach barwnikowych ich sprawność byłaby bardzo niska. Uzyskane widma absorbcji dla roztworów poszczególnych barwników oraz ich kompleksów z ditlenkiem tytanu przedstawiono na Rys. 3.

W przypadku alizaryny, która jest czerwonym barwnikiem pochodzenia naturalnego pozyskiwanego z korzenia marzanny barwierskiej *(Rubia tinctorum),* w widmie absorpcji widoczne są dwa wyraźne maksima przy długości fali około 440 nm oraz poniżej 300 nm. Jednak po utworzeniu kompleksu z ditlenkiem tytanu następuje ich przesunięcie w stronę długofalową. Pojawia się wyraźne maksimum absorpcji przy długości fali 500 nm.

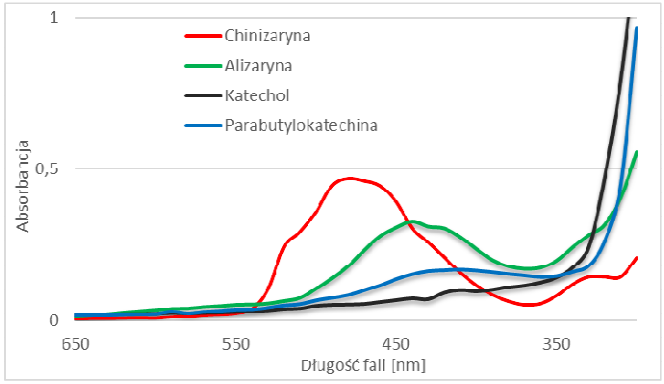
Dla chinizaryny, barwnika o barwie czerwono-brązowej będącego pochodną alizaryny, w widmie absorpcji jest widoczne maksimum absorpcji przy długości fali około 475 nm oraz w zakresie ultrafioletu. Utworzenie kompleksu barwnika z ditlenkiem tytanu nie powoduje istotnych zmian w widmie absorbcji, a jest jedynie złożeniem spektrum pochłaniania promieniowania dla obu związków.

Wolny katechol, barwnik dostępny w sprzedaży jako proszek o barwie beżowej, posiada widoczne pasmo absorpcji w zakresie długości fal poniżej 300 nm. Po utworzeniu kompleksu z ditlenkiem tytanu następuje przesunięcie maksima absorpcji w stronę długofalową. Wyraźne piki są widoczne przy długościach fal 400 nm i poniżej 350 nm.

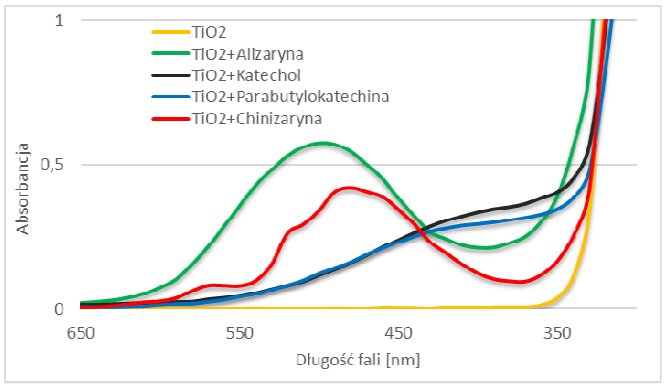
Parabutylokatechina, barwnik o barwie kremowej, będąca pochodną katecholu wykazuje podobnie jak on maksimum absorpcji w zakresie ultrafioletu, a także przy długości fali 410 nm. Pojawienie się drugiego piku w tym przypad-

ku związane jest prawdopodobnie z występowaniem butylowej grupy funkcyjnej. Po utworzeniu kompleksów barwnika z ditlenkiem tytanu, nie zauważa się istotnej zmiany. Maksima absorpcji znajdują się w tych samych zakresach długości fal, jakie są charakterystyczne dla obu tych substancji.

a)




b)




Rys. 3. a) Widmo absorpcji roztworów poszczególnych barwników, b) mieszaniny $TiO_2$+barwnik oraz nanocząstek $TiO_2$ w temperaturze pokojowej

Fig. 3. a) Absorption spectrum of dyes solution, b) mixture of dye+$TiO_2$ solution and $TiO_2$ nanoparticles solution at room temperature

## 4. Analiza wyników

Sprawność ($\eta$) barwnikowych ogniw słonecznych wyznaczono ze wzoru:

$$\eta = \frac{U_{OC} \cdot I_{SC} \cdot FF}{S \cdot A} \cdot 100\% \tag{1}$$

gdzie: $U_{OC}$ – napięcie obwodu otwartego,
$I_{SC}$ – prąd zwarcia,

$S$ – powierzchnia czynna ogniwa,
$A$ – moc promieniowania padającego na powierzchnię ogniwa,
$FF$ – współczynnik wypełnienia charakterystyki – parametr określający jakość ogniwa słonecznego wyrażany wzorem:

$$FF = \frac{U_{MPP} \cdot I_{MPP}}{U_{OC} \cdot I_{SC}} \tag{2}$$

gdzie: $U_{MPP}$ – napięcie w punkcie mocy maksymalnej,
$I_{MPP}$ - wartość natężenia prądu w punkcie mocy maksymalnej.

Wyniki przeprowadzonych obliczeń wykazują, iż sprawności ogniw z elektrodą półprzewodnikową utworzoną z pasty z preparatu P-25 DEGUSSA są wyższe niż w przypadku wykorzystania ditlenku tytanu w postaci nanocząstek koloidalnych. Wpływ na otrzymane wartości miał także rodzaj zastosowanego barwnika. W przypadku pasty najlepsze wyniki otrzymano dla chinizaryny i parabutylokatechiny, a dla koloidu – alizaryny i chinizaryny.

Na podstawie otrzymanych wyników przypuszcza się, że otrzymanie niższych sprawności w przypadku koloidu może być spowodowane zbyt małą ilością nanocząstek ditlenku tytanu tworzących elektrodę, a co za tym idzie niskim współczynnikiem porowatości powierzchni. Mogło to mieć wpływ na niski współczynnik adsorpcji barwników i zmniejszać efektywność zachodzących reakcji oraz utrudniać swobodny przepływ ładunku w złączu.

Sprawność ogniw obniżyły także problemy z zastosowaniem ciekłego elektrolitu. W związku z tym, iż nie znaleziono efektywnego sposobu uszczelnienia ogniw, mógł on swobodnie wyciekać i odparowywać. Zastosowanie lampy halogenowej spowodowało podwyższenie temperatury układu i zwiększenie ewaporacji elektrolitu. Z drugiej strony wzrost temperatury spowodował obniżenie przewodności poszczególnych elementów ogniwa.

Wyższa efektywność w przypadku pasty zawiązana jest prawdopodobnie z uzyskaniem warstwy $TiO_2$ o większej grubości, wyższego współczynnika porowatości powierzchni, większej ilości zaadsorbowanego barwnika, oraz mniejszego prawdopodobieństwa wyciekania elektrolitu ze względu na wypełnienie porów. Mogło to wpłynąć na poprawę kinetyki reakcji zachodzących w ogniwie, poprzez wzajemne przenikanie się poszczególnych warstw i swobodniejszy transport ładunków elektrycznych.

Różnice w sprawnościach dla różnych substancji sensybilizujących wynikają z różnic w widmach absorpcji, a także z ich struktury chemicznej, która ma wpływ na rodzaj wiązań tworzonych z ditlenkiem tytanu i stopień adsorpcji na jego powierzchni. Najlepsze wyniki osiągnięto dla chinizaryny zaadsorbowanej na paście z ditlenku tytanu, czyli FF = 0,37 i sprawność $\eta = 0{,}272\%$, pozostałe wyniki przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry pracy badanych ogniw barwnikowych

Table 1. Operating parameters of conducted solar cells

| Badany barwnik | Rodzaj elektrody | FF | η [%] |
|---|---|---|---|
| parabutylokatechina | pasta | 0,34 | 0,14 |
| | koloid | 0,41 | 0,004 |
| katechol | pasta | 0,36 | 0,079 |
| | koloid | 0,4 | 0,002 |
| alizaryna | pasta | 0,37 | 0,017 |
| | koloid | 0,52 | 0,009 |
| chinizaryna | pasta | 0,39 | 0,272 |
| | koloid | 0,7 | 0,008 |

## 5. Wnioski

Z przeprowadzonych badań i analizy otrzymanych wyników wynika, że:

– sprawność barwnikowych ogniw słonecznych przede wszystkim zależy od zastosowanej elektrody półprzewodnikowej i rodzaju zaadsorbowanego barwnika;
– zastosowanie gotowego preparatu nanocząstek DEGUSSA P-25 pozwala osiągać wyższą efektywność niż użycie roztworu koloidalnego, a poza tym wytworzenie elektrody w tym przypadku jest szybsze i łatwiejsze;
– otrzymane niewielkie sprawności w przypadku roztworu koloidalnego prawdopodobnie związane są z jego zbyt niskim stężeniem molowym;
– struktura chemiczna barwnika ma wpływ na jego właściwości absorpcyjne. Zaobserwowano, iż niewielka zmiana strukturze sensybilizatora np. poprzez zmianę konfiguracji lub dodanie grupy funkcyjnej może mieć znaczący wpływ na widmo absorpcji, tak jak w przypadku chinizaryny, przy zastosowaniu której osiągnięto najlepsze sprawności zarówno dla pasty, jak i koloidu;
– rodzaj zaadsorbowanego barwnika ma znaczący wpływ na zakres absorbowanego promieniowania przez ogniwo;
– zastosowanie pasty z nanocząstek ditlenku tytanu pozwala na zmniejszenie efektów związanych z wyciekaniem i parowaniem elektrolitu;
– na sprawność ogniwa wpływ mają warunki pracy. Wzrost temperatury urządzenia znacząco pogarsza uzyskiwane parametry i konieczne jest zastosowanie rozwiązań przeciwdziałających tym efektom, takich jak np. filtr podczerwieni;
– badania wyokazały, że przy zastosowaniu danego układu pomiarowego i najbardziej optymalnej kombinacji wykorzystanych komponentów ogniwa można osiągnąć sprawność wynoszącą w przybliżeniu 0,3%.

## Literatura

[1] Grätzel M., Dye-sensitized solar cells, Journal of Photochemistry and Photobiology C: Photochemistry Reviews 4, 2003, pp. 145–153.
[2] Grätzel M., Solar Energy Conversion by Dye-Sensitized Photovoltaic Cells, Inorganic Chemistry 44, 2005, pp. 6841-6851.

[3] Sharma G. D., Daphnomili D., Gupta K.S.V., Gayathri T., Singh S.P., Angaridis P.A., Kitsopoulos T.N., Tasise D., Coutsolelos A.G., Enhancement of power conversion efficiency of dye-sensitized solar cells by co-sensitization of zinc-porphyrin and thiocyanate-free ruthenium(II)- terpyridine dyes and graphene modified $TiO_2$ photoanode, RSC Advances 3, 2013, pp. 22412-22420.

[4] Mathew S., Yella A., Gao P., Humphry-Baker R., Curchod B.F.E., Ashari-Astani N., Tavernelli I., Rothlisberger U., Nazeeruddin M.K., Grätzel M., Dye-sensitized solar cells with 13% efficiency achieved through the molecular engineering of porphyrin sensitizers, Nature Chemistry 6, 2014, pp. 1-6.

[5] Li Y., Ku S.-H., Chen S.-M., Ali A., AlHemaid F.M.A, Photoelectrochemistry for Red Cabbage Extract as Natural Dye to Develop a Dye-Sensitized Solar Cells, Interational Journal of Electrochemical Science 8, 2013, pp. 1237-1245.

[6] Zdyb A., Krawczyk S., Characterization of adsorption and electronic excited states of quercetin on titanium dioxide nanoparticles, Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy, vol. 157, 2016, pp. 197–203.

[7] Zdyb A., Krawczyk S., Adsorption and electronic states of morin on $TiO_2$ nanoparticles, Chemical Physics, vol. 443, 2014, pp. 61–66.

[8] Kamat P.V., Bedja I., Hotchandani S., Photoinduced charge transfer between carbon and semiconductor clusters. One-electron reduction of $C_{60}$ in colloidal $TiO_2$ semiconductor suspensions, Journal of Physical Chemistry 98, 1994, pp. 9137-9142.

## USING OF SELECTED ORGANIC DYES IN DYE SENSITIZED SOLAR CELLS

**S u m m a r y**

Considering the increasing global demand for energy and the harmful ecological impact of the conventional energy sources, it is obvious that development of clean and renewable energy sources is a necessity. Nowadays, dye sensitized solar cells (DSSC) represent one of the most promising methods for future large-scale conversion sunlight into electricity. The main component of DSSC is the semiconducting layer of $TiO_2$ nanoparticles with adsorbed dye, which is responsible for absorption of the solar radiation incidenting on the surface. Sensitizing dye is adsorbed onto the surface of titanium dioxide layer so as to increase the extent of absorption of solar radiation by irradiated electrode. In the following paper, application of four selected organic dyes (alizarin, catechol, quinizarin and 4-*tert*-butylocatechol) and two techniques of deposition the $TiO_2$ nanoparticles mesoporous layers on conducting glass as electrodes (application from colloidal solution or paste) were studied. The light absorption spectrum was determined for each dye and the efficiency of the cells was measured depending on the type of dye and the deposition method of titanium dioxide conducting layer. Each sensitizer dye was adsorbed on $TiO_2$ surface by dipping in a dye solution for one day. The use of selected components for the cell construction made it possible to achieve the highest efficiencies of 0.272%, which were obtained with electrodes covered by titanium paste and the quinizarin dye. The results of the research presented in the following paper allow to determine the validity of selected dyes and the necessity for further research on the issue of increasing the efficiency of DSSC type cells.

**Keywords:** dye sensitized solar cell, photovoltaic, sensitizer compounds, alizarin, catechol, quinizarin, 4-*tert*-butylocatechol

DOI:10.7862/rb.2016.224

*Przesłano do redakcji: 23.05.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 421-430

**Izabela SKRZYPCZAK** [1]
**Janusz KOGUT** [2]
**Lidia BUDA- OŻÓG** [3]
**Joanna KUJDA** [4]

# ZALECENIA NORMOWE W OCENIE STANU TECHNICZNEGO DROGOWEJ KONSTRUKCJI INŻYNIERSKIEJ NA PRZYKŁADZIE BADAŃ WYBRANYCH CECH FIZYKO-CHEMICZNYCH

Ważnym zagadnieniem mającym decydujący wpływ w ocenie stanu technicznego całej konstrukcji ma jakość materiału konstrukcyjnego, z którego jest on wykonany. Dla żelbetowych wiaduktów drogowych zagrożeniem dla betonu są: dwutlenek węgla, zawarty w atmosferze, chlorki, pochodzące z soli powszechnie stosowanych do odladzania oraz związki siarki pochodzące ze spalin. W wyniku kombinacji tych agresywnych czynników następuje albo zobojętnianie betonu albo skażenie go. Głównym aspektem poruszanym w pracy są różne zalecenia normowe dotyczące zawartości chlorków w betonie konstrukcyjnym oraz próba ich weryfikacji według podejścia probabilistycznego. Celem artykułu jest ocena stanu betonu w elementach wiaduktu w oparciu o wyniki badań laboratoryjnych. Badaniami objęto rdzenie betonowe pobrane z różnych elementów badanego obiektu, które w obserwacjach makroskopowych nie wykazywały uszkodzeń korozyjnych. Wykonano badania fizyko-mechaniczne betonu, określono jego skład oraz zawartości chlorków, siarczanów i zasięg karbonatyzacji. Korzystając ze standardowej procedury stwierdzono przekroczenie wartości progowej chlorków dla spodu konstrukcji. Ryzyko inwestora dla przekroczenia wartości progowej oszacowano na podstawie przyjętych funkcji gęstości na ok. 1%.

**Słowa kluczowe:** mosty drogowe, beton, chlorki

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Izabela Skrzypczak, Politechnika Rzeszowska, Zakład Geodezji i Geotechniki, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651010; izas@prz.edu.pl

[2] Janusz Kogut, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; jkogut@pk.edu.pl

[3] Lidia Buda-Ożóg, Politechnika Rzeszowska, Katedra Konstrukcji Budowlanych, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; lida@prz.edu.pl

[4] Joanna Kujda, Politechnika Rzeszowska, joannakujda@wp.pl

## 1. Wprowadzenie

Od konstrukcji budowlanych wymaga się, aby w przyjętym okresie eksploatacji zapewniona była ich zdolność do użytkowania przy zachowaniu określonych minimalnych cech wytrzymałościowych. Konieczność przedłużenia czasu eksploatacji obiektu wiąże się z potrzebą remontowania lub wzmacniania poszczególnych elementów konstrukcji mostowej. Jest to zadanie trudne i złożone, a przy tym gospodarczo ważne.

W konstrukcjach mostowych zarówno żelbetowych, jak i sprężonych podstawową ochronę strukturalną zbrojenia spełnia beton i razem ze stalą jest głównym materiałem konstrukcyjnym. Beton (także wykonane z niego elementy konstrukcji) uważano przez wiele lat za materiał odporny na korozję. Wzrost agresywności środowiska, praca elementów mostowych w warunkach cyklicznego zamrażania i odmrażania oraz stosowanie odladzających związków soli, a także wiele błędów projektowych i wykonawczych sprawiły, że w ostatnich latach obserwuje się wyraźne zwiększenie korozji betonu w konstrukcjach mostowych. Destrukcyjne oddziaływanie środowiska na beton prowadzi do obniżenia jego właściwości użytkowych i rozpoczyna się zwykle zmianami zaatakowanej powierzchni, a następnie postępuje w głąb danego materiału wybiórczo, drogą najefektywniejszego działania, niszcząc substancje najbardziej na nią podatne.

## 2. Przyczyny korozji betonowych elementów konstrukcyjnych

Do podstawowych przyczyn powodujących stosunkowo szybkie tempo korozji mostów betonowych można zaliczyć narażenie konstrukcji mostowej na bezpośrednie oddziaływanie środowiska podczas eksploatacji, to jest oddziaływanie zmiennych warunków temperaturowych i wilgotnościowych, duże gradienty cyklicznie zmiennych obciążeń, oddziaływanie toksycznych spalin, działanie soli odladzających itp. Destrukcyjne oddziaływanie na mosty może dotyczyć zarówno betonu, jak i stali zbrojeniowej.

Do zewnętrznych czynników wywołujących korozję betonu można zaliczyć fizyczne oddziaływanie środowiska, które powoduje łuszczenie i pękanie, a także reagujące z betonem substancje chemiczne (miękkie wody, kwasy, sole odladzające czy siarczany) wywołujące korozję ługującą lub pęczniejącą. Do wpływów wewnętrznych można zaliczyć działanie mechaniczne spowodowane zmęczeniem, naprężeniami, dochodzi wówczas do pęknięć i zarysowań konstrukcji, a także niewłaściwą jakość składników betonu (cement o nadmiernej zawartości siarczanów, alkaliów, glinianów oraz reaktywne kruszywo) powodującą także pęcznienie, rozsadzanie i łuszczenie betonu. Uszkodzenie mikrostruktury sprzyja wnikaniu czynników agresywnych w głąb elementu konstrukcji, prowadząc do strefowych zmian w składzie chemicznym betonu. Korozja wewnętrzna prowadzi do zmian zachodzących w całym przekroju elementu betonowego – w stwardniałym zaczynie cementowym lub w strefie kontaktowej kruszywo-zaczyn, a powstające pęczniejące produkty reakcji niszczą wewnętrzną mikrostrukturę.

Obserwowane zniszczenie betonu może być w każdym przypadku różne w zależności od jakości betonu, stopnia agresywności środowiska, ukształtowania konstrukcji. Mechanizm działania korozji ługującej związany jest z rozpuszczaniem i wymywaniem wodorotlenku wapniowego, a także innych składników stwardniałego zaczynu cementowego. Prowadzi to do zniszczenia mikrostruktury betonu i wzrostu jego porowatości. Szczelność betonu jest istotnym parametrem zmniejszającym podatność konstrukcji na tę korozję. Objawem tej korozji obserwowanym na powierzchni jest łuszczenie betonu oraz powstawanie wykwitów, tworzących się na powierzchni betonu w wyniku odparowania wody przesiąkającej przez niego i pozostawiającej naloty z wypłukanych soli.

Działanie korozji chlorkowej na elementy betonowe jest wywołane użyciem soli odladzających w okresie zimowym do utrzymania przejezdności mostu. Jeśli beton jest całkowicie nasycony wodą, chlorki przenikają przez otulinę zbrojenia w wyniku dyfuzji. W częściowo zawilgoconym betonie, migracja chlorków może być także wywołana w wyniku absorpcji i podciągania kapilarnego. Z chwilą, kiedy stężenie chlorków rozpuszczonych w cieczy porowej osiągnie wartość krytyczną, następuje uszkodzenie warstewek pasywnych na powierzchni stali i rozpoczyna się korozja, a postęp niszczenia zbrojenia jest w środowiskach chlorkowych bardzo szybki, zaś czas po którym chlorki osiągną powierzchnię zbrojenia jest równoznaczny z okresem użytkowania konstrukcji. Główne mechanizmy niszczenia betonu przez roztwory chlorkowe to reakcja chlorków z wodorotlenkiem wapnia lub fazą C-S-H, w wyniku której tworzą się pęczniejące zasadowe chlorki wapniowe lub magnezowe. Powstawanie soli Friedla ostatnio uznaje się za czynnik korzystny, ze względu na wiązanie jonów chlorkowych i zmniejszanie ich zawartości w fazie ciekłej betonu.

W wyniku oddziaływania dwutlenku węgla z powietrza beton z upływem czasu ulega karbonatyzacji. Dwutlenek węgla wnikając w głąb betonu reaguje przede wszystkim z wodorotlenkiem wapnia, a także z innymi składnikami zaczynu cementowego tworząc kalcyt, wateryt czy aragonit. Krystalizujący w porach węglan wapnia zmniejsza porowatość całkowitą w obszarze skarbonatyzowanym, jednocześnie obniża pH roztworu w porach betonu powodując obniżenie pH i zdolności pasywacyjnych betonu wobec stali zbrojeniowej. Także powstający węglan wapnia reagując z dwu-tlenkiem węgla i wodą tworzy kwaśny węglan wapniowy podlegający procesowi ługowania.

Korozja siarczanowa jest najgroźniejszym typem korozji betonu, a bezpośrednim jej źródłem mogą być spaliny pojazdów silnikowych czy dymy z zakładów przemysłowych lub ciepłowni. Przebieg korozji siarczanowej zależy od stężenia siarczanów oraz od zawartości glinianów w beto-nie. Podczas tego rodzaju korozji powstają, nierozpuszczalne krystaliczne produkty reakcji (ettringit, gips, thaumazyt), które przyłączając wodę zwiększają znacznie swoją objętość i powodują niszczenie mikrostruktury betonu. W elementach żelbetowych następuje niszczenie otuliny zbrojenia (rysy, spękania, złuszczenia) oraz utrata jej zdolności ochronnych [5].

## 3. Obiekt analiz oraz ich metodyka i wyniki końcowe

Naprawa obiektów budowlanych jest to proces złożony, mający na celu całkowite lub częściowe przywrócenie obiektowi stanu wyjściowego lub wymaganego projektem stanu użytkowania. Opracowanie podstaw naukowych i wynikających stąd zaleceń technicznych wymaga kompleksowego, systemowego podejścia. Europejski Komitet Normalizacyjny opracował serię dziewięciu norm „Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji z betonu. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności" [1]. Założeniem tej serii norm jest całościowe ujęcie tematyki napraw i ochrony konstrukcji betonowych. Sformułowane w normie metody i zasady mają w większości charakter jakościowy. W normie PN-EN 1504-9 [1] odnośnie zastosowania Zasady 6 – Odporność na czynniki chemiczne zapisano (punkt A.6.2.1.7), iż obejmuje ona wyroby i systemy, które mogą chronić beton przed działaniem agresywnych czynników chemicznych ze środowisk wy-mienionych w normie PN-EN 206-1 [2], a obowiązujące wymagania techniczne [3] ograniczają zwartość procentową chlorków w betonie w zależności od rodzaju konstrukcji.

Przedmiotem badań jest żelbetowy most drogowy, z lat 50–tych ubiegłego wieku, o ustroju trzyprzęsłowym ciągłym o rozpiętościach teoretycznych przęseł LT = 12,50 + 16,00 + 12,50 = 41,00 m. Szerokość użytkowa wynosi BU = 0,95 + 7,00 + 1,25 m; szerokość całkowita obiektu BC= 9,50 m (rys. 1).



Rys. 1. Widok ogólny analizowanego mostu drogowego

Fig. 1. A view of the analysed bridge

Ustrój nośny stanowi monolityczny żelbetowy ruszt składający się z 4 belek o zmiennej wysokości połączonych ze sobą poprzecznicami i zwieńczonych pły-

tą grubości 11 cm. Obiekt ten został wzmocniony w 1992 r. zespoloną płytą monolityczną gr. 10 cm z dodatkowymi wspornikami. Na-wierzchnię jezdni stanowi beton asfaltowy o średniej grubości 15 cm. Chodniki znajdują się na wspornikach płytowych o wysięgu poza skrajny dźwigar wynoszącym 1.10 m (od dolnej wody) oraz 1.40 m (od górnej wody). Są one monolitycznie połączone z płytą zespoloną i podniesione w stosunku do niej średnio o 0.35 m. Nawierzchnię chodnika stanowi asfalt lany o gr. 3 cm. Podpory mostu to betonowe, zbrojone przyczółki masywne ze skrzydłami wiszącymi żelbetowymi oraz ścienne, trapezowe, pełne filary masywne. Podpory obiektu posadowiono na ławach fundamentowych bezpośrednio na skale. Belki ustroju nośnego mają liczne zacieki a także noszą ślady korozji zbrojenia, oraz znaczne ubytki w betonie w części przęsłowej odsłaniające korodujące pręty zbrojenia głównego. Od spodu dźwigarów występują też liczne kawerny wynikające prawdopodobnie z niskiej jakości robót w trakcie wykonywania obiektu (niedostateczne zagęszczanie mieszanki betonowej w czasie betonowania ustroju nośnego – szczególnie belek żelbetowych). Ponadto zauważono duże pęknięcie (rysę o znacznej rozwartości) dźwigara głównego przedskrajnego. Zarówno spód płyty pomostu, jak i wsporniki podchodnikowe posiadają białe rozległe wykwity spowodowane przeciekami wody z nawierzchni. Zniszczeniu uległy także gzymsy ustroju nośnego mostu. Występują tu liczne ubytki betonu, a w ok. 40 % nastąpił całkowity ubytek otuliny, zaś pozostałość – odkryte zbrojenie, jest skorodowane. Na skutek tej korozji powierzchnie spodu wsporników pokryte są lokalnie rdzawymi plamami o znacznym zasięgu. Stan techniczny podpór jest na tyle zadowalający, że mogą być one wykorzystane przy remoncie mostu. Po ścianach jednego z przyczółków sączy się woda, co może świadczyć o nieszczelnościach w urządzeniu dylatacyjnym oraz nasączeniu wodą gruntu zasypowego przyczółka w wyniku nieszczelnej nawierzchni jezdni na dojazdach do mostu. Na skrzydłach widoczne są rozległe białe wykwity. Na ławach podłożyskowych zaobserwowano znaczne zacieki i zanieczyszczenia, oraz łuszczący się beton. W warunkach laboratoryjnych oznaczono ilości związków chemicznych. Zawartość wodo-rozpuszczalnych chlorków w betonie określono korzystając z zestawu odczynników Aquamerck 11106 firmy Merck. Z rozdrobnionych próbek betonu przygotowano przefiltrowane roztwory wyj-ściowe z użyciem wody destylowanej (por.[4]). Wyniki badań zawartości chlorków (wartości mak-symalne). w odniesieniu do zawartości cementu w betonie oraz granicznych wartości dopuszczalnych według różnych zaleceń normowych podano w tablicy 1. Oznaczona zawartość chlorków w stosunku do masy cementu w próbkach pobranych z elementów betonowych zależy od głębokości pobrania próby i tak na przykład: dla płyty pomostu na głębokości 40 do 60 mm wynosi od 0,080 do 0,140 M%; na głębokości od 20 do 40 mm wynosi od 0,150 do 0,220 M%, a na głębokości 10 do 20 mm wynosi 0,180 do 0,270 M%.

Korozja zbrojenia może się rozpocząć wtedy, gdy stężenie jonów chloru przy powierzchni stali osiągnie wartość krytyczną. Według zaleceń amerykańskich (ACI) krytyczna zawartość chlorków określana jest w zawartości procentowej jonów chloru rozpuszczonych w wodzie w stosunku do masy cementu i nie może przekraczać 0,15% dla betonu sprężonego i 0,20% dla żelbetu [5]. W normie europejskiej [2], zgodnie z zaleceniami RILEM przyjęto całkowitą zawartość chlorków nie przekraczającą 0,40% masy cementu [5]. Dla oceny właściwości ochronnych betonowej otuliny zbrojenia, na podstawie pomiaru zawartości chlorków, można przyjąć dla betonu zbrojonego 0,4 M% zgodnie z zaleceniami RMTiGM [3] oraz 0,40 M% zgodnie z PN-EN 206-1 [2] zawartości chlorków w stosunku do masy cementu, powyżej której, szczególnie w betonie skarbonatyzowanym, istnieją warunki do chlorkowej korozji stali zbrojeniowej. Wartości dopuszczalnych zawartości chlorków w betonie zgodnie z [2, 6] uzależnione są od klasy ekspozycji (dla obiektów mostowych XD3). Zalecane wartości graniczne według normatywów są tylko pozornie takie same, bowiem uwzględniając zasady obliczeń dotyczące zaokrąglania oraz uwzględniając niepewność pomiaru zdefiniowanie ilości cyfr po przecinku wpływa na ocenę zgodności. W przypadku skarbonatyzowanego betonu zbrojonego każda zawartość chlorków, zwłaszcza w strefach cyklicznego nawilżania betonu wodami powierzchniowymi oraz w przypadku pogorszonej szczelności betonu, sprzyja korozji stali zbrojeniowej.

## 4. Weryfikacja probabilistyczna

Praktyka budowlana wskazuje, że procedury oceny zgodności nie zawsze spełniają podstawowe wymagania dotyczące ustalania identyczności i jednoznaczności [7]. Wadami są: nieuwzględnianie niepewności wyniku badania, czy odpowiednie uwzględnianie ryzyka producenta czy ryzyka konsumenta. Kolejne problemy pojawiają się gdy dominującym czynnikiem staje się udział niepewności pomiaru. Zagadnieniem istotnej wagi jest zatem użyteczność wyników pomiarów potrzebna do klasyfikacji materiałów na tle niepewności ich pomiaru - problem podobny do oceny zgodności czy analizy dotyczącej wykorzystania informacji o niepewności w ocenie zgodności [6]. Dobrze zdefiniowane reguły decyzyjne są nieodzowne w celu weryfikacji jakości materiałów i jednoznacznej oceny zgodności.

Minimalne wartości dopuszczalne zalecane według obowiązujących różnych norm i zaleceń znacznie się różnią (por. Tabela 1). Mogą one określać wartości graniczne z jedną lub dwoma znaczącymi cyframi po przecinku (np. w PN-EN 206-1 [2] zalecana wartość to 0,40 M%, a według RMTiGM [3] to 0,4 M%) i nie przewidują możliwości porównania ze specyfikacją. Decyzję o ilości cyfr znaczących podejmuje się na początkowym etapie analiz i badań i wpływa ona na ocenę zgodności. Półprobabilistyczna procedura oceny zgodności zalecana w PN EN 206-1 [2] nie uwzględnia współczynników niepewności wynikających

Tabela 1. Zawartość chlorków w betonie dla wyników badań, na postawie [4]

Table 1. The chloride content of the concrete for test results, based on [4]

| **Miejsce pobrania próbki** | **Głębokość pobrania próbki [mm]** | **Chlorki (wartości maksymalne) w stosunku do masy cementu [M%]** | **Zalecane wartości dopuszczalne według zaleceń normowych** | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| **Płyta** | 00 - 10 | 0,270 | PN-EN 1992 [6] klasa ekspozycji – XD3 Przyjęto zgodnie z [2] - 0,40 M% | PN-EN 206-1 [2] Rodzaj Konstrukcji - żelbetowa 0,40 M% | RMTiGM [3] 0,4 M% | ACI [5] 0,20M% |
| | 10 -20 | 0,180 | | | | |
| | 20 - 40 | 0,220 | | | | |
| | 40 - 60 | 0,140 | | | | |
| **Belka skrajna** | 00 - 10 | 0,280 | | | | |
| | 10 -20 | 0,230 | | | | |
| | 20 - 40 | 0,190 | | | | |
| | 40 - 60 | 0,090 | | | | |
| **Spód gzymsu** | 00 - 10 | 0,080 | | | | |
| | 10 -20 | 0,080 | | | | |
| | 20 - 40 | 0,090 | | | | |
| | 40 - 60 | 0,090 | | | | |
| **Spód płyty** | 00 - 10 | 0,250 | | | | |
| | 10 -20 | 0,400 | | | | |
| | 20 - 40 | 0,190 | | | | |
| | 40 - 60 | 0,160 | | | | |

z pobierania próbek, badania i testowania. W artykule określono prawdopodobieństwo oraz ryzyko przekroczenia wartości progowej dla badanych elementów zgodnie z rozkładem Gamma. Funkcja gęstości prawdopodobieństwa zgodna z rozkładem Gamma została przyjęta z dwóch powodów:

– jest niemożliwe, aby ujemne wartości przyczyniły się do zwiększenia zawartości chlorków,

– o wartościach ekstremalnych decydują zazwyczaj wartości mniejsze niż średnie [6].

Ryzyko przekroczenia wartości progowej określono korzystając ze zdefiniowanych funkcji Gamma w odniesieniu do zebranych danych. Związek pomiędzy funkcją prawdopodobieństwa a wartością progową określono wzorem:

$$P_c = \Phi(T - x_{Cl}) \tag{1}$$

gdzie: $P_c$ - prawdopodobieństwo zgodności, $T$ - granica tolerancji, $x_{Cl}$ - wynik badania.

Określając ryzyko przekroczenia wartości progowej można wykorzystać następującą formułę:

$$R_u = g(x_{Cl} : a,b) \cdot \int_T^{\infty} [\Phi(x_{Cl})] dx_{Cl} \tag{2}$$

gdzie: $a$, $b$ - parametry dla zdefiniowanego rozkładu Gamma.

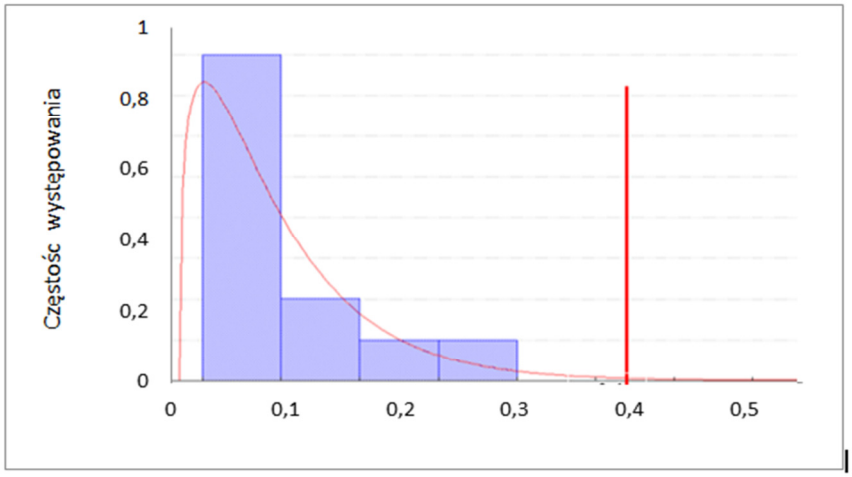
Tabela 2. Prawdopodobieństwo ryzyka dla zawartość chlorków w betonie i wyników badań, na postawie [4]

Table 2. Probability of risk for the chloride content of the concrete for test results, based on [4]

| Miejsce pobrania próbki | Prawdopodobieństwo ryzyka przekroczenia normowej wartości progowej | Wartość progowa zdefiniowana jako kwantyl 0,95 |
|---|---|---|
| **Płyta** | 1 - 0,99 = 0,01 | 0,20 |
| **Belka skrajna** | 1 - 0,99 = 0,01 | 0,24 |
| **Spód gzymsu** | 1 - 0,98 = 0,02 | 0,22 |
| **Spód płyty** | 1 - 0,99 = 0,01 | 0,24 |

Dla określenia prawdopodobieństwa związanego z ryzykiem przekroczenia normowej wartości progowej 0,40 % M oraz wartości granicznej zdefiniowanej jako kwantyl 95% dla zawartości chlorków w betonie przyjęto rozkład Gamma. Jeśli w normie PN-EN 1990 [8] oraz normach PN-EN 1991÷1999 nie podano inaczej, to kiedy dolna (górna) właściwość materiału jest niekorzystna, jej wartość charakterystyczną przyjmuje się na poziomie 0,05 (0,95).

Rozkład Gamma przyjęto na podstawie badań i analiz Hinrichs'a (por. [7]). Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe dopasowanie teoretycznego rozkładu Gamma dla zebranych wszystkich danych pomiarowych.




Rys. 2. Dopasowany rozkład Gamma dla zebranych wyników badań

Fig. 2. The probability density function on the data basis

Analizy przeprowadzono dysponując 12 elementowymi zbiorami danych pomiarowych. Otrzymane prawdopodobieństwa ryzyka przekroczenia normowych wartości progowych dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych

przedstawia tabela 2. Zgodnie z zaleceniami normowymi [1-3,6] dla wartości maksymalnych pokazanych w Tablicy 1 stwierdzono przekroczenie zawartości chlorków tylko dla spodu płyty i głębokości pobierania 10-20 mm. Otrzymane wartości progowe zdefiniowane jako kwantyl 95% są zbliżone do wartości 0,20% M zalecanej w normie ACI [4] dla konstrukcji żelbetowych. Dla tak zdefiniowanej wartości progowej zawartości chlorków zostały przekroczone dla wszystkich elementów konstrukcyjnych oprócz spodu gzymsu. Prawdopodobieństwo ryzyka związanego z przekroczeniem wartości normowej jest zatem zawsze mniejsze niż wartość oszacowana dla kwantylu rzędu 0,95, a więc wartości 5% (Tabela 2).

## 5. Podsumowanie

Przytoczone w pracy zalecenia normowe przewidują procedury oceny zgodności, które są łatwe do zastosowania i identyfikowalne, ale nie są one ani w pełni jednoznaczne, ani metodycznie poprawne. Standardowa procedura pomija oczywiste wpływy takie jak: sposób pobierania próbek, ich przygotowanie czy sposób pomiaru. Niejednokrotne mogą one mieć wpływ na wynik końcowy, który determinuje ocenę materiału konstrukcyjnego.

Standardowa procedura, zdaniem autorów, powinna zawierać reguły zaokrąglania wartości dopuszczalnych. Nie bez znaczenia jest również określenie wartości prawdopodobieństwa zgodności z punktu widzenia ryzyka inwestora/zarządcy oraz przyjęcia odpowiedniego sposobu remontu konstrukcji. Proponowana normowa wartość progowa na poziomie 0,40 % M dla konstrukcji żelbetowych jest wartością dwukrotnie większą od wartości zalecanej w normie amerykańskiej oraz jest wartością większą od wartości obliczonych dla kwantyla 95%. Korzystając ze standardowej procedury stwierdzono przekroczenie wartości progowej tylko dla spodu konstrukcji. Ryzyko zarządcy/inwestora dla przekroczenia wartości progowej oszacowano na podstawie przyjętych funkcji gęstości na ok. 1%. Przy wykorzystaniu do oceny zawartości chlorków w betonie metody probabilistycznej można stwierdzić zagrożenie korozją stali zbrojeniowej dla praktycznie wszystkich elementów konstrukcyjnych oraz zwiększone ryzyko zarządcy/inwestora, zdefiniowane na poziomie 5%.

## Literatura

[1] PN-EN 1504-9 Wyroby i systemy do ochrony i napraw konstrukcji z betonu. Definicje, wymagania, sterowanie jakością i ocena zgodności.

[2] PN-EN 206-1: 2003 Beton Część 1: Wymagania, właściwości, produkcja i zgodność.

[3] Rozporządzenie Ministra Transportu i Gospodarki Morskiej w sprawie warunków technicznych jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, Dz.U. Nr 63 z dn. 03.08.2000.

[4] Wilczak M. i inni, Badania betonu most przez rzekę Krzczonówka w miejscowości Pcim w ciągu drogi krajowej nr 7 km 709+310, Katedra Mostów, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukaszewicza, Rzeszów, maj-czerwiec 2007.

[5] Owsiak Z., Ocena stanu betonu w elementach wiaduktu drogowego, Przegląd Budowlany 5/2007, s. 24-27.

[6] PN EN 1992 -1-1:2008. Eurocod 2. Projektowanie konstrukcji z betonu.

[7] Hinrichs W., Compliance assessment of concrete: a probabilistic approach for the content of chlorides, 9-th International Probabilistic Workshop, Braunschweig 2011, s. 209-220.

[8] PN-EN 1990: 2004. Podstawy projektowania konstrukcji. PKN, Warszawa, 2004.

## THE ASSESSMENT OF THE TECHNICAL CONDITION OF THE BRIDGE BY THE STUDY OF SELECTED FEATURES OF PHYSICO-CHEMICAL STRUCTURAL PROPERTIES RECOMMENDED BY VARIOUS STANDARDS

**S u m m a r y**

There is an important issue that have a decisive impact in the assessment of the technical condition of the entire structure. It is the quality of material, from which the structure is made. As far as the reinforced concrete bridges on roads are concerned the damage of concrete may be provided either by the carbon dioxide from the atmosphere, or the chloride derived mainly from a salt commonly used for deicing, or the sulfur compounds originating from the exhaust of vehicles. As a result of the combination of these aggressive components occurs the neutralization and/or contamination of concrete. The main aspect of this paper are different recommendations specified by standards for the content of chlorides in concrete construction, and an attempt to verify them by probabilistic approach. The aim of this article is to assess the condition of the concrete in the structural elements of the bridge mainly based on the results of laboratory tests. The study includes the concrete cores obtained from the different elements of the object, which in the macroscopic observations did not exhibit damage by the corrosion. This study of the physical and mechanical properties of concrete, which determined its composition and the content of chlorides, sulphates and extent of carbonation has been performed. Using the standard procedure, we received exceeded the value of chloride in to the bottom of the structure. The risk for the investor exceeding the threshold value was estimated on the basis of the adopted density function for approx. 1%. Using to evaluate the chloride content in the concrete probabilistic method, you can identify risk of corrosion of reinforcing steel for virtually all components and an increased risk of the investor, as defined at the level of 5%.

**Keywords:** road bridges, concrete, chlorides

DOI:10.7862/rb.2016.225

*Przesłano do redakcji: 24.05.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 431-438

**Katarzyna STANISZ**[1]
**Stanisław GUMUŁA**[2]

# ENERGETYKA PROSUMENCKA W BUDOWNICTWIE ROZPROSZONYM

Idea energetyki prosumenckiej polega na połączeniu dwóch procesów w jednym obiekcie. Procesu konsumpcji i procesu produkcji energii. Przez konsumpcję energii rozumiemy w tym przypadku wykorzystanie wyprodukowanej energii przez samego producenta i ewentualnie uzupełnienie swoich potrzeb energetycznych pobieraniem energii z krajowego systemu elektroenergetycznego. Przez produkcję energii rozumiemy tutaj wytwarzanie energii w ilości przekraczającej potrzeby własne w celu sprzedaży do krajowego systemu elektroenergetycznego. Na szczególne zainteresowanie producentów zasługują technologie oparte na surowcach odnawialnych, ponieważ cena odkupywania energii pochodzącej z tych źródeł jest znacznie wyższa niż energii pochodzącej z surowców kopalnych.
Przedstawiana praca zawiera charakterystyki technologii wytwarzania energii elektrycznej zarówno te już opracowane i dostępne oraz te które są na etapie badań z perspektywą na wdrożenie w bliżej nieokreślonej przyszłości.

**Słowa kluczowe**: rozproszone źródła energii, produkcja energii elektrycznej, współpraca producenta z krajowym systemem elektroenergetycznym

## 1. Wprowadzenie

Pozyskiwanie energii w skali całego świata opiera się aktualnie głównie na surowcach kopalnych i procesie spalania. Takie technologie pozyskiwania energii niosą ze sobą poważne zagrożenia: wyczerpywanie się kopalnych surowców energetycznych, zmiany klimatyczne, konflikty zbrojne których podłożem będzie dostęp do zasobów surowców energetycznych, ponieważ są bardzo nierównomiernie rozłożone na kuli ziemskiej. Ta sytuacja zmusza społeczność międzynarodową do pozyskiwania energii ze źródeł odnawialnych z pominięciem procesu spalania. Odnawialne źródła energii są z reguły źródłami rozproszonymi, to znaczy ich moc przypadająca na jednostkę powierzchni ziemi jest stosunkowo niewielka. Pociąga to za sobą konieczność rozproszenia również obiektów dokonujących zamiany

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Katarzyna Stanisz, Państwowa Wyższa Szkoła Zawodowa im. S. Pigonia w Krośnie, Zakład Budownictwa, ul. Dmochowskiego 12, 38-400 Krosno; katsta1304@interia.pl
[2] Stanisław Gumuła, AGH , Wydział Energetyki i Paliw, B-3, II p., pok. 202a; stangum@gmail.com

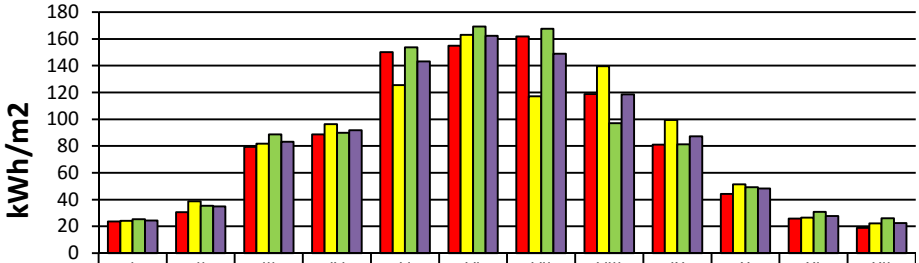
surowców energetycznych na energię użyteczną. W ten sposób zrodziła się koncepcja energetyki prosumenckiej polegającej na tym, że konsumenci energii z natury rzeczy rozproszeni, będą równocześnie producentami energii.

## 2. Technologie opracowane i dostępne

### 2.1. Fotowoltaiczna konwersja promieniowania Słońca

Moc promieniowania Słońca na szczycie atmosfery ziemskiej wynosi około 1390 W/m$^2$. Na skutek odbicia, absorpcji i rozproszenia w zależności od pory dnia i roku, do powierzchni Ziemi dociera średnio tylko około 50% tej mocy. Promieniowanie które dociera do Ziemi pod określonym kątem składa się z promieniowania bezpośredniego, rozproszonego, a także z promieniowania odbitego od obiektu na powierzchni Ziemi. Promieniowanie bezpośrednie i rozproszone nosi nazwę promieniowania całkowitego i jest to wartość zmienna w zależności od pory roku oraz zachmurzenia (rys.1). Moc promieniowania słonecznego w Polsce charakteryzuje się bardzo nierównomiernym rozkładem w cyklu rocznym. Średnio 80% całkowitej energii słonecznej przypada na sześć miesięcy sezonu wiosenno- letniego, od początku kwietnia do końca września. I przy optymalnych warunkach pogodowych (bezchmurne niebo, środek dnia) wartość energii całkowitego promieniowania słonecznego na powierzchni Ziemi wynosi od 900 do 1200 kWh/$m^2 \cdot a$ . Dla systemów solarnych szczególnie niekorzystne są warunki zimowe (rys.1), kiedy to ilość energii słonecznej przypadającej na jednostkę powierzchni jest najmniejsza [1].

Energia promieniowania słońca może być wykorzystywana w procesie konwersji fotowoltaicznej do produkcji energii elektrycznej. Urządzeniem, pozwalającym na bezpośrednią zamianę energii promieniowania słońca na energię elektryczną są fotoogniwa słoneczne (rys.3). Ogniwo fotowoltaiczne zbudowane jest z materiału półprzewodnikowego, w którym pod wpływem absorpcji promieniowania powstaje napięcie na zaciskach ogniwa. Istnieje wiele typów i odmian tych urządzeń, w zależności od stosowanego materiału półprzewodnikowego (krzem, arsenku galu, siarczanu kadmu) oraz struktury tego materiału (monokryształy, polikryształy). Najpowszechniejszym materiałem używanym do produkcji ogniw jest krzem. Sprawność ogniw krzemowych wynosi około 18%. Największe sprawności przetwarzania promieniowania słonecznego na energię elektryczną (do 30%) uzyskuje się z ogniw wytworzonych z arsenu galu, siarczku kadmu czy też fosforku indu ale ogniwa te są znacznie droższe i stosowane przede wszystkim w technice kosmicznej [2]. Trzeba mieć jednak na uwadze, że podawana przez producenta moc jest wartością otrzymywaną w warunkach standardowych. Moc uzyskiwana w warunkach rzeczywistych jest zazwyczaj niższa od nominalnej.




| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2007 | 23,73 | 30,5 | 79,4 | 88,64 | 150,18 | 154,89 | 161,85 | 118,75 | 81 | 44,29 | 25,75 | 18,8 |
| 2008 | 24,07 | 38,77 | 81,72 | 96,45 | 125,61 | 163,15 | 117,23 | 139,74 | 99,56 | 51,48 | 26,63 | 22,3 |
| 2009 | 25,42 | 35,36 | 88,61 | 90 | 153,69 | 169,18 | 167,68 | 97,13 | 81,4 | 49,2 | 30,9 | 26,1 |
| średnia | 24,41 | 34,88 | 83,24 | 91,7 | 143,16 | 162,41 | 148,92 | 118,54 | 87,32 | 48,32 | 27,76 | 22,4 |

Rys.1. Energia promieniowania słonecznego w trzech kolejnych latach w tej samej miejscowości Podkarpacia [badania własne]

Fig.1. Solar energy for three consecutive years in the same place Podkarpacia [own research]

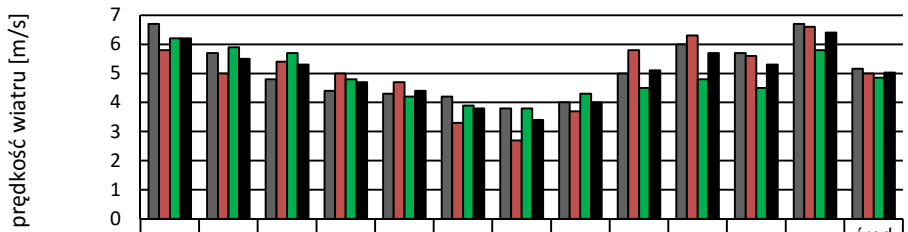
## 2.2 Energia kinetyczna wiatru jako źródło energii elektrycznej

Około 1-2 % energii słonecznej docierającej do Ziemi zamienia się na energię wiatru. Oszacowanie lokalnego potencjału energetycznego wiatru jest podstawowym krokiem przy podejmowaniu wszelkich decyzji związanych z energetyką wiatrową. Komplikacje z oceną zasobów użytecznych wiatru wynikają z jego stochastycznej natury. Znajomość zasobów energii kinetycznej wiatru jest niezbędna do oszacowania rocznej produkcji energii elektrycznej z energii kinetycznej wiatru. Wstępna ocena zasobów energetycznych wiatru, może opierać się na danych meteorologicznych. Jednak stacje meteorologiczne w przeważającej większości są usytuowane w dużych odległościach od siebie, zasłonięte często wysokimi budynkami lub drzewami i brakuje im nowoczesnej aparatury pomiarowej pracującej w sposób ciągły. Wszystko to powoduje, że średnie prędkości wiatru podawane w literaturze dotyczącej klimatu mogą w znacznym stopniu odbiegać od średnich prędkości odpowiadających danej lokalizacji. Ponadto, w klimacie przejściowym jaki znajduje się w Polsce zmiany warunków meteorologicznych pomiędzy kolejnymi latami mogą być znaczące (rys.2). W poszczególnych rejonach Polski średnia prędkość wiatrów może wynosić od 2m/s do nawet 8 m/s. W związku z tym analizowane wyniki pomiarów powinny być oparte na wieloletnich, standardowo trzyletnich, obserwacjach w miejscu przewidywanej inwestycji. Najkorzystniejsza wysokość do wykonywania pomiarów to wysokość przewidywanej osi wirnika EWi n.p.g..

Korzystanie z energii wiatru obecnie staje się ważnym sposobem produkcji energii elektrycznej. W tym celu wykorzystuje się elektrownie wiatrowe.

Główne elementy składowe elektrowni wiatrowej to koło wirnikowe z łopatkami oraz generatora, który wytwarza energię elektryczną z energii kinetycznej

wiatru. Turbina znajduje się na wieży. Elektrownie wiatrowe mogą różnic się mocą, liczbą łopat, czy też osią obrotu (rys.3). Produkcja prądu jest uzależniona od prędkości wiatru. Niektóre elektrownie mogą wytwarzać energię elektryczną już przy prędkości ok. 2 m/s. Większość osiąga moc nominalną przy ok. 8-12 m/s i wyłącza się przy prędkości około 25 m/s. Wówczas to wysoka prędkość wiatru stanowi niebezpieczeństwo dla obiektu. Energia wiatru zależy od trzeciej potęgi prędkości wiatru.




| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | średnia |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 2007 | 6,7 | 5,7 | 4,8 | 4,4 | 4,3 | 4,2 | 3,8 | 4 | 5 | 6 | 5,7 | 6,7 | 5,16 |
| 2008 | 5,8 | 5 | 5,4 | 5 | 4,7 | 3,3 | 2,7 | 3,7 | 5,8 | 6,3 | 5,6 | 6,6 | 4,99 |
| 2009 | 6,2 | 5,9 | 5,7 | 4,8 | 4,2 | 3,9 | 3,8 | 4,3 | 4,5 | 4,8 | 4,5 | 5,8 | 4,85 |
| średnia z 3 lat | 6,2 | 5,5 | 5,3 | 4,7 | 4,4 | 3,8 | 3,4 | 4 | 5,1 | 5,7 | 5,3 | 6,4 | 5,03 |

Rys.2. Energia kinetyczna wiatru w trzech kolejnych latach w tej samej miejscowości Podkarpacia [badania własne]

Fig.2. Kinetic energy of the wind for three consecutive years in the same place Podkarpacia [own research]

Zgodnie z prawem Betz'a maksymalna teoretyczna sprawność zamiany energii wiatru na energię mechaniczną wynosi 59,3%. Sprawność zamiany energii kinetycznej wiatru na energię mechaniczną a następnie na elektryczną nie przekracza 40-50% i w dużym stopniu zależy od rozwiązań konstrukcyjnych, prędkości wiatru oraz lokalizacji siłowni wiatrowych [3].

## 2.3 Energia spadku wód śródlądowych

Woda jest na Ziemi bardzo rozpowszechniona. Występuje głównie w oceanach, które pokrywają 70,8% jej powierzchni, ale także w rzekach, jeziorach i w postaci stałej w lodowcach. Część wody znajduje się również pod powierzchnią ziemi, a także w atmosferze (chmury, para wodna). Obecnie energetyka wodna to przede wszystkim elektrownie o dużej mocy, wykorzystujące energię spadku wód śródlądowych. Urządzeniem przetwarzającym energię wody na energię elektryczną są turbiny wodne. Turbina wodna przetwarza energię mechaniczną wody na ruch obrotowy wirnika, który z kolei napędza prądnicę produkując w ten sposób energię elektryczną. Wykorzystanie w elektrowniach energii wody polega na zredukowaniu w granicach pewnego obszaru (odcinek

strumienia, rzeki, część zatoki) naturalnych strat energii wody i uzyskaniu jej spiętrzenia względem poziomu odpływu.

Ostatnio coraz większą uwagę poświęca się energetycznemu wykorzystaniu niewielkich cieków wodnych przez budowę tak zwanych małych elektrowni wodnych (rys.3). W pierwszej kolejności dotyczy to tych cieków, na których istnieją już urządzenia piętrzące wykorzystywane do innych celów, np. przeciwpowodziowe.



Rys.3. Indywidualne instalacje elektroenergetyczne [4], [5], [6]

Fig.3. Individual power installations [4], [5], [6]

### 2.4. Układy kogeneracyjne

Bardzo popularną i coraz bardziej rozpowszechnioną technologią energetyczną wykorzystywaną w różnej skali mocy, w tym również w gospodarstwach indywidualnych jest kogeneracja, czyli równoczesne wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła. Indywidualny układ kogeneracyjny składa się z dwóch podstawowych maszyn: silnika spalinowego i generatora energii elektrycznej napędzanego tym silnikiem. Sprawność przetwarzania energii chemicznej na pracę mechaniczną jest w silnikach spalinowych na poziomie 30-40%. Pozostała energia zawarta w paliwie czyli 60-70% zamieniana jest na ciepło, które to ciepło można wykorzystać dla celów grzewczych lub technologicznych. Układ kogeneracyjny można zaliczyć do odnawialnych źródeł tylko w przypadku gdy silnik zasilany będzie wyłącznie biopaliwem.

## 3. Technologie na etapie badań

### 3.1. Ogniwa paliwowe

Ogniwo paliwowe jest urządzeniem w którym zachodzi rozbicie w wyniku reakcji chemicznej wodoru (w stanie czystym lub jako mieszanina z innymi gazami) na proton i elektron na anodzie, a następnie na połączeniu substratów reakcji na katodzie. W wyniku tych reakcji powstaje prąd elektryczny i ciepło. Produktem ubocznym jest woda. Paliwem w ogniwach paliwowych jest wodór, który jest jednym z najbardziej rozpowszechnionych w przyrodzie pierwiastków,

jednak nie występuje w przyrodzie w stanie wolnym a jedynie w związkach chemicznych, zatem jest wtórnym nośnikiem energii i musi być wytwarzany z wykorzystaniem pierwotnych źródeł energii, takich jak paliwa kopalne, biomasa, energia słoneczna, energia wiatru i wody lub energia reakcji jądrowych. Elektroliza wodoru zapewnia produkcje wodoru o bardzo dużej czystości, jednak wymaga bardzo dużej ilości energii elektrycznej. W chwili obecnej energetyka wodorowa jest znacznie droższa od energetyki konwencjonalnej. Ogniwa paliwowe doskonale nadają się do kogeneracji, czyli jednoczesnej produkcji energii elektrycznej i ciepła dla budynków mieszkalnych.

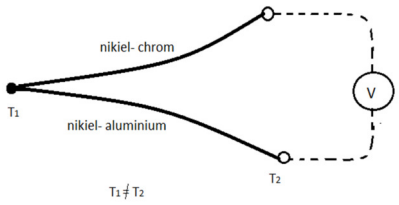
### 3.2. Generatory termoelektryczne

Generatory termoelektryczne wykorzystują odkryte jeszcze w XIX wieku zjawisko termoelektryczne. Zjawisko to polega na powstawaniu napięcia elektrycznego pomiędzy wolnymi końcami przewodów wykonanych z różnych przewodników w sytuacji gdy pozostałe dwa końce tych przewodów są ze sobą połączone i znajdują się w innej temperaturze niż końce wolne. Powstające napięcie jest wprost proporcjonalne do różnicy temperatur panującej pomiędzy końcami wolnymi a połączonymi (rys.4).

Pomimo wielu prób generatory tego typu nie wyszły poza fazę prototypów ale intensywne prace nad ich wdrożeniem do produkcji trwają. Wielką zaletą tego typu generatorów jest możliwość wykorzystania jako surowca energetycznego ciepła odpadowego lub różnicy temperatur która występuje w różnych procesach technologicznych np. kotle centralnego ogrzewania w stosunku do otoczenia kotła. Aktualnie znacznie bardziej rozpowszechnione jest wykorzystanie zjawiska odwrotnego do termoelektrycznego, to znaczy wytworzenie różnicy temperatur pomiędzy końcami przewodów przez przykładanie do wolnych końców przewodników napięcia i powodowanie przepływu prądu. Następstwem tego jest wytworzenie różnicy temperatur pomiędzy zasilanymi napięciem a połączonymi ze sobą końcami przewodów.

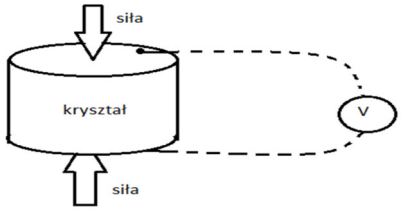
### 3.3. Generatory piezoelektryczne

Generatory piezoelektryczne wykorzystują zjawisko piezoelektryczne polegające na pojawieniu się na przeciwległych powierzchniach kryształów ładunków elektrycznych przeciwnego znaku, gdy kryształ znajduje się pod działaniem sił mechanicznych które go ściskają (rys.5). Generatory tego typu już pracują jednak ich charakterystyki dynamiczne, tzn. zależność pomiędzy przebiegiem czasowym przyłożonych sił a przebiegiem procesu produkcji energii elektrycznej czyni proces sterowania produkcją energii trudnym i kosztownym. Z tego powodu generatory piezoelektryczne nie są rozpowszechnione. Zjawisko piezoelektryczne powszechnie wykorzystywane jest tylko w zapalniczkach, zabawkach, gdzie wytwarzana energia może mieć charakter impulsowy.




Rys.4. Efekt termoelektryczny

Fig.4. Thermoelectric effect



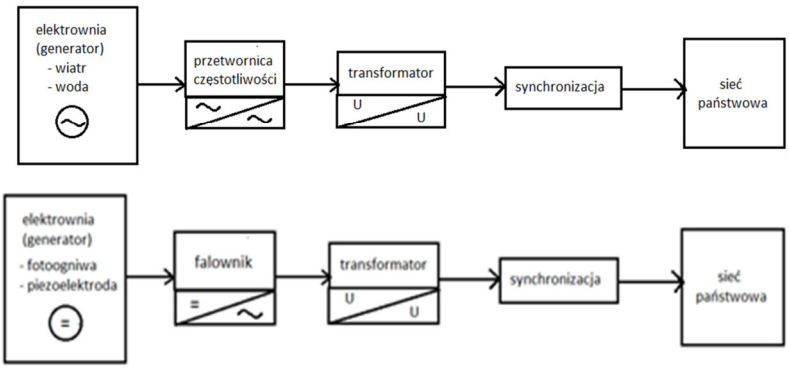

Rys.5. Efekt piezoelektryczny

Fig.5. Piezoelectric effec

## 4. Produkcja energii elektrycznej w przypadku odsprzedaży do krajowego systemu elektroenergetycznego

Krajowy system elektroenergetyczny charakteryzuje się sinusoidalnym przebiegiem wytwarzanych napięć, stałą wartością częstotliwości, stabilizowanym napięciem które może się zmieniać tylko w ściśle ograniczonym przedziale oraz kolejnością faz (w zakładach energetyki zawodowej napięcie wytwarzane jest jako trójfazowe z fazami przesuniętymi o 120 stopni). W tej sytuacji producent energii elektrycznej musi ściśle dopasować parametry wytwarzanych napięć do tych, które panują w krajowym systemie elektroenergetycznym (rys.6). Jeżeli produkuje napięcie stałe , to musi je zamienić na sinusoidalne przy pomocy falownika.

Jeżeli produkuje sinusoidalne, musi dopasować częstotliwość do częstotliwości systemu przy pomocy przetwornicy częstotliwości. Jeżeli wytwarza napięcie o innej wartości niż w systemie musi je transformować przy pomocy transformatorów. Gdy wszystkie parametry wytwórca ma dopasowane do panujących w systemie musi być jeszcze wykonana synchronizacja, to znaczy zgodność fazowa napięć oraz kolejność faz jeśli produkowane napięcia są trójfazowe.




Rys.6. Schematy urządzeń zapewniających dopasowanie indywidualnego producenta energii elektrycznej do krajowego systemu elektroenergetycznego

Fig.6. Circuit devices provide matching individual producer of electricity to the national power system

## 5. Podsumowanie

Do końca 2020 roku nowo oddawane do użytku budynki w krajach UE będą musiały przestrzegać bardzo ścisłych norm w zakresie oszczędności energii. Zgodnie z nowymi wytycznymi budownictwo mieszkaniowe powinno praktycznie nie emitować gazów cieplarnianych, natomiast energia, która będzie im niezbędna, powinna w znaczącej części pochodzić z odnawialnych źródeł. Może to być jeden z czynników motywujący inwestorów indywidualnych do rozpoczęcia produkcji energii elektrycznej na mikro skalę. Inną przesłanką może być potencjalne zmniejszenie kosztów utrzymania domu, a w przypadku sprzedaży energii elektrycznej do sieci, zapewnienie dodatkowego źródła dochodu. Warto przy tym wspomnieć, że wraz z rosnącym globalnym popytem na mikroinstalacje ich ceny będą stale spadać.

## Literatura

[1] Pluta Z.: Podstawy teoretyczne fototermicznej konwersji energii słonecznej, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2000.

[2] Klugmann- Radziemska E.: Fotowoltaika w teorii i praktyce, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2010.

[3] Gumuła S, Knap T, Strzelczyk P, Szczerba Z.: Energetyka wiatrowa, Uczelniane Wydawnictwo Naukowo-Techniczne AGH, Kraków 2006.

[4] http://fachowabudowa.pl/wlasna-elektrownia-wiatrowa/ {dostęp: 31 marca 2013}.

[5] http://gospodarka.dziennik.pl/twoje-finanse/artykuly/490213,domowa-elektrownia-wiatrowa-koszty-instalacji-oszczednosc-na-pradzie.html{dostęp:12.05.2015}.

[6] http://rzgw.gda.pl/cms/fck/uploaded/IPR/Mylof%20na%20stron%C4%99%2007153508.jpg {dostęp:11.03.2015}.

## PROSUMER ENERGY IN SCATTERED BUILDINGS

**S u m m a r y**

The idea of prosumer energy is a combination of two processes in one building. The process of energy consumption and production. In this case, energy consumption means the use of energy produced by its manufacturer, and possibly supplementing its energy needs by using energy from the national grid. Energy production means here producing it in excess of its own needs in order to sell it to the national electricity system. However, it's the technologies based on renewable raw materials that deserve the producers' particular attention, as the price of buying energy from these sources is much higher than the one derived from fossil fuels. Presented work shows the characteristics of electricity generating technologies, both those already developed and available and those that are in the research phase with the prospect of implementation in the unspecified future.

**Keywords:** scattered energy sources, electricity production, producer's cooperation with the national electricity system

DOI:10.7862/rb.2016.226

*Przesłano do redakcji: 10.07.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 439-446

**Aleksander STARAKIEWICZ**[1]
**Lech LICHOŁAI**[2]
**Przemysław MIĄSIK**[3]
**Joanna KRASOŃ**[4]

# ZUŻYCIE NOŚNIKÓW ENERGII W BUDYNKU JEDNORODZINNYM NA CELE OGRZEWANIA CIEPŁEJ WODY UŻYTKOWEJ I POTRZEB BYTOWYCH

W artykule, przedstawiono faktyczne zużycie energii w istniejącym budynku jednorodzinnym w latach 2009 – 2015. Podstawą analizy są dane rzeczywistego zużycia nośników energii elektrycznej, węgla kamiennego, drewna przez instalację c.w.u. i c.o., ciepłej wody użytkowej, energii z kolektorów słonecznych oraz czasu pracy instalacji słonecznej. Przedstawiono również miesięczne zużycie rodzajów energii w systemie ogrzewania i ciepłej wody użytkowej w 2010 r. Omówiono wyposażenie budynku w instalacje wewnętrzne i sprzęt AGD oraz ich wpływ na ilość zużywanych nośników energii.

**Słowa kluczowe:** zużycie opału, zużycie energii elektrycznej, energia z kolektorów słonecznych, zużycie ciepłej i zimnej wody

## 1. Wprowadzenie

Każdy budynek mieszkalny wykonany jest z określonych materiałów i technologii, wyposażony w instalacje i urządzenia niezbędne do zaspokojenia potrzeb bytowych jego mieszkańców. Ilość niezbędnej energii wymaganej do utrzymania komfortu cieplnego budynku oraz zaspokojenia potrzeb bytowych jego mieszkańców zależy od wielu czynników. Są one zależne od izolacyjności obudowy budynku, warunków klimatycznych, rodzaju i jakości instalacji, wyposażenia w sprzęt AGD i jego jakości, przyzwyczajeń i ekologiczną świadomością użytkowników związaną z koniecznością oszczędzania energii. Budynek w czasie swojego użytkowania spełnia określone funkcje, co wymaga dostarczenia odpo-

[1] Aleksander Starakiewicz, Politechnika Rzeszowska, Zakład Budownictwa Ogólnego, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651428; olekstar@prz.edu.pl
[2] Lech Lichołai, Politechnika Rzeszowska; tel. 178651327; Lech.Licholai@prz.edu.pl
[3] Przemysław Miąsik, Politechnika Rzeszowska; tel. 178651702; pmiasik@prz.edu.pl
[4] Joanna Krasoń, Politechnika Rzeszowska; tel. 178651728; jkras@prz.edu.pl

wiedniej ilości energii. Może pochodzić z różnych źródeł: konwencjonalnych (węgiel, drewno, gaz, olej opałowy, energia elektryczna) i odnawialnych (słońce, wiatr, woda, grunt, geotermia). W budynkach mieszkalnych energia wykorzystywana jest na potrzeby ogrzewania i wentylacji, przygotowania ciepłej wody użytkowej, chłodzenia, oświetlenia oraz pracy sprzętu AGD. Zależnie od wieku budynku i jego wyposażenia, może on wykorzystywać energię konwencjonalną, konwencjonalną i odnawialną lub tylko odnawialną. Wraz z rozwojem „technologii instalacyjnych" coraz częściej sięgamy po OZE (odnawialne źródła energii) oraz energooszczędne rozwiązania możliwe do zastosowania w budynku. Efektem takich działań jest zmniejszenie całkowitego zużycia energii w budynku, a przede wszystkim tej pochodzącej z konwencjonalnych źródeł.

Szacowanie zużywanej energii może odbywać się zarówno na podstawie obliczeń teoretycznych, ale i pomiarów faktycznego zużycia energii. Stąd też zasadne jest przedstawienie spojrzenia na potrzeby energetyczne w analizowanym budynku mieszkalnym, zarejestrowane na przestrzeni ostatnich kilku lat. Wybrane fragmenty tego zagadnienia były już poruszane na poprzednich Konferencjach Solina 2008 i 2010 [1, 2]. Zagadnienie ograniczania zużycia energii w budynkach jest ciągle aktualne, realizowane jest poprzez akty prawne dotyczące izolacyjności cieplnej budynków (warunki techniczne – WT 2015, [3]) ale również wynika z ochrony środowiska naturalnego człowieka (zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych, wykorzystywanie odnawialnych źródeł energii - dyrektywy UE, [4, 5].

## 2. Obliczanie zużycia energii elektrycznej w budynku

Do obliczania zużycia energii elektrycznej w budynku niezbędnej do utrzymania w ruchu instalacyjnych urządzeń technologicznych oraz na potrzeby bytowe (wewnętrzne zyski ciepła) posłużono się zmodyfikowanymi algorytmami przedstawionymi poniżej.

Miesięczne zużycie energii do przygotowania posiłków oblicza się ze wzoru [6]:

$$Q_{ic}(m) = 0{,}001 * \Phi_c * t_M \text{ [kWh]} \quad (1)$$

gdzie: $\Phi_c$ – uśredniony strumień cieplny od gotowania posiłków odniesiony do jednego mieszkania w [W];
$t_M$ – liczba godzin w miesiącu;

Miesięczne zużycie energii do zasilania elektrycznych urządzeń oświetleniowych oblicza się ze wzoru [6]:

$$Q_{ios}(m) = 0{,}001 * \Phi_{os} * t_M \text{ [kWh]} \quad (2)$$

gdzie: $\Phi_{os}$ – uśredniony strumień cieplny od elektrycznych urządzeń oświetleniowych odniesiony do jednego mieszkania w [W];

Zużycie energii do zasilania urządzeń elektrycznych oblicza się ze wzoru [6]:

$$Q_{iel}(m) = 0{,}001 * \Phi_{el} * t_M \ [kWh] \quad (3)$$

gdzie: $\Phi_{el}$ – uśredniony strumień cieplny od urządzeń elektrycznych odniesiony do jednego mieszkania w [W];

Wewnętrzne zyski ciepła w budynku oblicza się ze wzoru [7]:

$$Q_{int} = 0{,}001 * q_{int} * A_f * t_M \ [kWh] \quad (4)$$

gdzie: $q_{int}$ - obciążenie cieplne pomieszczeń wewnętrznymi zyskami ciepła, [W/m$^2$];
$A_f$ - powierzchnia pomieszczeń o regulowanej temperaturze powietrza (powierzchnia ogrzewana lub chłodzona), [m$^2$];

W tabeli 1 przedstawiono obliczenia szczegółowe, rocznego zużycia energii elektrycznej dla różnych odbiorników. Wykonano je w oparciu o nieobowiązującą już normę [6], ponieważ tylko w niej są podane zredukowane strumienie ciepła dla poszczególnych odbiorników. Obliczenia przedstawiono dla 2006 roku (maksymalne zużycie energii w historii budynku) oraz dla 2015 r (minimalne zużycie). Uzyskane wyniki wewnętrznych zysków ciepła wg [6] porównano z tymi, obliczonymi wg obowiązującej metodologii [7].

Tabela 1. Roczne obliczeniowe zużycia energii na potrzeby bytowe oraz wewnętrzne zyski ciepła
Table 1. Annual calculation of energy consumption for household needs and internal heat gains

| Lp. | Odbiornik energii elektrycznej lub źródło energii | 2006 | | 2015 | | Wewnętrz. zyski ciepła wg [7] |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Uśredniony strumień ciepła [6] | Roczne zużycie energii | Uśredniony strumień ciepła [6] | Roczne zużycie energii | |
| | - | [W] | [kWh] | [W] | [kWh] | [kWh] |
| 1. | Kuchnia elektr. | 2*110 | 1927,2 | 100 | 876,0 | Pow. ogrzewalna $A_f$=109,82 m$^2$; obciążenie zyskami ciepła $q_{int}$ = 6,8 W/m$^2$; |
| 2. | Oświetlenie | 60 | 525,6 | 30 | 262,8 | |
| 3. | Lodówka | 40 | 350,4 | 10 | 87,6 | |
| 4. | Zamrażarka | 102 | 893,5 | 22,5 | 197,1 | |
| 5. | Pralka | 25 | 219,0 | 19,5 | 170,8 | |
| 6. | Telewizor | 2*35 | 613,2 | 20 | 175,2 | |
| 7. | Czajnik elektr. | 20 | 175,2 | 20 | 175,2 | |
| 8. | Komputer | 25 | 219,0 | 20 | 175,2 | |
| 9. | Zmywarka[2)] | - | - | 20 | 44,2 | |
| 10. | Pozostałe | 27,5 | 240,9 | 16,2 | 141,9 | |
| 11. | **suma roczna** | **-** | **5164,0** | **-** | **2306,0** | |
| 12. | Mieszkańcy | 6*65 | 3416,4 | 3*65 | 1708,4 | |
| 13. | Od c.w.u. | 6*15+25 | 1007,4 | 3*15+25 | 613,2 | |
| 14. | **suma (12+13)** | - | **4423,8** | - | **2314,6** | |
| 15. | **Zyski wew. (11+14)** | **-** | **9587,8** | **-** | **4627,4** | **6541,8** |

## 3. Opis konstrukcji budynku oraz systemów ogrzewania i przygotowania ciepłej wody użytkowej

Analizowany obiekt to budynek jednorodzinny, wolnostojący, całkowicie podpiwniczony, dwukondygnacyjny (parter i piętro), z poddaszem (strychem) nieogrzewanym, przykryty dachem czterospadowym. Budynek jest zamieszkiwany przez czteroosobową rodzinę dwupokoleniową, wcześniej przez sześcioosobową trzypokoleniową. Zmienna liczba mieszkańców budynku została opisana pod tabelą nr 4. W nieogrzewanym podpiwniczeniu znajduje się garaż, piwnica, kotłownia, spiżarnia, klatka schodowa i schowek (skład opału). Na parterze znajdują się pomieszczenia do wspólnego użytkowania przez rodzinę: ganek, hol, klatka schodowa, kuchnia, dwa pokoje i łazienka ogólna. Na piętrze rozmieszczenie pomieszczeń jest identyczne: trzy pokoje, łazienka, hol i klatka schodowa. Ściany zewnętrzne wykonane są w konstrukcji dwuwarstwowej, gdzie warstwę konstrukcyjną stanowi mur z cegły ceramicznej pełnej o grubości 1i1/2 cegły (40 cm), a warstwę izolacji termicznej styropian o grubości 10 cm w technologii lekkiej mokrej z akrylowym tynkiem cienkowarstwowym. Przeprowadzono również docieplenie stropu nad piwnicą (styropian grubości 5 cm przyklejono do sufitu w piwnicy) oraz stropu nad piętrem (styropian grubości 10-15 cm rozłożono na stropie poddasza). W latach 1998-2002 wymienione zostały wszystkie okna i drzwi balkonowe. Wykonano je z profili drewnianych warstwowo klejonych ($U_f$ = 1,45 W/m$^2$K) z oszkleniem niskoemisyjnym jednokomorowym ($U_g$ = 1,1 W/m$^2$K). Na klatce schodowej wymiany okien dokonano w 2010 roku, profile sześciokomorowe z PVC ($U_f$ = 1,2 W/m$^2$K) z oszkleniem niskoemisyjnym dwukomorowym ($U_g$ = 0,6 W/m$^2$K). System grzewczy w budynku stanowi instalacja centralnego ogrzewania, w której źródłem ciepła jest stalowy kocioł centralnego ogrzewania z tzw. górnym spalaniem paliwa stałego o sprawności nominalnej 82%, przeznaczony do spalania koksu, węgla kamiennego, miału lub drewna. Kocioł c.o. jest konwencjonalnym źródłem ciepła dla instalacji centralnego ogrzewania i instalacji przygotowania ciepłej wody użytkowej. Elementami grzejnymi w całym budynku stanowią członowe grzejniki żeliwne wyposażone w zawory termostatyczne, a w łazienkach grzejniki drabinkowe. Instalacja grzewcza wyposażona jest w pompę obiegową zsynchronizowaną z pracą kotła c.o. Przewody rozprowadzające czynnik grzewczy są zaizolowane (wełna szklana, owijka, gips) i poprowadzone pod sufitem w pomieszczeniach piwnicy. Instalacja ciepłej wody użytkowej zasilana jest z dwóch źródeł ciepła, kolektorów słonecznych oraz kotła c.o. W rozważanym budynku jednorodzinnym ciepła woda użytkowa (c.w.u.) przygotowywana jest centralnie i gromadzona w zasobniku biwalentnym o pojemności 300 litrów oraz 70 litrowej termie elektrycznej. Zasobnik posiada dodatkową grzałką oraz dwie wężownice, gdzie dolna zasilana jest z instalacji słonecznej a górna (w razie potrzeby) z instalacji c.o. Terma wykorzystywana jest, jako zasobnik rezerwowy. Instalacja c.w.u. wyposażona jest w system cyrkulacyjny, który służy również do przerzucania c.w.u. z zasobnika do termy. Instalacja jest tak zaprojektowana, aby możliwe było pobieranie c.w.u. z zasobnika lub termy. Instalacja słoneczna składa się z dwóch kolektorów o łącznej, czynnej powierzchni absorbera 4,70 m$^2$. Kolektory skierowane są na południe i ustawione pod kątem 55º do poziomu [2].

## 4. Wyniki badań zużycia energii w budynku na podstawie pomiarów rzeczywistych

W niniejszym rozdziale przedstawiono wyniki zużycia energii w budynku jednorodzinnym opracowane na podstawie pomiarów przeprowadzonych od 1-go stycznia 2009 r. do końca grudnia 2015 r. Zużycie energii elektrycznej, opału, energii pozyskanej z kolektorów słonecznych oraz łącznej ilości energii wykorzystanej przez analizowany budynek zestawiono w tabelach poniżej. Opał stosowany w budynku to węgiel kamienny oraz drewno. Dane wyjściowe to ilość zużytego opału w kilogramach. Zarejestrowane ilości paliwa przeliczono na wartość energii w kWh, przyjmując kaloryczność w zależności od roku zakupu: dla węgla kamiennego 25,0 – 30,0 MJ/kg = 6,94-8,33 kWh/kg, dla drewna 15,25 MJ/kg = 4,24 kWh/kg. Średnia temperatura c.w.u. w zaworze czerpalnym wynosiła 45ºC a wody zimnej 10ºC, stąd przy obliczeniu energii $\Delta t$=35ºC.

Tabela 2. Miesięczne zużycie energii w systemie ogrzewania i ciepłej wody użytkowej w 2010 r.
Table 2. Monthly energy consumption of the heating system and hot water in 2010

| Miesiąc | Energia elektryczna | | Energia konwencjonalna | | Energia z kolektorów słonecznych | Łączna ilość zużywanej energii w budynku | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Instalacja c.o. (pompa) | Instalac. kol. słon. (pompa) | Węgiel kamienny | Drewno | | | |
| | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [%] |
| I | 12,1 | 0,45 | 7154,2 | 571,9 | 52,5 | 7791,2 | 21,3 |
| II | 8,7 | 1,86 | 4852,1 | 610,0 | 241,0 | 5713,7 | 15,6 |
| III | 11,2 | 3,39 | 3364,6 | 724,4 | 559,0 | 4662,6 | 12,7 |
| IV | 4,1 | 3,93 | 1636,3 | 533,8 | 641,0 | 2819,1 | 7,7 |
| V | 3,3 | 3,93 | 0,0 | 190,6 | 547,0 | 744,8 | 2,0 |
| VI | 1,0 | 4,62 | 0,0 | 122,8 | 641,0 | 769,4 | 2,1 |
| VII | 0,9 | 1,68 | 0,0 | 114,4 | 235,0 | 352,0 | 1,0 |
| VIII | 1,2 | 1,98 | 0,0 | 46,6 | 390,0 | 439,8 | 1,2 |
| IX | 2,9 | 1,44 | 786,3 | 118,6 | 235,0 | 1144,2 | 3,1 |
| X | 1,1 | 0,63 | 2847,5 | 144,0 | 81,0 | 3074,2 | 8,4 |
| XI | 7,7 | 0,42 | 2578,3 | 508,3 | 59,0 | 3153,7 | 8,6 |
| XII | 10,7 | 0,18 | 5440,0 | 499,9 | 25,0 | 5975,8 | 16,3 |
| średnia | 5,4 | 2,04 | 2388,5 | 348,6 | 308,9 | 3053,4 | 8,3 |
| **suma** | **64,9** | **24,51** | **28659,2** | **4185,3** | **3706,5** | **36640,4** | 100,0 |
| Udział | 0,18% | 0,07% | 78,22% | 11,42% | 10,12% | 100% | |

Całkowite zużycie energii z węgla kamiennego i drewna na potrzeby ogrzewania, energii do przygotowania ciepłej wody użytkowej pochodzącej z kolektorów słonecznych oraz energii elektrycznej zużywanej przez oświetlenie, system ogrzewczy i przygotowania ciepłej wody użytkowej oraz urządzenia elektryczne (zamrażarka, lodówka, kuchnia, czajnik, komputer, itd.) w kolejnych miesiącach roku oraz kolejnych latach, przedstawiono w tabelach 2 i 3.

Tabela 3. Zużycie energii w systemie ogrzewania i ciepłej wody użytkowej w latach 2009-2015
Table 3. Consumption of energy in the heating system and hot water in 2009-2015

| Rok | Energia elektryczna | | Energia konwencjonalna | | | Energia z kolektorów słonecznych | Łączna ilość energii |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | Instalacja c.o. | Instalacja kolekt. słonecz. | Węgiel kamienny | Drewno | Suma (4+5) | | |
| | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [kWh] | [kWh] |
| 2009 | 107,9 | 24,09 | 25868,1 | 4892,7 | 30760,8 | 4610,0*) | 35502,7 |
| 2010 | 64,9 | 24,51 | 28659,2 | 4185,3 | 32844,5 | 3706,5*) | 36640,4 |
| 2011 | 95,9 | 9,06 | 24220,0 | 7396,3 | 31616,3 | 1756,0 | 33477,3 |
| 2012 | 128,0 | 10,98 | 23183,9 | 8556,9 | 31740,8 | 1536,0 | 33415,8 |
| 2013 | 108,0 | 8,48 | 24775,0 | 3689,7 | 28464,7 | 1136,0 | 29717,2 |
| 2014 | 97,2 | 7,92 | 20846,7 | 3435,5 | 24282,2 | 1033,0 | 25420,3 |
| 2015 | 128,7 | 8,10 | 21991,7 | 3071,2 | 25062,9 | 1035,0 | 26234,7 |
| Średnia | 104,4 | 13,30 | 24220,6 | 5032,5 | 29253,1 | 2116,1 | 31486,9 |
| Śr. udział | 0,33% | 0,04% | 76,92% | 15,98% | 92,91% | 6,72% | 100% |

Tabela 4. Zużycie rodzajów energii i wody w budynku w latach 2009-2015
Table 4. Consumption types of energy and water in the building in 2009-2015

| Rok | Energia elektr. całego budynku | Węgiel kamienny | | | Zużycie drewna | Energia słoneczna | Ciepła woda | | Zużycie zimnej wody |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | Zużycie | Wartość opałowa | Energia | | Kolekt. ciepłej wody | Zużycie 4) | Energia Δt=35ºC | |
| - | [kWh] | [kg] | [MJ/kg] | [kWh] | [kg] | [kWh] | [$m^3$] | [kWh] | [$m^3$] |
| 2009 | 3469 | 3725 | 25,0 | 25868,1 | 1155,0 | 4610,0 | 106,4 | 4334,3 | 167,5 |
| 2010 | 3057 | 4046 | 25,5 | 28659,2 | 988,0 | 3706,5 | 83,7 | 3409,6 | 132,3 |
| 2011 | 3007 | 3114 | 28,0 | 24220,0 | 1746,0 | 1756,0 | 86,3 | 3515,5 | 148,2 |
| 2012 | 2528[5)] | 2878 | 29,0 | 23183,9 | 2020,0 | 1536,0 | 82,9 | 3377,0 | 158,2 |
| 2013 | 2454[3)] | 2973 | 30,0 | 24775,0 | 871,0 | 1136,0 | 81,6 | 3324,1 | 141,4 |
| 2014 | 2527 | 2544 | 29,5 | 20846,7 | 811,0 | 1033,0 | 77,8 | 3169,3 | 154,0 |
| 2015 | 2306[1,2)] | 2730 | 29,0 | 21991,7 | 725,0 | 1035,0 | 61,4 | 2501,2 | 118,6[2)] |
| Średnia | 2764 | 3144 | 28,0 | 24220,6 | 1188,0 | 2116,1 | 82,9 | 3375,9 | 145,7 |

*) Eksploatacja instalacji słonecznej z poszukiwaniem optymalnych parametrów pracy, (długiego czasu pracy instalacji w ciągu dnia – kilka godzin pracy na tzw. jałowym biegu);
1) – od 1.06.2015 r. w całym budynku występuje oświetlenie LED;
2) – od 3.01.2015 r. nowa energooszczędna pralka a od 1.10.2015 r. zainstalowano zmywarkę do naczyń.
3) – od 15.09.2013 r. zainstalowano kuchnię indukcyjną w miejsce gazowo-elektrycznej
4) – budynek zamieszkuje: 2009 r. - 5 osób; 2010-2014 r. - 4 osoby; 2015 r.- 3 osoby;
5) – od 1.01.2012 r. w całym budynku występuje oświetlenie energooszczędne.

## 5. Analiza wyników

Roczne zużycie energii końcowej w analizowanym budynku, na potrzeby ogrzewania i wentylacji oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej w okresie siedmiu lat (2009 - 2015) kształtuje się w przedziale 25420,3 – 36640,4 kWh, przy średniej wartości z tego okresu 31486,9 kWh. Analizując wyniki zużycia tej energii, przedstawione w tabeli 4, należy stwierdzić, że ilość zużywanej energii w budynku w ciągu danego roku zależała od lokalnych warunków klimatycznych (temperatura zewnętrzna, wiatr, promieniowanie słoneczne). Dwie kolejne mroźne zimy 2009 i 2010 roku spowodowały największe zużycie energii końcowej w budynku, natomiast dwie ostatnie łagodne zimy 2014 i 2015 roku dały najmniejsze zużycie energii. Odchylenie rocznego zużycia energii od wartości średniej wyniosło +16,4% i -19,3% a różnica bezwzględna to 35,7%.

Analizując miesięczne zużycia energii końcowej na potrzeby ogrzewania i wentylacji oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej w 2010 roku należy stwierdzić, że styczeń jest miesiącem o największym jej zużyciu (21,3%). Kolejne miesiące to grudzień (16,3%), luty (15,6%), marzec (12,7%) itd. – tabela 1. Dwa zimowe miesiące styczeń i grudzień dają łączne zużycie energii na poziomie (37,8%), a cztery najzimniejsze miesiące, grudzień – marzec, kształtują to zużycie na poziomie (65,9%). Rozkład procentowego miesięcznego zużycia energii w pozostałych latach ma bardzo zbliżoną charakterystykę, różnice występują natomiast w ilości zużywanej energii.

Największe zużycie energii elektrycznej w historii budynku odnotowano w 2004 roku (9043 kWh) [1], gdy ciepła woda użytkowa podgrzewana była w dwóch termach elektrycznych, gdzie na ten cel zużywano 4633 kWh (51,2%), a na pozostałe potrzeby bytowe 4410 kWh (48,8%).

Największe zużycie energii elektrycznej na potrzeby bytowe (5163 kWh) zanotowano w roku 2006, a od którego jej zużycie systematycznie spada. W 2009 roku zużycie tej energii obniżyło się do 3469 kWh (spadek o 32,8%) a w 2015 roku do 2306 kWh (spadek o 55,3%). Na obniżanie zużycia energii miały wpływ sukcesywnie realizowane następujące przedsięwzięcia: wymiana 18-letniej zamrażarki „Mors" na energooszczędną klasy A+, wprowadzenie oświetlenia energooszczędnego, wymiana kuchni elektryczno-gazowej na indukcyjną, wymiana oświetlenia energooszczędnego na LED-owe, wymiana lodówki i pralki na energooszczędne klasy A++, wymiana telewizora na LCD, zakup zmywarki do naczyń.

Wyraźnie widzimy jak ważną rolę w zużyciu energii elektrycznej na potrzeby bytowe odgrywa energooszczędny sprzętu AGD i jego klasa, co szczegółowo przedstawiono w tabeli 1. Sumując zużycie energii na potrzeby bytowe, zyski ciepła od mieszkańców i zyski od ciepłej wody użytkowej, otrzymujemy wewnętrzne zyski ciepła w budynku. Obliczane wg metodologii wewnętrzne zyski ciepła znacznie różnią się od tych z 2006 i 2015 roku. Starszej generacji sprzęt AGD generuje większe zyski ciepła w budynku o 46,6%, względem tych

obliczanych wg metodologii [7], natomiast energooszczędny sprzęt AGD znacznie je ogranicza (mniejsze o 29,3%).

## Literatura

[1] Starakiewicz A.: Badania zużycia energii na potrzeby bytowe w budynku mieszkalnym, ZN PRz nr 252, Budownictwo i Inżynieria Środow. Nr 47, 2008, s. 477-481.

[2] Starakiewicz A.: Eksploatacja instalacji c.w.u. z kolektorami słonecznymi w budynku mieszkalnym, ZN PRz nr 271, Budow. i Inżyn. Środ. nr 57, 4/2010, s. 509-513.

[3] Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 17 lipca 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury ws. warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz. U. z 18 września 2015 r., poz. 1422.

[4] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. ws. charakterystyki energetycznej budynków, Dz. Urz. UE L 153 z 18.06.2010, s. 13.

[5] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/UE z dnia 23 kwietnia 2009 r. ws. promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca i w następstwie uchylająca dyrektywy 2001/77/WE oraz 2003/30/WE, Dz. Urz. UE L 140 z 5.06.2009, s. 16.

[6] PN-B-02025:2001 „Obliczanie sezonowego zapotrzebowana na ciepło do ogrzewania budynków mieszkalnych i zamieszkania zbiorowego".

[7] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energet., Dz. U. z 18 marca 2015 r., poz. 376.

## CONSUMPTION ENERGY CARRIERS IN THE RESIDENTIAL BUILDING FOR HEATING, HOT WATER AND LIVING NEEDS

**S u m m a r y**

In an article for an existing single-family building shows the actual energy consumption in the years 2009–2015. The analysis is based on actual consumption data carriers of electricity, coal, wood, hot and cold water, the energy from the solar collectors and the time of the installation. It also presents monthly energy consumption of the heating system and hot water in 2010. Discussed furnishing internal installations and appliances and their impact on the amount of consumed energy.

**Keywords:** fuel consumption, electricity consumption, energy from solar collectors, the consumption of hot and cold water

DOI:10.7862/rb.2016.227

*Przesłano do redakcji: 14.09.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 447-460

**Milena STETTNER**[1]

# REWITALIZACJA ZASOBÓW MIESZKANIOWYCH W MIASTACH DO 10 TYS. MIESZKAŃCÓW SZANSĄ NA ROZWÓJ MAŁYCH MIAST

Współczesne małe miasta mają wiele problemów urbanistyczno-społecznych. Zachwiana równowaga demograficzna, brak potencjału ekonomicznego, degradacja odgórnych obszarów w mieście, wyludnianie i pustoszenie śródmieść to główne aspekty, na które autorka zwraca uwagę w swoim artykule. Jak powstrzymać niszczący proces przestrzenny i społeczny oraz doprowadzić do zrównoważonego rozwoju? Rewitalizacja jako działanie kompleksowe może być dobrym rozwiązaniem. W artykule przedstawiono badania wszystkich małych miast do 10 tys. mieszkańców (54) w województwie dolnośląskim pod względem zmian demograficznych i ekonomicznych (liczba ludność w podziale na grupy ekonomiczne, saldo migracji i przyrost naturalny) oraz w wyniku delimitacji wybrano 9 (Głuszyca, Lądek-Zdrój, Lubawka, Lwówek Śląski, Pieszyce, Polanica-Zdrój, Stronie Śląskie, Szklarska Poręba, Ziębice) w najgorszej kondycji społeczno-ekonomicznej i przebadano je pod kątem stanu zasobów mieszkaniowych (dostęp do sieci wodociągowej, kanalizacyjnej i gazowej, liczba pustostanów i powierzchnia na 1 mieszkańca). Celem badania było ukazanie problemu degradacji centralnych obszarów w małych miastach do 10 tys. mieszkańców i próba zdefiniowania wniosków dla władz jednostek samorządu terytorialnego, mających na celu zastosowanie np. Europejskiego Programu Rozwoju Obszarów Wiejskich, jako dobrej praktyki. Niewątpliwie dużym problemem w procesach naprawczych centralnych obszarów w mieście jest zróżnicowanie zabudowy pod względem struktury własności, jednak przez wzgląd na większość w zasobie gminnym, można zastosować naprawcze programy unijne.

**Słowa kluczowe:** modernizacja, Europejski Program Rozwoju Obszarów Wiejskich, śródmieście, równowaga demograficzna, instalacje techniczno-sanitarne

## 1. Wprowadzenie

"Ujemny przyrost naturalny, migracje i dość duża działalność deweloperów, powoduje narastający kłopot rozlewania się miasta i niszczenia jego „serca" [1]. Wnioski kończące badania znaczenia odnowy małych miast dla społeczności lokalnej skłoniły mnie do dalszych badań dotyczących zasobów mieszkaniowych

[1] Milena Stettner, Politechnika Wrocławska, Katedra Urbanistyki i Procesów Osadniczych, ul. Prusa 53-55, 50-377 Wrocław, 513166801, milena.stettner@pwr.edu.pl, milena.stettner@gmail.com

i jakości życia w niemal najmniejszych jednostkach miejskich, czyli miastach do 10 tys. mieszkańców. Zmiany urbanistyczne, demograficzne i ustrojowe, doprowadzają do ciągłego wyludniania śródmieść i marginalizacji najbiedniejszej grupy mieszkańców. Już w Nowej Karcie Ateńskiej zwrócono uwagę na istotny problem segregacji społeczeństwa w miastach: „Obszary zamieszkałe przez bogatych mieszkańców wykazują tendencję do tworzenia zamkniętych enklaw, podczas gdy ubodzy mieszkańcy pozostają bezdomni lub żyją w upadających śródmieściach miast lub na przedmieściach."[2] [2]. Bardzo ważne w tym aspekcie jest doprowadzenie do wyrównania standardów zabudowy mieszkaniowej wielorodzinnej w śródmieściach małych miast z jakością nowoczesnych lokali mieszkalnych, co może skutkować zahamowaniem niszczenia wartościowych kulturowo i społecznie centralnych obszarów miasta. Rewitalizacja, jako działanie interdyscyplinarne, łączące w sobie procesy technologiczne (poprawa instalacji techniczno-sanitarnych), społeczne (poprawa jakości życia) i przestrzenne (poprawa urbanistyki miasta), może być szansą w rozwoju małego miasta. Słowa A. Rybka, B. Walicka-Góral: „(…) stare zespoły mieszkaniowe stanowią często wartościowy dorobek kultury, pozwalają rozpoznać nasze miasta, pozostają nierzadko jedynym ich identyfikatorem."[3], podkreślają istotę centralnych obszarów miasteczka [3].

## 2. Podstawy teoretyczne

### 2.1. Istota rewitalizacji i modernizacji zasobów mieszkaniowych

Rewitalizacja, wśród wielu procesów odnowy, odbudowy obszarów zdegradowanych, jest jednym z najbardziej kompleksowych i najlepiej oddających istotę przemiany struktury funkcjonalno-przestrzennej miasta. S. Kaczmarek rozgranicza w kategoriach terminologicznych: restrukturyzację, rewaloryzację, renowację, rehabilitację i rewitalizację, jednak jako proces przemiany obszarów kryzysowych, w celach naprawczych, nadania nowej funkcji i wartości, podkreśla właśnie rolę rewitalizacji [4]. Właściwą definicją stosowaną w środowisku naukowym urbanistów traktuje się słowa K. Skalskiego: „(…) jako kompleksowy program remontów, modernizacji i rewaloryzacji zabudowy i przestrzeni publicznych na wybranym obszarze, najczęściej dzielnicy miasta, w powiązaniu z rozwojem gospodarczym i społecznym. Rewitalizacja to powiązanie działań technicznych, jak remonty z programami na rzecz ożywienia gospodarczego i działaniem na rzecz rozwiązania problemów społecznych, występujących na tych obszarach: bezrobocie,

[2] Europejska Rada Urbanistów: Nowa Karta Ateńska 2003 Wizja miast XXI wieku, Wydawnictwo Alinea, Firenze 2003, s. 16

[3] Rybka A., Walicka-Góral B.: Rewitalizacja komunalnych zasobów mieszkaniowych, Czasopismo techniczne Architektura, Zeszyt 14, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2010, s. 162

przestępczość, brak równowagi demograficznej”[4] [5]. Bardzo ważnym aspektem rewitalizacji jest próba doprowadzenia do zrównoważonego rozwoju i harmonii danego terenu poprzez „przywrócenie do życia”. Zgodnie z etymologią słowo „rewitalizacja”, pochodzące z języka łacińskiego jest połączeniem dwóch znaczeń „*vitalis* – należący do życia, zdolny do życia, dający życie, wart życia” i „*re – znów, na nowo, powtórnie.”*[5] [6].

W niniejszym artykule autorka zwraca uwagę na zasoby mieszkaniowe zabudowy wielorodzinnej, dlatego w tym miejscu warto przytoczyć słowa J. M. Chmielewskiego, odnoszące się do naprawy środowiska mieszkaniowego: „modernizacja zasobów mieszkaniowych jest działaniem przyczyniającym się do poprawy warunków mieszkaniowych, sprzyja również rozwiązywaniu problemów społecznych, przede wszystkim przez dostosowywanie wartości użytkowych istniejącej zabudowy do obecnych potrzeb użytkowników. Działa także na rzecz tworzenia lepszego klimatu społecznego w środowisku zamieszkania. Przy zapewnieniu ze strony państwa i władz komunalnych odpowiedniego systemu finansowego, pozwala także na utrzymanie dostępności mieszkań w zmodernizowanych budynkach dla rodzin o niskich dochodach”[6] [7]. Podobne potrzeby śródmieść miast, do prezentowanych przez autorkę, przywołuje w swym rozdziale Alina Muzioł-Węcławowicz, na podstawie badań w projekcie badawczym „Rewitalizacja miast polskich jako sposób zachowania dziedzictwa materialnego i duchowego oraz czynnik zrównoważonego rozwoju” [8]. Mając świadomość, że „miasta nie składają się tylko z domów i ulic, ale z ludzi i ich nadziei[7]” [9] patrzymy na jednostkę miejską przez pryzmat osób w niej mieszkających. W wyniku tego możemy zdefiniować najważniejsze potrzeby małego miasta do jego zrównoważonego funkcjonowania, tj. poprawa stanu technicznego zabudowy, zapewnienie instalacji techniczno-sanitarnych, nadanie znaczenia gospodarczego tym obszarom, a także zjednanie osób w nim mieszkających, pogłębiając ich tożsamość i identyfikację z otoczeniem [8]. Co potwierdzają słowa K. Krzysztofka „Korzyści są niebagatelne: dbałość o dziedzictwo, co prawda jako zasób ekonomiczny, ale jednak walor, reintegracja z teraźniejszością, co się na ogół nie udaje tradycyjnym publicznym przedsięwzięciom”[8] [10].

---

[4] Skalski K.: Rewitalizacja obszarów zabytkowej zabudowy, Praca zbiorowa pod red. Jurek K., Majchrzak M. Lokalne strategie mieszkaniowe oraz programy gospodarowania zasobem mieszkaniowym gmin, Urząd Mieszkalnictwa i Rozwoju Miast, Kraków 2001

[5] Hajduga P.: Rewitalizacja przestrzeni śródmiejskiej na przykładzie Świdnicy – wybrane aspekty, Gospodarka i przestrzeń, Prace naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 341, Wrocław 2014, s. 39

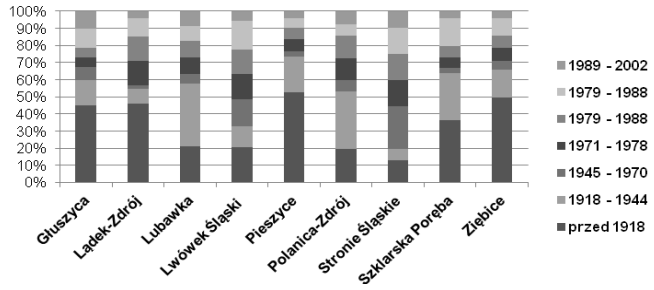
[6] Chmielewski J. M.: Teoria urbanistyki w projektowaniu i planowaniu miast, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005, s. 152

[7] Św. Augustyn

[8] Krzysztofek K.: Tendencje zmian w przestrzeni późnonowoczesnego miasta, Praca zbiorowa pod red. Jałowiecki B. i in. Przemiany miasta: wokół socjologii Aleksandra Wallisa, Wydawnictwo Naukowe „Scholar”, Warszawa 2005, s. 43

### 2.2. Stan zasobów mieszkaniowych w polskich miastach

Obecny stan badań dotyczący terenów zdegradowanych w polskich miastach pokazuje, że śródmieścia stanowią największy odsetek wszystkich obszarów wymagających rewitalizacji[9] [11]. Śródmieście to najstarsza część każdego miasta, w której w większości, zabudowa powstała przed II Wojną Światową, jako zasób mieszkaniowy gminy. Ze względu na datę powstania budynki obecnie wymagają wielu remontów i modernizacji. Epoka socjalizmu, w której powszechnie zaniedbywano wartość kulturową i ekonomiczną centrów miast [8], a także dążono do rozbudowy powierzchni zurbanizowanej miasta (rys.1), obecnie doprowadziła do degradacji śródmieść i pauperyzacji ludności mieszkającej w tej części miasta. Segregacja ludności ze względu na pozycję społeczną i zasób materialny, zmiany ustrojowe, niewyjaśniona sytuacja podmiotów własności danych nieruchomości, to wszystko problemy dzisiejszych samorządów terytorialnych dotyczące centralnych obszarów w miasteczkach [12].




Rys. 1. Zasoby mieszkaniowe, wg daty powstania, w wybranych małych miastach. Źródło: dane GUS, opracowanie własne

Fig. 1. Housing, by date of creation, in some small towns. Source: GUS, own elaboration

## 3. Badania

### 3.1. Cel badań

Celem badań jest próba wskazania problemu jakim jest degradacja i wyludnianie centralnych obszarów w mieście, a także określenie przyczyn zubożenia małych miast i braku możliwości konkurowania z większymi jednostkami miejskimi. Brak stabilności demograficznej i ekonomicznej, a także brak dominującej funkcji w mieście, doprowadza do zamierania nie tylko śródmieść, ale również całych małych miast. Europejski Program Rozwoju Obszarów Wiejskich, do którego można włączyć również małe miasta, mający na celu wsparcie jednostek samorządu terytorialnego oraz poprawy jakości życia mieszkańców, w tym za-

[9] Badania realizowane w ramach projektu badawczego na zlecenie Ministerstwa Rozwoju Regionalnego w latach 2007-2009 [3]

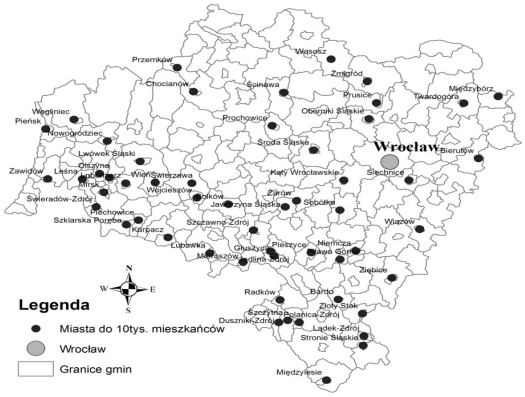
pewnienia podstawowych usług oraz infrastruktury technicznej, może być możliwością realizacji rewitalizacji w miastach, które wzięły udział w badaniu (przedstawione w niniejszym artykule), jako zastosowanie dobrej praktyki, co jest głównym celem rozpoczętych badań [13].

### 3.2. Metody badań

Do badania wzięto wszystkie (54) małe miasta do 10 tys. mieszkańców w województwie dolnośląskim (rys.2, tab.1). Badania początkowe dotyczyły analizy stanu równowagi demograficznej, potencjału ekonomicznego i gospodarczego danej jednostki miejskiej na podstawie danych statystycznych GUS. Kolejnym etapem było wybranie miast o malejącej liczbie ludności, zwłaszcza z grupy ekonomicznej produkcyjnej i przedprodukcyjnej, o ujemnym współczynniku migracji i ujemnym przyroście naturalnym, jako jednostek, którym konieczne jest udzielenie wsparcia i znalezienia przyczyn degradacji, w celu umożliwienia im przyszłego rozwoju. Kolejnym etapem było badanie w wybranych miastach: zasobów mieszkaniowych w postaci dostępności do poszczególnych instalacji technicznosanitarnych w zabudowie mieszkaniowej wielorodzinnej, ilości pustostanów i powierzchni użytkowej w mieszkaniach na 1 osobę.

### 3.3. Lokalizacja badań

W badaniu wzięły udział wszystkie (54) małe miasta do 10 tys. mieszkańców w województwie dolnośląskim w rozkładzie na 22 powiaty. W wyniku wstępnej delimitacji obszaru badań, który jest przedmiotem niniejszego artykułu, wyłoniono 9 miast prezentujących spadek liczby ludności w latach 1995-2013, w tym potencjału ekonomicznego, tj. spadek ludności w wieku produkcyjnym i przedprodukcyjnym. Wybrane 9 małych miast zaznaczono na rysunku nr 3.




Rys. 2. Małe miasta do 10 tys. mieszkańców w województwie dolnośląskim

Fig. 2. Small towns up to 10 thousand residents in Lower Silesia

Tabela 1. Małe miasta do 10 tys. mieszkańców w województwie dolnośląskim

Table 1. Small towns up to 10 thousand residents in Lower Silesia

| | | | |
|---|---|---|---|
| **Powiat lwówecki:**<br>- Mirsk,<br>- Gryfów Śląski,<br>- Lwówek Śląski,<br>- Lubomierz,<br>- Wleń. | **Powiat kłodzki:**<br>- Lądek Zdrój,<br>- Międzylesie,<br>- Radków,<br>- Duszniki Zdrój,<br>- Polanica Zdrój,<br>- Stronie Śląskie,<br>- Szczytna. | **Powiat wałbrzyski:**<br>- Szczawno-Zdrój,<br>- Mieroszów,<br>- Głuszyca,<br>- Jedlina-Zdrój.<br>**Powiat legnicki:**<br>- Prochowice. | **Powiat dzierżoniowski:**<br>- Pieszyce,<br>- Niemcza,<br>- Piława Górna.<br>**Powiat średzki:**<br>- Środa Śląska. |
| **Powiat bolesławiecki:**<br>- Nowogrodziec. | **Powiat górowski:**<br>- Wąsosz. | **Powiat lubiński:**<br>- Ścinawa. | **Powiat strzeliński:**<br>- Wiązów. |
| **Powiat kamiennogórski:**<br>- Lubawka. | **Powiat złotoryjski:**<br>- Świerzawa,<br>- Wojcieszów. | **Powiat polkowicki:**<br>- Chocianów,<br>- Przemków. | **Powiat świdnicki:**<br>- Żarów,<br>-Jaworzyna Śląska. |
| **Powiat trzebnicki:**<br>- Żmigród,<br>- Prusice,<br>- Oborniki Śląskie. | **Powiat oleśnicki:**<br>- Bierutów,<br>- Twardogóra,<br>- Międzybórz. | **Powiat jeleniogórski:**<br>-Szklarska Poręba,<br>- Piechowice,<br>- Karpacz. | **Powiat lubański:**<br>- Leśna,<br>-Świeradów-Zdrój,<br>- Olszyna. |
| **Powiat wrocławski:**<br>-Kąty Wrocławskie,<br>- Sobótka,<br>- Siechnice. | **Powiat zgorzelecki:**<br>- Zawidów,<br>- Pieńsk,<br>- Węgliniec. | **Powiat ząbkowicki:**<br>- Ziębice,<br>- Złoty Stok,<br>- Bardo. | **Powiat jaworski:**<br>- Bolków. |




Rys. 3. Wybrane do badania małe miasta do 10 tys. mieszkańców w województwie dolnośląskim

Fig. 3. Selected for testing small towns to 10 thousand residents in Lower Silesia

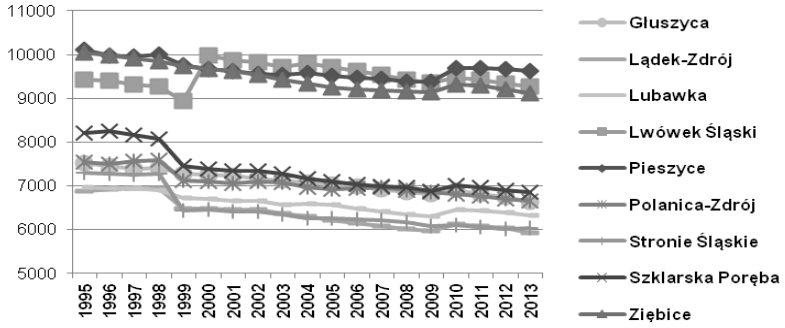
Wybrane 9 miast, prezentujących najgorszy stan demograficzny i ekonomiczny, w większości można zauważyć przy zachodniej granicy województwa dolnośląskiego, a tym samym granicy państwa. Kolejną zależnością, która jednoczy wskazane w wyniku delimitacji miasta jest ich położenie wśród innych miast

do 10 tys. mieszkańców. Nagromadzenie jednostek o tak niskiej liczbie ludności jest niestety dużym problemem urbanistycznym.

## 3.4. Wyniki badań

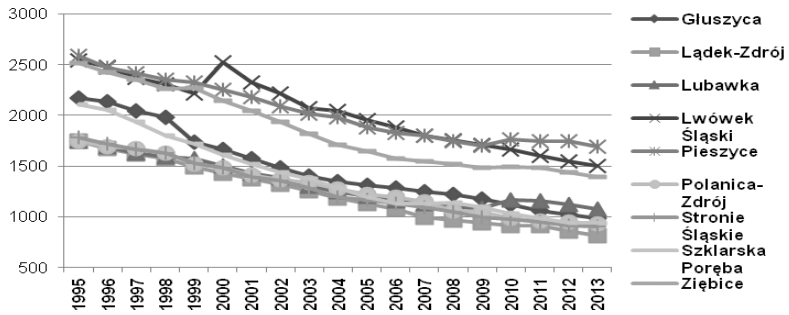
### 3.4.1. Badanie równowagi demograficznej i potencjału ekonomicznego

We wszystkich małych miastach do 10 tys. mieszkańców przeanalizowano zmiany demograficzne w latach 1995-2013 wraz z uwzględnieniem rozkładu na poszczególne grupy ekonomiczne (rys.4-7). Ze względu na czytelność wykresów prezentowanych w artykule na rycinach przedstawiono tylko wybrane miasta, które spełniają określone kryteria do dalszych badań, tj. spadek liczby ludności, ujemny przyrost naturalny, ujemne saldo migracji oraz brak potencjału ekonomicznego na skutek malejącej liczby ludności w wieku przedprodukcyjnym i produkcyjnym oraz rosnącej w wieku poprodukcyjnym. Starzejące się społeczeństwo, brak zaplecza ekonomicznego w postaci ludności do 18 roku życia oraz ujemne saldo migracji, sprawia, że miasta potrzebują wsparcia z zewnątrz do zachowania równowagi i doprowadzenia do utrzymania ciągłego rozwoju, również rozwoju zrównoważonego. W wyniku wstępnej delimitacji wskazano 9 miast: Głuszycę, Lądek-Zdrój, Lubawkę, Lwówek Śląski, Pieszyce, Polanicę-Zdrój, Stronie Śląskie, Szklarską Porębę i Ziębice. Wśród wybranych małych miast, w najgorszej sytuacji jest Stronie Śląskie, Szklarska Poręba i Lądek-Zdrój, prezentujące największy procentowy spadek liczby ludności, w przyjętym okresie czasu. Szklarska Poręba i Lądek-Zdrój to miasta turystyczne. Czy tak dominująca funkcja wystarczy do zrównoważonego funkcjonowania miasta? Ludność napływowa na ferie, wakacje, to tymczasowy zastrzyk gospodarczy dla tak małych jednostek miejskich, istotna w tym momencie będzie analiza zasobów mieszkaniowych oraz jakość życia jaką oferują mieszkańcom i turystom, co zaprezentuję w dalszej części artykułu.



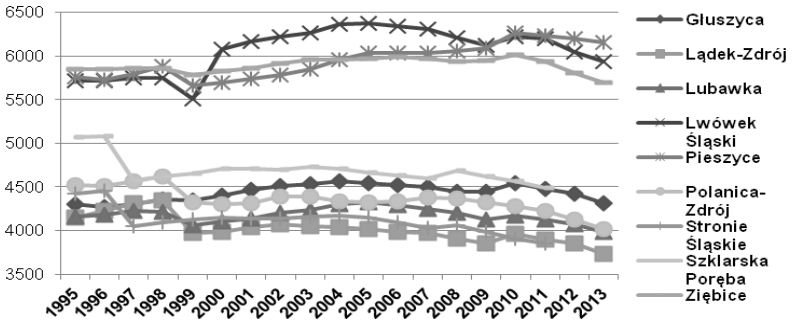

Rys. 4. Liczba ludności w wybranych małych miastach w latach 1995-2013. Źródło: dane GUS, opracowanie własne

Fig. 4. The population in selected small towns in the years 1995-2013. Source: GUS, own elaboration



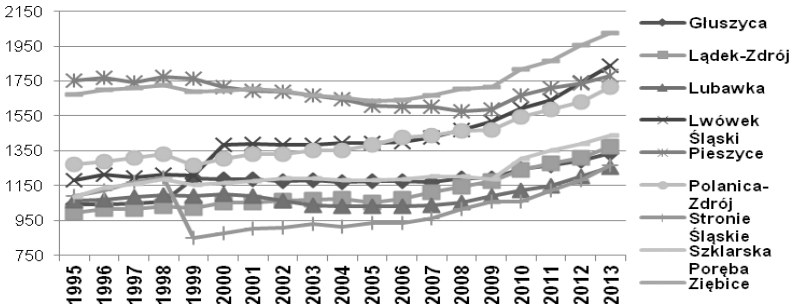

Rys. 5. Liczba ludności w wieku przedprodukcyjnym w wybranych małych miastach w latach 1995-2013. Źródło: dane GUS, opracowanie własne

Fig. 5. The number of pre-working age population in selected small towns in the years 1995-2013. Source: GUS, own elaboration




Rys. 6. Liczba ludności w wieku produkcyjnym w wybranych małych miastach w latach 1995-2013. Źródło: dane GUS, opracowanie własne

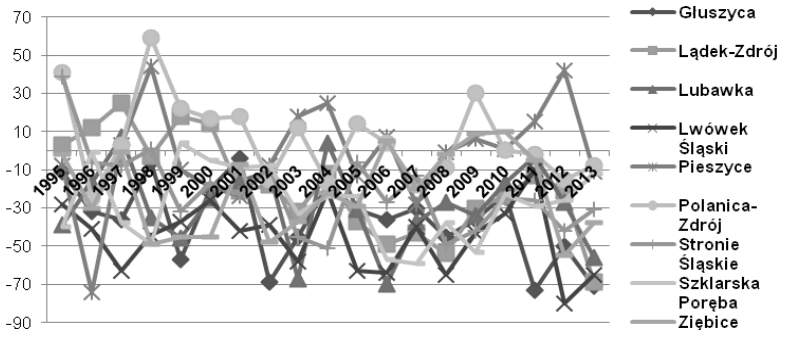
Fig. 6. The number of working-age population in selected small towns in the years 1995-2013. Source: GUS, own elaboration




Rys. 7. Liczba ludności w wieku poprodukcyjnym w wybranych małych miastach w latach 1995-2013. Źródło: dane GUS, opracowanie własne

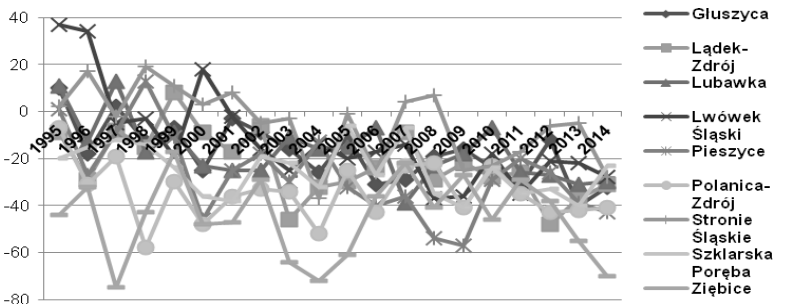
Fig. 7. The population of working age in selected small towns in the years 1995-2013. Source: GUS, own elaboration

Saldo migracji oraz przyrost naturalny zaprezentowane na rysunkach 8 i 9, potwierdzają niestety brak równowagi demograficznej we wszystkich badanych małych miastach. Zaledwie 2 miasta: Pieszyce i Lądek-Zdrój w ostatnich latach mają dodatnie saldo migracji, w pozostałych można zauważyć narastający spadek ludności, zarówno napływowej, jak i nowonarodzonej. Najgorszy stan ukazują miasta: Głuszyce, Lwówek Śląski i Ziębice.




Rys. 8. Saldo migracji w wybranych małych miastach w latach 1995-2013. Źródło: dane GUS, opracowanie własne

Fig. 8. The balance of migration in selected small towns in the years 1995-2013. Source: GUS, own elaboration



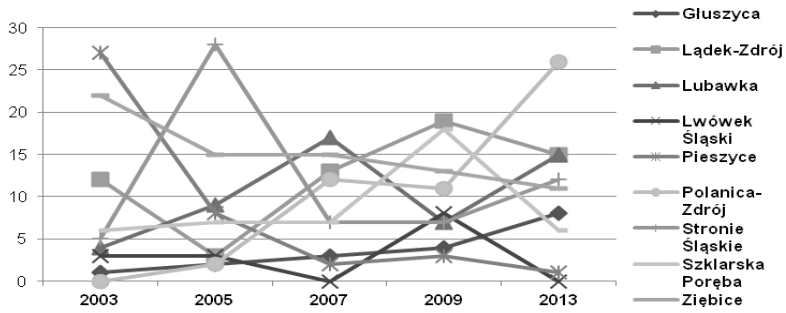

Rys. 9. Przyrost naturalny w wybranych małych miastach w latach 1995-2013. Źródło: dane GUS, opracowanie własne

Fig. 9. The natural increase in selected small towns in the years 1995-2013. Source: GUS, own elaboration

### 3.4.2. Badanie stanu zasobów mieszkaniowych

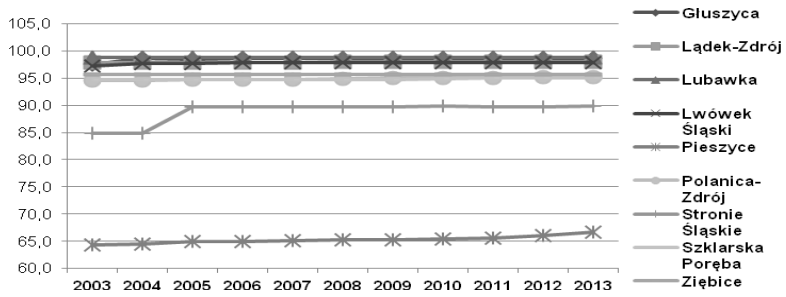
Drugim etapem było badanie zasobów mieszkaniowych m.in. ilości budynków niezamieszkanych (rys.10), dostępności do sieci wodociągowej, kanalizacyjnej i gazowej (rys.11-13) oraz powierzchni użytkowej na 1 mieszkańca (rys.14) w 9 wybranych małych miastach województwa dolnośląskiego. Wśród wszystkich

zaprezentowanych miast największy wzrost liczby pustostanów w ciągu ostatnich 10 lat można zauważyć w Polanicy-Zdrój z 0 do 26 budynków. W pozostałych jednostkach miejskich liczba pustostanów waha się w granicach 5-15 budynków. Niewątpliwie nierozłączną przyczyną tak dużej ilości budynków niezamieszkanych jest jakość zasobów mieszkaniowych zabudowy wielorodzinnej m.in. dostępność do infrastruktury technicznej. Wśród miast o najgorszej kondycji można znaleźć właśnie Polanicę-Zdrój, która prezentuje dostępność do sieci gazowej dla ok. 70% wszystkich mieszkańców, podobnie jak Szklarska Poręba, Stronie Śląskie i Pieszyce. Pieszyce to miasto o skrajnych wartościach co do dostępności nie tylko sieci gazowej, ale również wodociągowej ok. 65% i kanalizacyjnej ok. 25%. Pozostałe jednostki miejskie, z wyjątkiem Szklarskiej Poręby przy sieci kanalizacyjnej ok. 50-60% i Stronia Śląskiego przy sieci wodociągowej ok. 85%, mają podobne wyniki ok. 95% dla sieci wodociągowej i 80-90% dla sieci kanalizacyjnej.



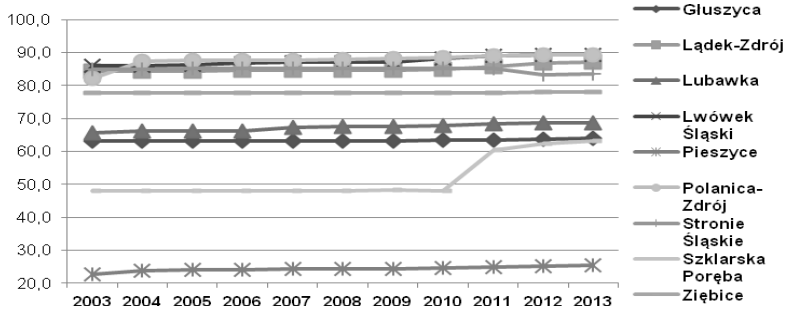

Rys. 10. Budynki niezamieszkane w zasobie gminy w wybranych małych miastach w latach 2003-2013 Źródło: dane GUS, opracowanie własne

Fig. 10. Resource uninhabited buildings in municipalities in selected small towns in the years 2003-2013 Source: GUS, own elaboration



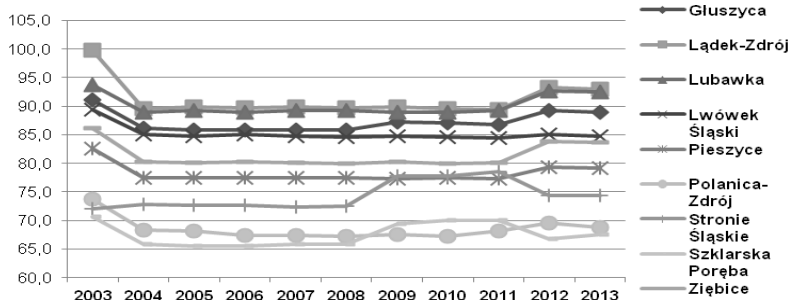

Rys. 11. Liczba osób korzystających z sieci wodociągowej w wybranych małych miastach w latach 2003-2013. Źródło: dane GUS, opracowanie własne

Fig. 11. The number of people using the water supply network in selected small towns in the years 2003-2013. Source: GUS, own elaboration




Rys. 12. Liczba osób korzystających z sieci kanalizacyjnej w wybranych małych miastach w latach 2003-2013. Źródło: dane GUS, opracowanie własne

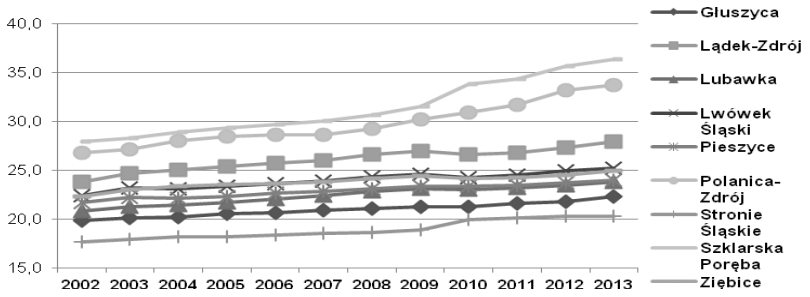
Fig. 12. The number of people using the sewage network in selected small towns in the years 2003-2013 Source: GUS, own elaboration




Rys. 13. Liczba osób korzystających z sieci gazowej w wybranych małych miastach w latach 2003-2013. Źródło: dane GUS, opracowanie własne

Fig. 13. The number of people using the gas network in selected small towns in the years 2003-2013. Source: GUS, own elaboration

Ostatnim elementem badania była analiza powierzchni użytkowej mieszkania przypadająca na 1 mieszkańca. W przeciągu ostatnich 11 lat powierzchnia nieznacznie wzrosła i w 2013r. wyniosła od ok. 20 m2/os. w Stroniu Śląskim do ok. 35 m2/os. w Szklarskiej Porębie. Wyniki są porównywalne do średnich krajowych prezentowanych w badaniach Jana Korniłowicza z 2007r., w których ukazuje on średnio 22,8 m2 mieszkania na 1 osobę [14]. Porównując to z badanymi w małych miastach, zaledwie 2 jednostki miejskie: Głuszyca i Stronie Śląskie w 2007r. znalazłyby się poniżej średniej krajowej.




Rys. 14. Powierzchnia użytkowa mieszkania w m2 na 1 os. w wybranych małych miastach w latach 2003-2013. Źródło: dane GUS, opracowanie własne

Fig. 14. Usable floor space in m2 per 1 person in selected small towns in the years 2003-2013. Source: GUS, own elaboration

## 4. Podsumowanie

Rewitalizacja to „przywrócenie do życia", nadanie nowego znaczenia terenom zapomnianym, opuszczonym i wyludnionym. Poprawa standardów zasobów mieszkaniowych w małych miastach województwa dolnośląskiego to tylko jeden z ważnych elementów, który należy poprawić do sprawnego funkcjonowania każdej jednostki miejskiej. Nie zapominając o naprawie relacji społecznych i umocnieniu tożsamości z miejscem zamieszkania. To w jaki sposób będzie wyglądało środowisko życia mieszkańców, będzie miało odzwierciedlenie w ich komfortowym funkcjonowaniu w danej przestrzeni. Kluczowym słowem w tytule jest rewitalizacja, sama modernizacja, czy remont budynków, nie będzie w stanie rozwiązać wszystkich problemów małych miast do 10 tys. mieszkańców, które zostały zaprezentowane w niniejszym artykule. Rewitalizacja jak wcześniej wspomniano to zmiany z dziedzin technologicznych, społecznych i przestrzennych. Kompleksowe i interdyscyplinarne znaczenie procesu będzie miało tutaj zasadniczą rolę. Największym problemem jest niewątpliwie różnorodność we własności danych obiektów w zabudowie śródmiejskiej, jednak w większości są to zasoby gminy. Bariery finansowe może rozwiązać dofinansowanie ze strony Unii Europejskiej. Pomoc jaką niesie za sobą wstąpienie Polski do państw Unii Europejskiej, m.in. dzięki Programowi Rozwoju Obszarów Wiejskich w latach 2014-2020, trzeba umiejętnie wykorzystać i poprawić środowisko życia mieszkańców małych miast. Atrakcyjne urbanistycznie, kulturowo i historycznie centralne obszary miasteczek wymagają szczególnej opieki i konstruktywnych programów działań naprawczych w celu zachowania tych walorów dla przyszłych pokoleń w myśl idei zrównoważonego rozwoju.

## Literatura

[1] Stettner M.: Rewitalizacja a obraz miasta, czyli znaczenie procesów odnowy przestrzeni małych miast dla społeczności lokalnej, Praca zbiorowa pod red. Skowronek J. Innowacyjne rozwiązania rewitalizacji terenów zdegradowanych, CBiDGP, Lędziny-Katowice 2015, s. 269.

[2] Europejska Rada Urbanistów: Nowa Karta Ateńska 2003 Wizja miast XXI wieku, Wydawnictwo Alinea, Firenze 2003, s. 16.

[3] Rybka A., Walicka-Góral B.: Rewitalizacja komunalnych zasobów mieszkaniowych, Czasopismo techniczne Architektura, Zeszyt 14, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2010, s. 162.

[4] Kaczmarek S.: Rewitalizacja terenów poprzemysłowych Nowy wymiar w rozwoju miast, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź 2001, s. 22-23.

[5] Skalski K.: Rewitalizacja obszarów zabytkowej zabudowy, Praca zbiorowa pod red. Jurek K., Majchrzak M. Lokalne strategie mieszkaniowe oraz programy gospodarowania zasobem mieszkaniowym gmin, Urząd Mieszkalnictwa i Rozwoju Miast, Kraków 2001.

[6] Hajduga P.: Rewitalizacja przestrzeni śródmiejskiej na przykładzie Świdnicy – wybrane aspekty, Gospodarka i przestrzeń, Prace naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 341, Wrocław 2014, s. 39.

[7] Chmielewski J. M.: Teoria urbanistyki w projektowaniu i planowaniu miast, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005, s. 152.

[8] Muzioł-Węcławowicz A.: Rewitalizacja dzielnic śródmiejskich, Praca zbiorowa pod red. Jarczewski W. Przestrzenne aspekty rewitalizacji – śródmieścia, blokowiska, tereny poprzemysłowe, pokolejowe i powojskowe, Instytut Rozwoju Miast, Kraków 2009, s. 25-85.

[9] Fornagiel K.: Rewitalizacja miast a potrzeby społeczne, Czasopismo techniczne Architektura, Zeszyt 12, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2012, s. 182.

[10] Krzysztofek K.: Tendencje zmian w przestrzeni późnonowoczesnego miasta, Praca zbiorowa pod red. Jałowiecki B. i in. Przemiany miasta: wokół socjologii Aleksandra Wallisa, Wydawnictwo Naukowe „Scholar", Warszawa 2005, s. 43.

[11] Jarczewski W.: Przestrzenne aspekty rewitalizacji – śródmieścia, blokowiska, tereny poprzemysłowe, pokolejowe i powojskowe, Instytut Rozwoju Miast, Kraków 2009, s. 291.

[12] Boryczka E. M.: Koncepcje Town Centre Management w procesie rewitalizacji obszarów śródmiejskich polskich miast, Gospodarka lokalna w teorii i praktyce, Prace naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu, nr 332, Wrocław 2014, s. 158-159.

[13] http://euroeko.eu/program-rozwoju-obszarow-wiejskich/ {dostęp: 20 czerwca 2015}.

[14] Korniłowicz J.: Stan mieszkalnictwa w Polsce, Problemy Rozwoju Miast, Wydawnictwo IRM, numer 3, Kraków 2009, s. 89.

## REVITALIZATION OF HOUSING STOCK IN TOWNS TO 10 THOUSAND RESIDENTS A CHANCE FOR DEVELOPMENT SMALL TOWNS

**S u m m a r y**

Today's small towns have numerous urban and social problems. The demographic imbalance, lack of economic potential degradation of central areas in the city, depopulation and devastation of city centers are the main aspects on which the author points out in her article. How to stop the destructive process of spatial and social and lead to sustainable development. Revitalization as a comprehensive action can be a good option. The article presents research all the small town to 10 thousand. residents (54) in Lower Silesia in terms of demographic and economic changes (the number of population divided into groups economic, migration balance and natural increase), and as a result of the delimitation chosen 9 (Głuszyca, Lądek-Zdrój, Lubawka, Lwówek Śląski, Pieszyce, Polanica-Zdrój, Stronie Śląskie, Szklarska Poręba, Ziębice) in the worst socio-economic condition and tested them for state housing stock (access to the water mains, sewage systems and gas, the number of vacant space and space for 1 inhabitant). The aim of the study was to show the problem of degradation of the central areas in the small towns up to 10,000 inhabitants and an attempt to define conclusions for the authorities of local government units, in order to use for example the European Rural Development Programme, as a good practice. Undoubtedly, a big problem in the process of repair of the central areas in the town is diversity of building in terms of ownership structure, but for the sake of the majority in the municipal resource, you can apply corrective EU programs.

**Keywords:** modernization, the European Rural Development Programme, downtown, demographic balance, sanitary installations

DOI:10.7862/rb.2016.228

*Przesłano do redakcji: 11.10.2015 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 461-468

**Leszek STYSZKO**[1]
**Diana FIJAŁKOWSKA**[2]

# WPŁYW ODMIAN I KLONÓW WIERZBY ORAZ GĘSTOŚCI SADZENIA NA PLON BIOMASY NA CELE ENERGETYCZNE W 8 ROKU UPRAWY

Celem pracy była ocena plonowania 10 odmian i klonów wierzby w drugiej 4-letniej rotacji uprawianych na glebie lekkiej w warunkach gospodarki wodnej opadowo-retencyjnej przy zróżnicowanym zagęszczeniu zrzezów podczas sadzenia (15020, 22134 i 33200 szt.·ha$^{-1}$). Doświadczenie składało się z okresu przygotowawczego (2007 rok) oraz dwóch 4-letnich okresów odrastania pędów (2008-2011 i 2012-2015). W ramach gęstości sadzenia rozlosowano siedem odmian (Start, Sprint, Turbo, Ekotur, Olof, Jorr i Tordis) oraz trzy klony wierzby wiciowej (1047, 1054 i 1047D). W drugiej 4-letniej rotacji wpływ gęstości sadzenia w odniesieniu do efektu przeciętnego oraz interakcji gęstości sadzenia z częstotliwością koszenia oraz z odmianami na plon świeżej i suchej masy pędów oraz na zawartość suchej masy w pędach był nieistotny. Odmiany wierzby różniły się plennością. Najwyższe plony uzyskano przy uprawie odmian Ekotur i Tordis (przeciętnie 15,60 Mg·ha$^{-1}$·rok$^{-1}$ s.m., niższe – przy odmianie Olof (5,63 Mg·ha$^{-1}$·rok$^{-1}$ s.m.), bardzo niskie – u odmian i klonów: 1047, 1054, 1047D, Sprint, Turbo i Jorr (przeciętnie 2,49 Mg·ha$^{-1}$·rok$^{-1}$ s.m.), a najniższe - u odmiany Start (0,38 Mg·ha$^{-1}$·rok$^{-1}$ s.m.). Dwukrotne koszenie w pierwszej 4-letniej rotacji zmniejszyło plon suchej masy pędów w drugiej 4-letniej rotacji przeciętnie 2,7-krotnie u 10 genotypów, a u odmiany Ekotur 2-krotnie.

**Słowa kluczowe:** wierzba, odmiany, klony, gęstość sadzenia, biomasa, plon

## 1. Wstęp

Przy produkcji biomasy wierzbowej na cele energetyczne ważna jest obsada karp na hektarze w całym 25-letnim cyklu jej uprawy. Przy wieloletniej uprawie obsada karp na hektarze maleje w stosunku do pierwotnych nasadzeń. Zmniejszenie obsady karp wierzby na hektarze wpływa ograniczająco na plon biomasy pędów [1, 2, 7-9]. Zamieranie karp wierzby w 3-letnim cyklu przy uprawie na madzie bardzo ciężkiej w okolicach Kwidzyna, zależało od odmiany gęstości

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Leszek Styszko, Politechnika Koszalińska, 75-453 Koszalin, ul. Śniadeckich 2, (94) 3478-557, lstyszko@wbiis.tu.koszalin.pl

[2] Diana Fijałkowska, Politechnika Koszalińska, 75-453 Koszalin, ul. Śniadeckich 2, (94) 3486714, fijalkowska@wilsig.tu.koszalin.pl

sadzenia oraz częstotliwości zbioru, jednakże nie przekraczało 10% obsady niezależnie od wariantu doświadczenia[7]. W badaniach autorów w latach 2007–2014 z 10 odmianami wierzby na zamieranie karp wierzby duży wpływ miał wiek uprawy, gęstość sadzenia zrzezów i ich współdziałanie, a mniejsze – odmiany i częstotliwość zbioru pędów w pierwszej 4-letniej rotacji [8]. Po czwartej wegetacji przeciętnie zamarło 6,6% karp wierzby, a duży wzrost ilości martwych karp na poletku wystąpił w następnych wegetacjach (6 - 20,7%, 8 – 36,1%). Odmiany zakwalifikowano pod względem skłonności do zamierania: bardzo silne – Olof (22,9%), silne – Start (19,0%) i Jorr (17,9%), średnie - 1047 (13,2%), 1054 (12,9%), 1047D (12,8%), Sprint (12,1%), Turbo (11,8%) i Tordis (10,5%) oraz małe – Ekotur (6,5%). Wzrost gęstości sadzenia zrzezów spowodowało nasilenie zamierania karp wierzby. Na obiektach z 1-krotnym koszeniem w pierwszej 4-letniej rotacji zamarło przeciętnie 12,2% karp, a przy 2-krotnym – 15,7% [8].

Celem pracy była ocena plonowania 10 odmian i klonów wierzby w drugiej 4-letniej rotacji uprawianych na glebie lekkiej w warunkach gospodarki wodnej opadowo-retencyjnej przy zróżnicowanym zagęszczeniu zrzezów podczas sadzenia (15020, 22134 i 33200 szt.·ha$^{-1}$).

## 2. Materiał i metody

Doświadczenie polowe założono w Kościernicy pod Koszalinem (16°24´N i 54°8´E) metodą losowanych podbloków w układzie zależnym, w czterech powtórzeniach. Gleba pod doświadczeniem była lekka, klasy bonitacyjnej RIVa-IVb, kompleksu żytniego dobrego, oznaczona została jako bielicowa właściwa - pseudobielicowa o składzie piasku gliniastego lekkiego do głębokości 50-100 cm, a głębiej – gliny lekkiej. Przed założeniem doświadczenia w analizach glebowych wykazano zawartość: próchnicy - 1,41% i przyswajalnych form makroskładników: $P_2O_5$ - 16,5 mg·100 g$^{-1}$, $K_2O$ - 3,5 mg·100g$^{-1}$ i MgO - 1,7 mg·100 g$^{-1}$, a pH gleby wynosiło w warstwach: 0 - 20 cm - 4,8 i 21 - 40 cm - 5,8. Doświadczenie założono na polu, które przez 10 lat było nieużytkiem. W 2010 roku zamontowano w pobliżu doświadczenia dwa piezometry, gdzie poziom wody gruntowej był na głębokości 17,6-18,1 m pod powierzchnią gruntu.

Referowane doświadczenie składało się z okresu przygotowawczego (2007 rok) oraz dwóch 4-letnich okresów odrastania pędów (2008-2011 i 2012-2015). Na dużych poletkach (podbloki I rzędu) rozlosowano gęstości sadzenia zrzezów w 2007 roku: (a) 15020 szt.·ha$^{-1}$, (b) 22134 szt.·ha$^{-1}$, i (c) 33200 szt.·ha$^{-1}$, a na małych poletkach (podbloki II rzędu) – siedem odmian wierzby wiciowej (*Salix viminalis*) (Start, Sprint, Turbo, Ekotur, Olof, Jorr i Tordis) oraz trzy klony wierzby wiciowej (1047, 1054 i 1047D). W kwietniu w latach 2008-2015 stosowano na całym doświadczeniu jednolicie nawożenie mineralne w czystym składniku: N - 120 kg.·ha$^{-1}$, P – 8,7 kg.·ha$^{-1}$ i K – 34,9 kg.·ha$^{-1}$. Na poletku o powierzchni 25,3 m$^2$ wysadzono zrzezy w dwóch rzędach, przy czym każdy rząd (12,65 m$^2$) zbierano

oddzielnie. W pierwszej 4- letniej rotacji pędy na pierwszym rzędzie koszono 2-krotnie (18 XI 2010 – po 3 latach odrastania i 17 XI 2011 roku – po kolejnym 1-rocznym odrastaniu), a na drugim rzędzie - jednokrotnie (17 XI 2011 roku – po 4-roku odrastania). W drugiej 4- letniej rotacji pędy na pierwszym i drugim rzędzie skoszono pędy po 4-letnim okresie odrastania w tym samym dniu (2-4 XII 2015 roku). Próbki pędów do oznaczenia zawartości suchej masy pobrano w dniu koszenia. Dla badanych cech (plon świeżej i suchej masy pędów oraz zawartość suchej masy w pędach) wykonano standardową analizę wariancji i określono znaczenie komponentów wariancyjnych, a istotność efektów oceniono testem F.

## 3. Wyniki i dyskusja

We wszystkich latach wegetacja wierzby w latach rozpoczynała się w drugiej połowie kwietnia, a jej przebieg zależał od rozkładu temperatur i opadów. Dane o opadach oraz o współczynniku hydrotermicznym Sielianinowa w latach 2012–2015 zestawiono dla Koszalina według IMiGW w tabeli 1 [6]. W okresie badań w Koszalinie spadło od 588,9 mm w 2014 do 832 mm w 2012 roku opadu, a podczas wegetacji wierzby (IV–X), od 387 mm w 2014 roku do 646 mm w 2007 roku (tab. 1).

Ze względu na nierównomierny rozkład opadów w miesiącach, charakterystyka przebiegu pogody na podstawie tego parametru była niewystarczająca. Hydrotermiczne warunki ekstremalne (skrajnie suche i bardzo suche oraz bardzo wilgotne i skrajnie wilgotne) oznaczone współczynnikiem Sielianinowa (K) mieszczą się w przedziałach < 0,7 oraz > 2,5. Za okres wegetacji współczynnik K obliczony jako średnia ważona, wahał się w granicach od 1,24 w 2014 roku do 2,01 w 2012 roku (tab. 2). Warunki skrajnie suche i bardzo suche wystąpiły w kwietniu 2012 roku, lipcu 2014 roku i sierpniu 2015 roku. Natomiast warunki bardzo wilgotne wystąpiły w kwietniu 2014 roku i w październiku 2012 roku, a skrajnie wilgotne w czerwcu 2015 roku.

Tabela 1. Opady [mm] w Koszalinie w latach 2012-2015 według IMiGW za GUS

Table 1. Precipitation [mm] in Koszalin in the 2012-2015 years according to Institute of Meteorology and Water Management and Central Statistical Office of Poland

| Miesiąc | Opady w latach [mm] | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
| **IV** | 39 | 42,2 | 72,1 | 18,4 |
| **V** | 16 | 51,1 | 52,5 | 37,3 |
| **VI** | 89 | 64,4 | 55,9 | 144,7 |
| **VII** | 119 | 54,5 | 37,9 | 96,3 |
| **VIII** | 100 | 52,3 | 83,6 | 13,3 |
| **IX** | 103 | 85,4 | 54,4 | 67,1 |
| **X** | 71 | 44,3 | 30,6 | 28,5 |
| **Suma IV-X** | 537,0 | 394,2 | 387,0 | 405,6 |
| **Suma I-XII** | 832,0 | 615,9 | 588,9 | 683,9 |

Tabela 2. Współczynnik hydrotermiczny Sielianinowa w Koszalinie w latach 2012-2015
Table 2. Sielianinow hydrothermal coefficient in Koszalin in the 2012-2015 years

| Miesiąc | Współczynnik Sielianinowa (K) w latach | | | |
|---|---|---|---|---|
| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 |
| **IV** | 1,73 | 2,07 | 2,50 | 0,83 |
| **V** | 0,39 | 1,19 | 1,37 | 1,06 |
| **VI** | 1,99 | 1,37 | 1,23 | 3,42 |
| **VII** | 2,18 | 0,98 | 0,59 | 1,79 |
| **VIII** | 1,85 | 0,93 | 1,56 | 0,21 |
| **IX** | 2,42 | 2,21 | 1,19 | 1,56 |
| **X** | 2,60 | 1,36 | 0,88 | 1,09 |
| **Średnia ważona IV-X** | 2,01 | 1,34 | 1,24 | 1,42 |

Strukturę procentową efektów głównych oraz ich interakcji w odniesieniu do udziału w zmienności całkowitej plonu świeżej i suchej masy pędów oraz zawartości w nich suchej masy zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Wpływ badanych czynników na plon pędów wierzby i zawartość suchej masy
Table 3. Impact of examined factors on the yield of willow shoots and dry matter content

| Komponent wariancyjny | Poziomy czynnika | Struktura procentowa komponetów wariancyjnych | | |
|---|---|---|---|---|
| | | Plon świeżej masy pędów | Zawartość suchej masy w pędach | Plon suchej masy pędów |
| **Rzędy na poletku [A]** | 2 | 15,8*** | 0,8 | 17,1*** |
| **Gęstość sadzenia zrzezów [B]** | 3 | 0,4 | 2,7 | 0,5 |
| **Odmiany i klony wierzby [C]** | 10 | 47,7*** | 35,5*** | 54,1*** |
| **Suma współdziałań** | | 11,7 | 3,8 | 2,0 |
| **AxB** | | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **CxB** | | 0,2 | 0,3 | 0,1 |
| **CxA** | | 11,5*** | 3,5 | 1,9*** |
| **CxBxA** | | 0,0 | 0,0 | 0,0 |
| **Czynnik losowy (bloki)** | 4 | 24,4 | 57,2 | 26,3 |
| **Suma** | - | 100,0 | 100,0 | 100,0 |
| **Suma ocen zmienności** | - | 2373,4 | 14,66 | 498,1 |

Istotność różnic przy: ***α=0,001

W analizach wykazano dominujące znaczenie odmian i klonów wierzby, a duże znaczenie – rzędów na poletku, a bardzo mały efekt - gęstości sadzenia. Znaczenie rzędów na poletku wiąże się z częstotliwością zbioru w pierwszej 4-letniej rotacji, a mianowicie na I rzędzie każdego poletka dokonano 2-krotnie zbioru w odstępie 1 roku (listopad 2010 i 2011 roku), a na II rzędzie koszono tylko 1-krotnie (listopad 2011 roku, tzn. po 4. roku odrastania pędów).

Tabela 4. Wpływ badanych czynników na plon świeżej i suchej biomasy pędów oraz na zawartość suchej masy w pędach wierzby

Table 4. Impact of examined factors on the yield of fresh and dry biomass of shoots and dry matter content in the shoots of willow

| Czynniki | Poziomy czynnika | Plon świeżej biomasy pędów [Mg· ha$^{-1}$] | Zawartość suchej masy w pędach [%] | Plon suchej biomasy pędów [Mg· ha$^{-1}$] | |
|---|---|---|---|---|---|
| | | | | na 4 lata | na 1 rok |
| **Rzędy na poletku [A]** | I | 16,3a | 44,1a | 7,6 | 1,90 |
| | II | 44,1b | 44,7a | 20,8 | 5,20 |
| | $NIR_{0,05}$ | 10,3*** | 1,0 n.i | 4,9*** | - |
| **Gęstość sadzenia zrzezów w tys. sztuk·ha$^{-1}$ [B]** | 15020 | 24,1a | 43,7a | 11,3 | 2,83 |
| | 22134 | 32,9a | 44,6a | 15,5 | 3,88 |
| | 33200 | 33,6a | 45,1a | 15,9 | 3,98 |
| | $NIR_{0,05}$ | 12,6 n.i | 1,4 n.i | 5,9 n.i | - |
| **Odmiany i klony wierzby [C]** | 1047 | 13,4a | 42,4a | 5,8ab | 1,45 |
| | 1054 | 12,4a | 42,7a | 5,5ab | 1,38 |
| | 1047D | 15,3a | 42,1a | 6,7a | 1,68 |
| | Start | 1,9b | 42,7a | 0,8b | 0,20 |
| | Sprint | 11,2ab | 43,2a | 4,9ab | 1,22 |
| | Turbo | 12,4ab | 45,5b | 5,8ab | 1,45 |
| | **Ekotur** | **95,6c** | **49,1c** | **47,5c** | **11,88** |
| | Olof | 31,8d | 46,5d | 15,2 d | 3,80 |
| | Jorr | 18,0a | 43,7ab | 8,1a | 2,03 |
| | **Tordis** | **90,1c** | 46,4d | **41,9d** | **10,48** |
| | $NIR_{0,05}$ | 10,9*** | 1,6*** | 5,2*** | - |
| **Średnia doświadczenia** | - | 30,2 | 44,4 | 14,2 | 3,55 |

Istotność różnic przy: ***α=0,001; n.i. – brak istotności; a, b, c, d … grupy jednorodne

W analizach przy plonie biomasy pędów miała miejsce wysoko istotna interakcja odmian i klonów wierzby z rzędami, co jest związane z reakcją odmian i klonów wierzby na częstotliwość koszenia w pierwszej 4-letniej rotacji (tab. 5). W badaniach nie udowodniono istotności interakcji odmian i klonów wierzby z gęstością sadzenia zrzezów (tab. 3). Odmiany różniły się plennością. Najwyższe plony uzyskano przy uprawie odmian Ekotur i Tordis, niższe – przy odmianie Olof, bardzo niskie – u odmian i klonów: 1047, 1054, 1047D, Sprint, Turbo i Jorr, a najniższe - u odmiany Start (tab. 4). Odmiana Ekotur charakteryzowała się także najwyższą zawartością suchej masy w pędach (tab. 4). U wszystkich odmian i klonów plony pędów były istotnie niższe na I rzędzie niż na II rzędzie (tab. 5), co wskazuje, że zbyt częste koszenie w pierwszej 4-letniej rotacji obniżało plonowanie wierzby w drugiej 4-letbniej rotacji. W tabeli 5 utworzono grupy jednorodne odmian i klonów wierzby w ramach I oraz II rzędu na poletku, a przy plonie suchej biomasy pędów dodatkowo przeliczono wydajność na 1 rok wegetacji.

Tabela 5. Plon świeżej i suchej masy pędów w rzędach na poletku [Mg· ha$^{-1}$]

Table 5. The yield of fresh and dry mass of shoots in rows on the plot [Mg·ha$^{-1}$]

| Odmiany i klony wierzby [C] | Plon świeżej biomasy pędów na rzędach poletka [Mg· ha$^{-11}$] | | Plon suchej biomasy pędów na rzędach poletka [Mg· ha$^{-1}$] | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | I | II | I | II | I | II |
| | na 4 lata | | na 4 lata | | na 1 rok | |
| **1047** | 3,9ac | 22,9a | 1,6a | 9,9a | 0,40 | 2,48 |
| **1054** | 4,6ac | 20,3a | 1,9a | 9,2a | 0,48 | 2,30 |
| **1047D** | 6,2ac | 24,4a | 2,6a | 10,7a | 0,65 | 2,68 |
| **Start** | 0,2a | 3,5b | 0,1a | 1,5b | 0,03 | 0,38 |
| **Sprint** | 3,0ac | 19,4b | 1,4a | 8,5ab | 0,35 | 2,12 |
| **Turbo** | 5,8ac | 18,9ab | 2,8a | 8,8ab | 0,70 | 2,20 |
| **Ekotur** | 65,5b | 125,7c | 31,7b | 63,3c | **7,93** | **15,83** |
| **Olof** | 17,0c | 46,5d | 7,9c | 22,5d | 1,98 | 5,63 |
| **Jorr** | 8,4ac | 27,6e | 3,6a | 12,6a | 0,90 | 3,15 |
| **Tordis** | 48,5d | 131,7c | 22,5d | 61,4c | **5,62** | **15,35** |
| **$NIR_{0,05}$** | 15,4** | | 7,4** | | - | - |

**Istotność różnic przy α=0,01; a, b, c, d … grupy jednorodne w ramach rzędu poletka

Przedstawione badania dotyczą uprawy wierzby na glebie lekkiej o gospodarce wodnej typu opadowo-retencyjnego, gdzie poziom wody gruntowej jest na głębokości 17,6-18,1 m pod powierzchnią gruntu. Z powodu występowania w latach 2012-2015 w kilku miesiącach warunków ekstremalnie i bardzo suchych, uzyskano niższe plony suchej biomasy pędów niż podaje to literatura krajowa [3, 5, 7, 9, 10] oraz zagraniczna [1, 2, 4, 11]. W badaniach Matyki [5] wysoki poziom wody gruntowej na glebie lekkiej (2,0-2,5 m od powierzchni gruntu) spowodowały brak zróżnicowania plonów wierzby na glebach ciężkiej (kompleks 8) i lekkiej (kompleks 5). W badaniach własnych mimo niekorzystnych warunków uprawy, wykazano że odmiany Ekotur i Tordis przy koszeniu co 4 lata wydały ponad 15 Mg·ha$^{-1}$·rok$^{-1}$ s.m.. Te same odmiany, które były koszone w pierwszej 4-letniej rotacji dwukrotnie w odstępie jednego roku, dały plon niższy odpowiednio o 50,0% i 63,4%. Utworzono grupy jednorodne genotypów wierzby pod względem plonowania. Najwyższy plon uzyskano u odmian Ekotur i Tordis (przeciętnie 15,6 Mg·ha$^{-1}$·rok$^{-1}$ s.m.), średni u odmiany Olof (5,63 Mg·ha$^{-1}$·rok$^{-1}$ s.m.), bardzo niski u klonów i odmian: 1047, 1054, 1047D, Sprint, Turbo i Jorr (2,49 Mg·ha$^{-1}$·rok$^{-1}$ s.m.) i ekstremalnie niski u odmiany Start (0,38 Mg·ha$^{-1}$·rok$^{-1}$ s.m.). Przy koszeniu pędów dwukrotnie w odstępie jednego roku w pierwszej 4-letniej rotacji, te same odmiany wydały plon niższy, a odmiany uszeregowano następująco w grupy jednorodne: najwyższy plon uzyskano u odmian Ekotur (przeciętnie 7,93 Mg·ha$^{-1}$·rok$^{-1}$ s.m.), średni u odmiany Tordis (5,62 Mg·ha$^{-1}$·rok$^{-1}$ s.m.), bardzo niski u odmiany Olof (1,98 Mg·ha$^{-1}$·rok$^{-1}$ s.m.) i ekstremalnie niski u klonów i odmian: 1047, 1054, 1047D, Start, Sprint, Turbo i Jorr (0,50 Mg· ha$^{-1}$·rok$^{-1}$ s.m.). W drugiej 4-letniej

rotacji nie udowodniono wpływu na plon suchej masy gęstości sadzenia w odniesieniu do efektu przeciętnego oraz interakcji z rzędami na poletku oraz z odmianami. Wykazano tylko tendencję do wzrostu plonu przy sadzeniu 22134 zrzezów i 33200 zrzezów na hektarze w stosunku do obsady 15020 zrzezów. Dane te potwierdzają doniesienia z literatury, że na uprawach produkcyjnych powinno się wysadzać 20-25 tysięcy zrzezów wierzby na hektarze [7, 11] i kosić 1-krotnie w 3- lub 4-letnim cyklu odrastania.

## 4. Wnioski

1. W warunkach gleby lekkiej o gospodarce wodnej typu opadowo-retencyjnego, największy wpływ na plonowanie wierzby miały odmiany i klony wierzby, częstotliwość koszenia pędów oraz współdziałanie genotypów z częstotliwością koszenia pędów w pierwszej 4-letniej rotacji.
2. W drugiej 4-letniej rotacji wpływ gęstości sadzenia w odniesieniu do efektu przeciętnego oraz interakcji gęstości sadzenia z częstotliwością koszenia oraz z odmianami na plon suchej masy pędów był nieistotny.
3. Odmiany wierzby różniły się plennością. Najwyższe plony uzyskano przy uprawie odmian Ekotur i Tordis, niższe – przy odmianie Olof, bardzo niskie – u odmian i klonów: 1047, 1054, 1047D, Sprint, Turbo i Jorr, a najniższe – u odmiany Start.
4. Dwukrotne koszenie w pierwszej 4-letniej rotacji zmniejszyło plon suchej masy pędów w drugiej 4-letniej rotacji przeciętnie 2,7 krotnie u 10 genotypów, a u odmiany Ekotur 2-krotnie.

### Literatura

[1] Bullard M.J., Mustil S.J., McMillan S.D., Nixon P.M.I., Carver P., Britt C.P.: Yield improvements through modification of planting density and harvest frequency in short rotation coppice Salix spp. -1. Yield response in two morphological diverse warieties. Biomass Bioenergy. 22, 2002, pp. 15-25.
[2] Caslin B., Finnan J., McCracken A.: Short Rotation Coppice Willow Best Practice Guidelines. Teagas AFBI, Belfast 2010.
[3] Kuś J., Matyka M.: Wydajność wybranych gatunków roślin uprawianych na cele energetyczne w zależności od jakości gleby. Fragm. Agron. 26(4), 2009, s. 103-110.
[4] Lebresque M., Teodorescu T. I.: Field performance and biomass production of 12 willow and poplar clones in short-rotation coppice in southern Quebec (Canada). Biomass Bioenergy 29, 2005, pp. 1-9.
[5] Matyka M. 2013. Produkcyjne i ekonomiczne aspekty uprawy roslin na cele energetyczne. Rozpr. hab. Wydawnictwo IUNG-PIB Monogr. Rozpr. 35, Puławy, ss. 98.
[6] GUS 2015. Ochrona środowiska. www.stat.gov.pl {dostęp 06.05.2016 r.}.
[7] Stolarski J.M.: Agrotechniczne i ekonomiczne aspekty produkcji biomasy wierzby krzewiastej (*Salix* spp.) jako surowca energetycznego, Wydawnictwo Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego, Olsztyn, 2009, ss.145.

[8] Styszko L., Fijałkowska D.: Influence of varieties and clones and planting density on dying out willow bushes in a 8-year. Wpływ odmian i klonów oraz gęstości sadzenia na zamieranie karp wierzby krzewiastej w 8-letnim cyklu uprawy. Progress in Plant Protection 55 (4), 2015, s. 488-493.
[9] Szczukowski S., Tworkowski J.: Produktywność oraz wartość energetyczna biomasy wierzb krzewiastych *Salix* sp. na różnych typach gleb w pradolinie Wisły. Post. Nauk Rol. 2, 2001, s. 29-38.
[10] Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M., Fortuna W.: Plon biomasy wierzby pozyskanej w krótkich rotacjach zbioru na plantacji przemysłowej. Fragm. Agron. 26(3), 2009, s. 146-155.
[11] Wilkinson J.M., Evans E.J., Bilsborrow P.E., Wright C., Hewison W.O., Pillbeam D.J.: Yield of willow cultivars at different planting densites in a commercial short rotation coppice in the north of England. Biomass Bioener. 31, 2007, s. 469-474.

## IMPACT OF VARIETIES, CLONES AND PLANTING DENSITY OF WILLOW ON YIELD OF BIOMASS FOR ENERGY PURPOSES DURING 8$^{TH}$ YEAR OF CULTIVATION

**S u m m a r y**

The aim of the study was to evaluate the yield of 10 varieties and clones of willow in the second 4-year rotation, cultivated on light soil under rainfall water-retention conditions, at various density of cuttings planting (15,020, 22,134 and 33,200 pieces per hectare). The experiment consisted of a preparatory period (year 2007) and two 4-year periods of shoots regrowth (2008-2011 and 2012-2015). Seven varieties (Start, Sprint, Turbo, Ekotur, Olof, Jorr and Tordis) and three clones (1047, 1054 and 1047D) were drawn within densities of planting. During the second 4-year rotation impact of planting density with respect to the average effect and to the interaction of density of planting with the cutting frequency and varieties on the yield of fresh and dry mass of shoots and the content of dry matter in the shoots was insignificant. Willow varieties differed in fertility. The highest yields were obtained during cultivation of Ekotur and Tordis varities (on average 15.60 $Mg \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$ of dry matter), lower for Olof variety (5.63 $Mg \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$ of dry matter), very low – for 1047, 1054, 1047D clones and Sprint, Turbo and Jorre varieties (an average of 2.49 $Mg \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$ of dry matter), and the lowest for Start variety (0.38 $Mg \cdot ha^{-1} \cdot yr^{-1}$ of dry matter). Double mowing during the first 4-years rotation decreased yield of dry mass of shoots during of the second 4-year rotation 2.7 times on the average for 10 genotypes and 2 times for Ekotur variety.

**Keywords:** willow, cultivars, clones, planting density, biomass, yield

DOI:10.7862/rb.2016.229

*Przesłano do redakcji: 16.05.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16),-wrzesień lipiec 2016, s. 469-476

**Aleksandra ŚCIUBIDŁO**[1]

# INNOWACYJNY SPOSÓB ZAGOSPODAROWANIA POPIOŁÓW LOTNYCH

W artykule przedstawiono badania adsorpcji $NO_2$ na zeolitach otrzymanych z popiołów lotnych. Celem badań jest określenie parametrów adsorpcji $NO_2$ na sorbentach stałych i zastosowanie tego procesu w doczyszczaniu spalin z $NO_2$. Proponowana przez autorów metoda doczyszczani pozwala nie tylko na doczyszczenie spalin przed utylizacją i składowaniem $CO_2$, ale również pozwala na zagospodarowanie odpadów z energetyki z korzyścią dla środowiska poprzez syntezę sorbentów z popiołów lotnych. Na bazie popiołów lotnych zostały otrzymane sorbenty tj. zeolit Na-A i Na-X, które następnie zostały użyte w procesie adsorpcji $NO_2$. Zmiennymi parametrami procesu adsorpcji $NO_2$ była temperatura wygrzewania zeolitów przed procesem adsorpcji oraz stężenie gazu reakcyjnego $NO_2$.

**Słowa kluczowe:** $NO_2$, sorbenty, popiół lotny, zeolit Na-A, Na-X

## 1. Wprowadzenie

Ze względu na porozumienia dotyczące ograniczenia emisji $CO_2$, uważanego za główną przyczynę efektu cieplarnianego, technologia CCS (Carbon Capture and Storage) będzie odgrywała dużą role w ograniczaniu emisji $CO_2$ wykazując największy potencjał redukcji $CO_2$. To właśnie ta technologia wydaje się być najbardziej odpowiednia w krajach, w których głównym paliwem w produkcji energii jest węgiel. Proces wychwytywania i składowania (CCS) składa się z 4 etapów: wychwytywania i sprężania $CO_2$, transportu, wtłaczania i magazynowania. Technologia ta jest obecnie kosztowana a najdroższym etapem jest proces wychwytywania $CO_2$.

Najbardziej rozpowszechnionymi metodami usuwania $CO_2$ jest absorpcyjna metoda aminowa oraz adsorpcja na sorbentach stałych modyfikowanych aminami. W obu tych metodach zachodzi degradacja sorbentów w związku z obecnością $SO_x$ i $NO_x$ w spalinach. Aby zapobiec takiej sytuacji, należy odpowiednio przygotować spaliny przed procesem wychwytywania $CO_2$, tzn. przeprowadzić

[1] Aleksandra Ściubidło, Politechnika Częstochowska, Instytut Zaawansowanych Technologii Energetycznych, Wydział Infrastruktury i Środowiska, ul. Dąbrowskiego 73, 42-200 Częstochowa, tel. 343250933, asiubidlo@is.pcz.czest.pl

doczyszczanie spalin. W przypadku $SO_2$ bezpieczne stężenie nie powinno przekraczać 10ppm w spalinach, a dla tlenków azotu powinno być mniej niż 20 ppm. [1-3] W przypadku spalania w atmosferze tlenu należy również oczyścić spalin z $NO_x$ i $SO_x$. Odseparowany $CO_2$ przeznaczony do utylizacji i składowania wymaga również odpowiedniej czystości, jak i przed sprężeniem i transportem rurociągami, tankowcami. Bezpieczne stężenie wynoszą odpowiednie dla $NO_x$<50 ppm i $SO_2$ <10 ppm) [4]. W związku z przedstawionymi wymaganiami należy doczyścić spaliny. Niestety zarówno metody pierwotne, jak i wtórne redukcji tlenków azotu, nie pozwalają na osiągnięcie bezpiecznych stężeń tlenków azotu w spalinach, które dalej mogłyby być kierowane do procesu wychwytywania i składowania dwutlenku węgla. Najskuteczniejszą metodą redukcji emisji tlenków azotu jest metoda SCR, pozwalająca na osiągnięcie emisji w granicach 100 mg/Nm$^3$. Niestety wartość ta jest 5-cio krotnie wyższa niż dopuszczalna w przypadku stosowania amin w procesach wychwytywania dwutlenku węgla. W związku z tym autor proponuje innowacyjną metodę doczyszczania spalin z NOx na sorbentach stałych otrzymanych z popiołów lotnych.

Do usuwania NO, $NO_2$, $SO_2$ z gazów stosuje się porowate materiały węglowe, zeolity, materiały mezoporwate, węgiel aktywny, aktywne włókna węglowe.[5] Zarówno zeolity jak i materiały mezoporowate można otrzymać z popiołów lotnych co zostało potwierdzone w badaniach [6-18]. Dotychczas w literaturze nie znaleziono badań dotyczących adsorpcji $NO_2$ na sorbentach stałych tj. zeolity i materiały mezoporowate otrzymanych z popiołów lotnych. W artykule przedstawiono badania procesu adsorpcji $NO_2$ na sorbentach otrzymanych z popiołów lotnych, na której autor opiera nowatorską metodę doczyszczania spalin z $NO_2$ w procesie adsorpcji fizycznej. Autor proponuje alternatywne i przyjazne środowisku sorbenty stałe o wysokiej wydajności energetycznej dla $NO_2$, których zastosowanie eliminuje produkcję dodatkowych odpadów.

## 2. Opis procedury badawczej

W pracy przedstawiono badania adsorpcji $NO_2$ dla 2 różnych materiałów mikroporowatych: zeolitu NaA i NaX otrzymanych z popiołów lotnych i oznaczonych odpowiednio Na-A-FA, Na-X-FA.

Właściwości termiczne zeolitów zbadane zostały z zastosowaniem metody termograwimetrycznej (TG) i analizy kalorymetrii skaningowej różnicowej (DSC) z użyciem analizatora termicznej TGA / DSC1 Mettler Toledo. Próbki sorbentu ogrzewano w tyglu platynowym, pod ciśnieniem atmosferycznym w atmosferze obojętnej ($N_2$) z przepływem gazu reakcyjnego 50ml /min w zakresie temperatur od 293-1273K ze współczynnikiem szybkości grzania 293 K/min.

Identyfikację faz krystalicznych oraz faz zeolitowych dokonano metodą rentgenograficzną przy użyciu dyfraktometru proszkowego D8 Advance. Aparat zaopatrzony jest w monochromator Ge (długość promieniowana $CuK_{\alpha 1}$=1,5406 Å).

Refleksy rejestrowano przy pomocy detektora paskowego, krzemowego LynxEye. Pomiarów dokonywano przy użyciu kuwet wykonanych z polimetakrylanu metylu. Dyfraktogramy rejestrowano w temp. pokojowej w zakresie 10-70$^o$ kąta 2Θ, z krokiem 0,0499$^o$, przy czasie 1 krok/sek. W trakcie pomiarów próbka była obracana z szybkością 30 obrotów/minutę. Pomiarów dokonano przy prądzie generatora lampy rentgenowskiej o napięciu 35 kV i natężeniu 50 mA.

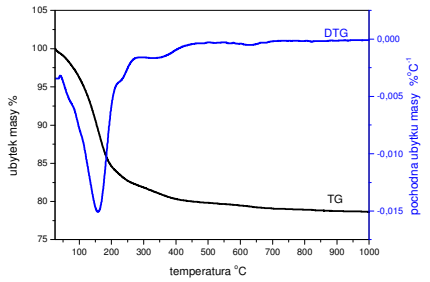
Badania sorpcji $NO_2$ przeprowadzone zostały również przy użyciu analizatora TGA/SDSC 1. Na wstępie próbki zostały wygrzane w temperaturze 100$^o$C lub 350$^o$C (stopień nagrzewania 20K/min) przez 20 minut w atmosferze obojętnej ($N_2$) z przepływem gazu 50ml/ min. Po ochłodzeniu próbki do temperatury 25$^o$C realizowany był proces adsorpcji $NO_2$. Do złoża próbki wprowadzony był gaz reakcyjny o stężeniu 110ppm$NO_2/N_2$ oraz 50ppm $NO_2/N_2$ przez okres 60 minut i przepływie 50 ml/ min. Proces desorpcji przeprowadzony był w temperaturze 100$^o$C ze stopniem nagrzewania 10K/min w obecności azotu przez 60 minut.

## 3. Metodyka i wyniki badań

Syntezę zeolitów NaA i NaX z popiołu lotnego przeprowadzono zgodnie z procedurą przedstawioną przez autorów [6-9,11-12,14-15]

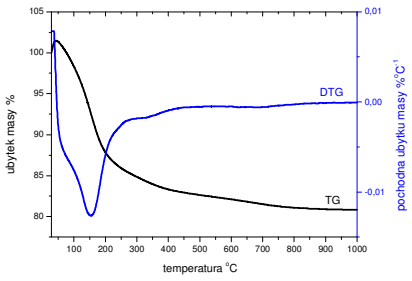
Sorbenty otrzymane z popiołów lotnych, zeolit Na-A-FA, Na-X-FA zostały poddane analizie termograwimetrycznej. Wyniki przeprowadzonych badań w postaci termogramów, przedstawiono w postaci wykresów obrazujących zależność ubytku masy próbki od temperatury (sygnał TG) oraz jej pierwszej pochodnej (DTG) (rys. 1-2).

Dla zeolitu Na-A-FA (rys.1) jak i zeolitu Na-X-FA (rys.2) ubytek masy rozpoczyna się w temperaturze 50°C a kończy w 500°C. Ubytek masy na krzywych TG i DTG spowodowany jest desorpcją wilgoci i wody zeolitowej. Zawartość wody w zeolicie Na-A-FA wynosi 20%wag. A dla zeolitu Na-X-FA 17,5%wag.




Rys.1. Krzywa TG i DTG zeolitu Na-A-FA

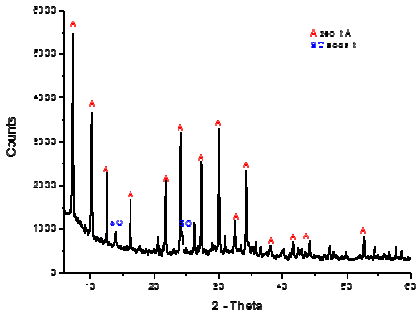
Fig.1. TG and DTG curves of zeolite Na-A-FA



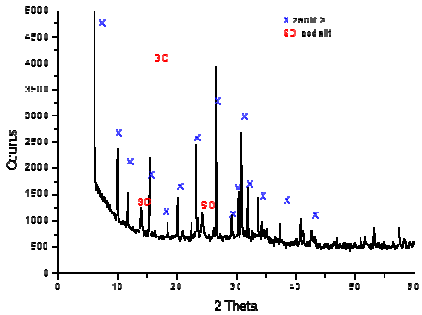

Rys.2. Krzywa TG i DTG zeolitu Na-X-FA

Fig.2. TG and DTG curves of zeolite Na-X-FA

W celu identyfikacji struktur zeolitowych przeprowadzono badania dyfraktometryczne. Uzyskane widma XRD zeolitów Na-A-FA, Na-X-FA przedstawiono na rys. 3-4. W przypadku próbki nr 1 zaobserwowano obecność zeolitu typu A (A) oraz sodalitu (SO). W przypadku próbki nr 2 zidentyfikowano zeolit typu X (X) oraz sodalit (SO).



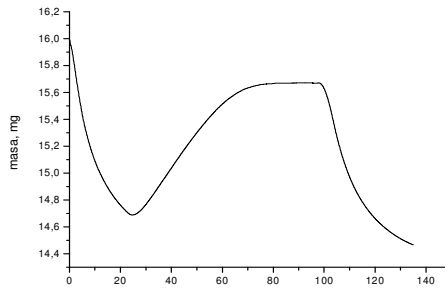

Rys.3. Dyfraktogram XRD zeolitu Na-A-FA
Fig.3. XRD pattern of Na-A-FA



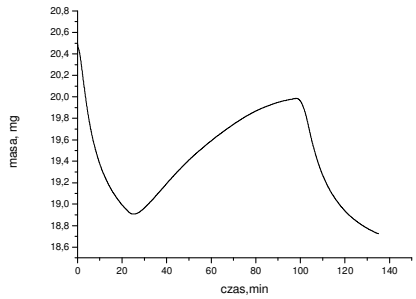

Rys.4. Dyfraktogram XRD zeolitu Na-X-FA
Fig.4. XRD pattern of Na-X-FA

W drugim etapie badań przeprowadzono proces adsorpcji na otrzymanych zeolitach z popiołów lotnych. Przed procesem adsorpcji próbki wygrzewano w temperaturze 100°C przez 20 minut w przepływie azotu ze stopniem nagrzewania 20K/min. Proces adsorpcji przeprowadzono przez 60 minut w temperaturze 25°C, o stężeniu gazu reakcyjnego 110ppm$NO_2/N_2$ i przepływie gazu 50 ml/ min. Pojemność sorpcyjną sorbentów wyrażono w mg $NO_2$/g adsorbentu. Na rys.5 przedstawiono wyniki adsorpcji $NO_2$ na zeolicie Na-A-FA otrzymanym z popiołu lotnego. Pojemność sorpcyjna tego sorbentu wyniosła 4,59 mg $NO_2$ $g^{-1}$ sorbentu.

W przypadku zeolitu Na-X-FA (rys.6) pojemność sorpcyjna wyniosła 4,40 mg $NO_2$ $g^{-1}$ sorbent. Zeolit Na-A-FA charakteryzował się nieznacznie wyższą pojemnością sorpcyjną $NO_2$ niż zeolit NA-X-FA.



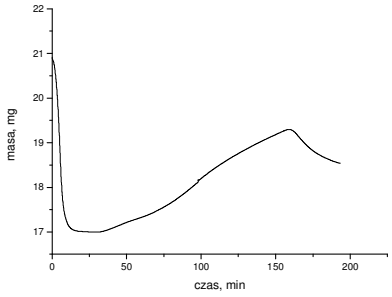

Rys.5. Krzywa sorpcji $NO_2$ na zeolicie Na-A-FA
Fig.5. Adsorption curve of NO2 on zeolite Na-A-FA

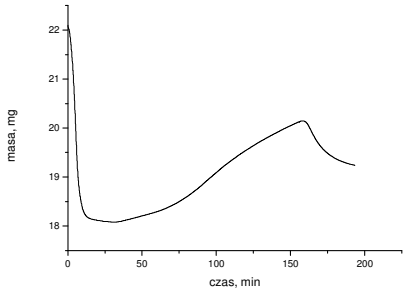



Rys.6. Krzywa sorpcji $NO_2$ na zeolicie Na-X-FA
Fig.6. Adsorption curve of NO2 on zeolite Na-A-FA

W badaniach określono wpływ temperatury wygrzewania próbek przed procesem adsorpcji, na pojemność sorpcyjną sorbentów względem $NO_2$. W tym celu temperatura wygrzewania sorbentów została podniesiona z 100°C do 350°C. Pozostałe parametry nie uległy zmianie. Na rys.7 przedstawiono wynik adsorpcji $NO_2$ na zeolicie Na-A-FA. Pojemność sorpcyjna tego sorbentu wyniosła 6,77 mg $NO_2$ $g^{-1}$ sorbentu. W przypadku zeolitu Na-X-FA (rys.8) pojemność sorpcyjna wyniosła 6,09 mg $NO_2$ $g^{-1}$ sorbent. Zeolit Na-A-FA charakteryzował się wyższą pojemnością sorpcyjną $NO_2$ w porównaniu do zeolitu NA-X-FA.

W badaniach określono również wpływ stężenia gazu reaktywnego podczas procesu adsorpcji na pojemność sorpcyjną próbek. W tym celu użyto gazu reaktywnego o stężeniu 50ppm$NO_2/N_2$. Pozostałe parametry nie uległy zmianie.



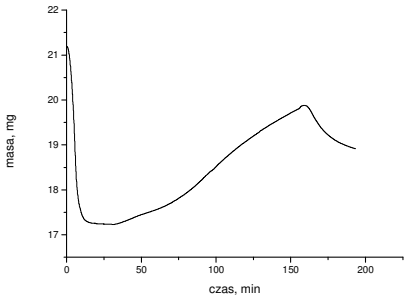

Rys.7. Krzywa sorpcji $NO_2$ na zeolicie Na-A-FA

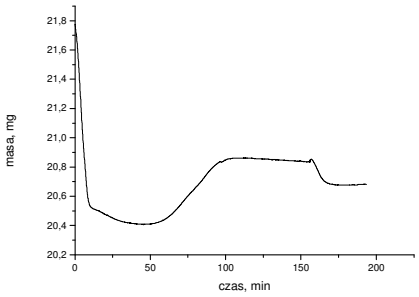
Rys.8. Krzywa sorpcji $NO_2$ na zeolicie Na-X-FA

Fig.7. Adsorption curve of NO2 on zeolite Na-A-FA

Fig.8. Adsorption curve of NO2 on zeolite Na-A-FA

Na rys. 9 przedstawiono krzywą adsorpcji $NO_2$ na zeolicie Na-A-FA, dla którego pojemność sorpcyjna wyniosła 0,039 mg $NO_2$ $g^{-1}$ sorbentu. Zeolit Na-A-FA (rys.10) charakteryzował się wyższą pojemnością sorpcyjną $NO_2$ równą 7,77mg $NO_2$ $g^{-1}$ sorbentu w porównaniu do zeolitu NA-X-FA.




Rys.9. Krzywa sorpcji $NO_2$ na zeolicie Na-A-FA

Rys.10. Krzywa sorpcji $NO_2$ na zeolicie Na-X-FA

Fig.9. Adsorption curve of $NO_2$ on zeolite Na-A-FA

Fig.10. Adsorption curve of $NO_2$ on zeolite Na-A-FA

## 4. Analiza wyników

W tabeli 1 porównano wyniki przeprowadzonych badań adsorpcji dla zeolitów otrzymanych z popiołów lotnych Na-A-FA i Na-X-FA przy różnych parametrach procesu adsorpcji. Jak widać z badań we wszystkich przypadkach wyższą pojemnością sorpcyjną charakteryzował się zeolit Na-A-FA. Podniesienie temperatury wygrzewania zeolitów z 100°C do temperatury 350°C wpłynęło na wzrost pojemności sorpcyjnej obu zeolitów. W przypadku zeolitu Na-A-FA pojemność sorpcyjna wzrosła o 2,18 mg $NO_2$ $g^{-1}$ sorbentu a dla zeolitu Na-X-FA wzrost wyniósł 1,69 mg $NO_2$ $g^{-1}$ sorbentu. Najwyższą pojemność sorpcyjną względem $NO_2$ charakteryzował się zeolit Na-A-FA przy stężeniu gazu reakcyjnego o stężeniu 50ppm $NO_{2/}N_2$.

Tabela 1. Zestawienie wyników pojemności sorpcyjnej sorbentów

Table 1. The results of sorption capacity of sorbents

| Nazwa próbki | $C_{NO2/N2}$ | $T_{wyg.}$=100°C | $T_{wyg.}$=350°C |
|---|---|---|---|
| Na-A-FA | 50 ppm | - | 7,77 |
| Na-X-FA | 50 ppm | - | 0,039 |
| Na-A-FA | 110 ppm | 4,59 | 6,77 |
| Na-X-FA | 110 ppm | 4,40 | 6,09 |

## 5. Wnioski

Celem prowadzonych badań było określenie parametrów procesu adsorpcji $NO_2$ na sorbentach stałych otrzymanych z popiołów lotnych a następnie wykorzystanie adsorpcji $NO_2$ w procesie doczyszczania splin z NOx i $SO_2$. Metoda ta pozwala na doczyszczenie spalin przed utylizacją i składowaniem $CO_2$, jak również pozwala na zagospodarowanie odpadów z energetyki z korzyścią dla środowiska poprzez syntezę sorbentów na bazie popiołów lotnych. Każda z próbek charakteryzowała się zmienną pojemnością sorpcyjną $NO_2$. Najwyższą pojemnością sorpcyjną wynoszącą 7,77 mg $NO_2$ $g^{-1}$ sorbentu charakteryzował się zeolit Na-A-FA a najmniejszą zeolit Na-X-FA równą 0,039 mg $NO_2$ $g^{-1}$ sorbentu Przeprowadzone badania pozwoliły na określenie wpływu temperatury wygrzewania zeolitów na ich pojemność sorpcyjną $NO_2$, która wzrasta wraz ze wzrostem temperatury wygrzewania. Zauważono również wzrost pojemności sorpcyjnej wraz ze wzrostem stężenia gazu reakcyjnego ($NO_2$). Przedstawione badania potwierdziły, iż zeolit NA-A-FA charakteryzuje się lepszymi właściwościami sorpcyjnymi względem $NO_2$ niż zeolit NA-X-FA.

*Badania sfinansowano przez Narodowe Centrum Nauki na podstawie decyzji DEC-2011/03/B/ST8/05916.*

## Literatura

[1] IEA GHG, CO2 capture ready plants, IEA GHG, Report 2007/4, 2007.

[2] VIORICA CEBRUCEAN, IOANA IONEL, CO2 Capture from Flue Gas with Monoethanolamine, REV. CHIM. (Bucharest), 63, No. 7, 2012, 678-681.

[3] X.Xu,C.Song,R.Wincek,J.M.Andresen,B.G.Miller,.W.Scaroni, 2003. Separation of CO2 from power plant flue gas using a novel CO2 "molecular basket" adsorbent. *In:* Prepr. Am. Chem. Soc. Div. Fuel Chem. 48, pp. 162-163.

[4] G. Pipitone and O. Bolland, Environ. Prog. Sustain. Energy, 2008, 28, 20.

[5] Fateme Rezaei, Ali A. Rownaghi, Saman Monjezi, Ryan P. Lively, and Christopher W. Jones, $SO_x/NO_x$ Removal from Flue Gas Streams by Solid Adsorbents: A Review of Current Challenges and Future Directions, *Energy Fuels*, 2015, *29* (9), pp 5467–5486.

[6] A.Sciubidło,W.Nowak, Novel sorbents for flue gas purificatio, Journal of Power Technologies 92,(2),(2012) 115–126.

[7] H.L. Chang, C.M. Chun, I. A. Aksay, W.H.Shih, Conversion of Fly Ash into Mesoporous Aluminosilicate, *Ind. Eng. Chem. Res.*, 1999, 38 (3), pp. 973–977.

[8] P. Kumar, N. Mal, Y. Oumi, K. Yamanaa, T. Sano, Mesoporous materials prepared using coal fly ash as the silicon and aluminium source, J. Mater. Chem., 2001, 11, pp. 3285–3290.

[9] I.Majchrzak-Kucęba, A. Ściubidło, W. Nowak, 26th Annual International Pittsburgh Coal Conference, Studies on the properties of mesoporous materials derived from polish fly ashes, Materiały Konferencyjne, Pittsburgh, 20-23 September 2009.

[10] I.Majchrzak-Kucęba, A. Ściubidło, W. Nowak, Characterization of Zeolites from Polish Fly Ashes. 26th Annual International Pittsburgh Coal Conference, Studies on the properties of mesoporous materials derived from polish fly ashes, Materiały Konferencyjne, Pittsburgh, 20-23 September 2009.

[11] A. Ściubidło, W. Nowak Doczyszczanie spalin z tlenków azotu przy użyciu sorbentów z popiołów lotnych, Polska Inżynieria Środowiska Prace. Pod red. Marzenna Dudzińska, Artur Pawłowski. T.1, s.299-305, Lublin, 2012.

[12] I.Majchrzak-Kucęba, A. Ściubidło, W. Nowak , Utilization of Fly Ash from Polish Power Plants and Thermal-Electric Power Stations Through the Modification of Ash Into Mesoporous Materials. International Conference EuroCoalAsh. Monograph. Ed. Tomasz Szczygielski.Warsaw, 2008, s.181-197.

[13] I.Majchrzak-Kucęba, A. Ściubidło, W. Nowak Synteza zeolitu Na-X z popiołów lotnych. Sorbenty z popiołu dla energetyki. Red. nauk. Wojciech Nowak, Józef Pacyna, Izabela Majchrzak-Kucęba. s. 39-57, Częstochowa, 2010.

[14] I.Majchrzak-Kucęba, A. Ściubidło, W. Nowak Fly Ash-Based Sorbents for Post-Combustion Capture CO2. International Conference EuroCoalAsh. Monograph. Ed. Tomasz Szczygielski.Warsaw, 2008, s. 101-110.

[15] I.Majchrzak-Kucęba, A. Ściubidło, W. Nowak Mezoporowate materiały z popiołów lotnych do separacji dwutlenku węgla ze spalin, Popioły z energetyki. Monografia. Red. Tomasz Szczygielski, s. 85-94 ,Szczecin, 2007.

[16] D.Sztekler, I.Majchrzak-Kucęba, W.Nowak, ; Analysis of the chemical composition of coal fly ash for synthesis zeolite Na – A ; PAN, vol. 58, Tom1., str. 313-320, 2009.; (2009).

[17] A.Ściubidło, I.Majchrzak-Kucęba,W. Nowak, Influence of the chemical composition of the fly ashes on the efficiency of the synthesis zeolites Na-X, PAN; vol.59; (2009); str. 225-237.

[18] W.Nowak, A.Ściubidło, Synteza mezoporowatego sita MCM-41 z popiołów lotnych do usuwania tlenków azotu, XVI Międzynarodowa Konferencja Popioły z energetyki, 21-24 październik 2009, Zakopane, str.371-383.

## AN INNOVATIVE METHOD FOR UTILIZATION OF FLY ASH

**S u m m a r y**

The article presents studies the adsorption of $NO_2$ on zeolites obtained from fly ash. The aim of the study is to determine the parameters of the adsorption of $NO_2$ on solid sorbents. The proposed method allows for purifying of the exhaust before capture and storage of $CO_2$. It allows utilization of waste from power plants through the synthesis of sorbents from fly ash. Obtained zeolite Na-A and Na-X are used in adsorption of NO2. Varying parameters adsorption of $NO_2$ was the heating temperature of the zeolite before the adsorption process and the concentration of the reaction gas $NO_2$.

**Keywords:** $NO_2$, sorbents, fly ash, Na-A, Na-X

DOI:10.7862/rb.2016.230

*Przesłano do redakcji: 13.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 477-488

**Tomasz ŚWIĘTOŃ**[1]

# TRANSFORMACJA ODWROTNA W REGULARNEJ SIATCE KOREKT JAKO METODA TRANSFORMACJI POMIĘDZY PAŃSTWOWYMI UKŁADAMI ODNIESIEŃ PRZESTRZENNYCH

Regularna Siatka Korekt stanowi znaną na świecie metodę transformacji pomiędzy układami odniesień przestrzennych. W Polsce jest wykorzystywana do transformacji pomiędzy układem 1965 i 2000. W artykule zaprezentowano trzy metody transformacji odwrotnej, w której przeliczenie odbywa się z układu „docelowego" do układu, w którym siatka została zdefiniowana: metodę polegającą na interpolacji w układzie wtórnym, metodę iteracyjną oraz zaproponowano metodę uproszczoną. Wykazano, że w przypadku Regularnej Siatki Korekt opublikowanej przez GUGiK, metoda uproszczona daje zadowalające dokładności.

**Słowa kluczowe:** transformacja, układy odniesienia, układy współrzędnych, regularna siatka korekt, transformacja odwrotna, grid

## 1. Regularna Siatka Korekt

Siatki interpolacyjne (modele grid) są powszechnie stosowane w rozmaitych aplikacjach systemów GIS. Zadaniem siatek jest modelowanie przestrzenne jakiegoś zjawiska w formie regularnej macierzy wartości. Wartości znajdujące się w węzłach siatki mogą, w zależności od potrzeb, reprezentować różne wielkości. Typowym przykładem siatki interpolacyjnej jest Numeryczny Model Terenu, w którym poszczególne wartości odpowiadają wysokościom powierzchni topograficznej.

Zastosowanie siatki interpolacyjnej (grid) do modelowania układów odniesienia skutkuje odmiennym od powszechnie stosowanych w Polsce metod, podejściem do transformacji pomiędzy układami odniesień przestrzennych. Metoda ta nie była dotychczas w Polsce popularna. Bazuje na wykorzystaniu regularnej siatki różnic współrzędnych pomiędzy dwoma układami i jest często wyko-

[1] Tomasz Świętoń, Politechnika Rzeszowska, WBISiA, Zakład Geodezji i Geotechniki, ul. Zelwerowicza 28e, 35-601 Rzeszów, 660594380, swieton@prz.edu.pl

rzystywana poza granicami naszego kraju [1,2,3]. Powszechne do niedawna metody bazowały najczęściej na wpasowanych w punkty dostosowania funkcjach wielomianowych i zastosowaniu korekt Hausbrandta. W 2014 roku, wraz z publikacją przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii programu Transpol 2.05, opublikowana została także Regularna Siatka Korekt modelująca deformacje układu 1965 i wykorzystywana do transformacji pomiędzy układami 1965 i 2000.

Szczegółowy opis koncepcji Regularnej Siatki Korekt można znaleźć w publikacjach kilku autorów, np. [2,4,5,6]. W ogólnym zarysie polega ona na stworzeniu co najmniej dwuwymiarowej siatki interpolacyjnej, zawierającej różnice pomiędzy parą współrzędnych w dwóch układach. Siatka taka może być również przedstawiana jako dwie siatki o identycznych parametrach. Lokalizacja węzłów obydwóch siatek i wielkości oczek są identyczne, ale wartości węzłów każdej z nich zawierają przesunięcia jednej ze współrzędnych. Osobną siatkę tworzy się dla współrzędnej X (lub B) i Y (lub L). Wartość przesunięć w transformowanym punkcie wylicza się przez interpolację wewnątrz oczka siatki.

$$X_B = X_A + dX_{A\Rightarrow B}, \qquad (1)$$
$$Y_B = Y_A + dY_{A\Rightarrow B}$$

gdzie:
$X_A$, $Y_A$ – współrzędne w układzie pierwotnym,
$X_B$, $Y_B$ – współrzędne w układzie wtórnym,
$dX_{A\Rightarrow B}$, $dY_{A\Rightarrow B}$ – korekty wyinterpolowane na podstawie Regularnej Siatki Korekt.

Znajdujące się w węzłach siatki różnice współrzędnych mogą, zależnie od przyjętej metody, być reprezentowane przez rozmaite wielkości. W najprostszym przypadku wyrażają wprost różnice współrzędnych płaskich X i Y w dwóch układach odniesienia w konkretnych, wybranych odwzorowaniach lub jedynie finalne korekty związane z deformacjami układu odniesienia. Inną, często stosowaną metodą jest wyrażenie przesunięć pomiędzy układami odniesień jako różnic pomiędzy długością i szerokością geograficzną w każdym z oczek siatki.

## 2. Transformacja odwrotna

Regularna Siatka Korekt jest zwykle zdefiniowana w układzie pierwotnym A i zawiera wartości pozwalające na interpolację poprawek, które w prosty sposób umożliwiają transformację do układu wtórnego B. Pewną trudność stanowi jednak wykonanie transformacji odwrotnej B $\Rightarrow$ A w oparciu o siatkę zdefiniowaną w układzie A. Ze względów praktycznych transformacja taka powinna być numerycznie spójna z transformacją w kierunku podstawowym A $\Rightarrow$ B, co oznacza, że jeśli wykonamy transformację z A do B przy pomocy wyinterpolowanych z siatki poprawek $dX_{A\Rightarrow B}$, $dY_{A\Rightarrow B}$ (porównaj wzór (1)) a następnie tak

otrzymane współrzędne przetransformujemy z powrotem do układu A otrzymując współrzędne $X'_A$, $Y'_A$:

$$X'_A = X_B + dX_{B\Rightarrow A} \tag{2}$$
$$Y'_A = Y_B + dY_{B\Rightarrow A}$$

w rezultacie powinniśmy otrzymać dokładnie współrzędne pierwotne w układzie A tzn:

$$X_A = X'_A \tag{3}$$
$$Y_A = Y'_A$$

Oznacza to, że mając dane współrzędne w układzie B i siatkę zdefiniowaną w układzie A należy w taki sposób określić poprawki $dX_{B\Rightarrow A}$, $dY_{B\Rightarrow A}$ aby warunek (3) był spełniony z oczekiwaną dokładnością. Przez dokładność transformacji odwrotnej rozumiemy taką wartość P, że:

$$P \leq |X_A - X'_A| \text{ i } P \leq |Y_A - Y'_A| \tag{4}$$

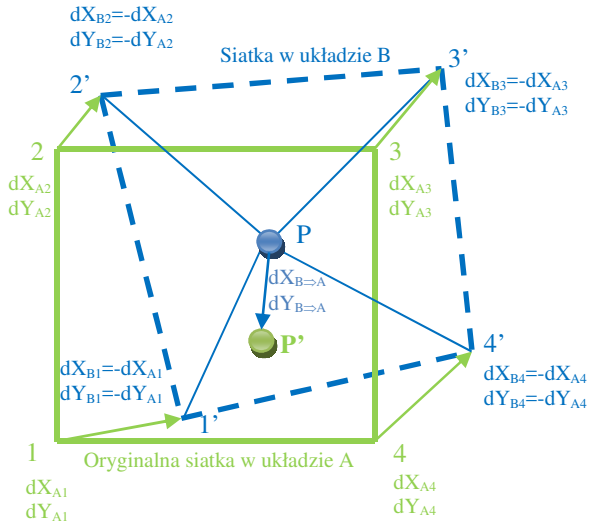
W niniejszej publikacji zaprezentowano trzy metody pozwalające na realizację tego zadania:
- interpolacja w układzie wtórnym,
- metoda iteracyjna,
- metoda uproszczona.

Metody te zostały omówione w kolejnych podrozdziałach.

## 2.1. Interpolacja w układzie wtórnym

Pierwsza z metod została wcześniej zasugerowana w [7]. Metoda ta zakłada interpolację poprawek do układu B w oczku siatki, której węzły zostały przetransformowane z układu A do układu B. Wykorzystanie tej metody wymaga zastosowania przybliżonego przeliczenia współrzędnych z układu B do A w celu identyfikacji oczka siatki, które powinno zostać przetransformowane. Jako metodę przybliżonego przeliczenia współrzędnych w przypadku transformacji pomiędzy układami 1965 i 2000 można wykorzystać np. przeliczenie bazujące na definicjach układu [8]. Transformacja samego oczka siatki odbywa się przy pomocy korekt zdefiniowanych w węźle siatki. Węzły 1,2,3,4, których współrzędne określone są w układzie A, transformowane są do punktów 1', 2', 3', 4' o współrzędnych określonych w układzie B (Rys. 1).

W tak zdefiniowanym oczku siatki interpolowane są poprawki $dX_{B\Rightarrow A}$, $dX_{B\Rightarrow A}$ pozwalające na wykonanie transformacji odwrotnej. Należy jednak pa-




Rys. 1. Schemat interpolacji w układzie wtórnym (opis w tekście) [źródło: opracowanie własne]

Fig. 1. Interpolation in second coordinate system (detailed description in text)

miętać o odwróceniu znaków korekt w poszczególnych węzłach w stosunku do wartości określonych w układzie pierwotnym.

W przypadku, gdy transformacja odwrotna jest zadaniem powtarzanym wielokrotnie, możliwe jest jednorazowe przetransformowanie i zapis całej siatki w układzie B. Unika się wtedy konieczności wykonywania przybliżonego przeliczenia współrzędnych celem zidentyfikowania oczka siatki. Proces ten może być jednak czasochłonny, szczególnie, jeśli transformacji podlegałaby siatka opracowana dla znacznego obszaru (np. dla całego kraju). Ponadto siatka przetransformowana przy pomocy korekt określających rzeczywiste deformacje układu nie jest siatką regularną (oczko siatki nie jest prostokątem). Tym samym komplikują się struktury danych, zapis i wykorzystanie takiej siatki. W odróżnieniu od siatki regularnej konieczne jest pamiętanie współrzędnych każdego z węzłów siatki. Ponadto obliczenia znacznie spowalnia proces przypisania punktu do właściwego oczka siatki. Zadanie to jest znacznie bardziej złożone dla siatki nieregularnej. W przypadku transformacji pojedynczego punktu będzie to różnica niewielka, ale podczas transformacji map numerycznych składających się często z milionów elementów może to być różnica znacząca. Tym samym trwałe budowanie siatki na potrzeby transformacji odwrotnej ma w praktyce ograniczone zastosowanie.

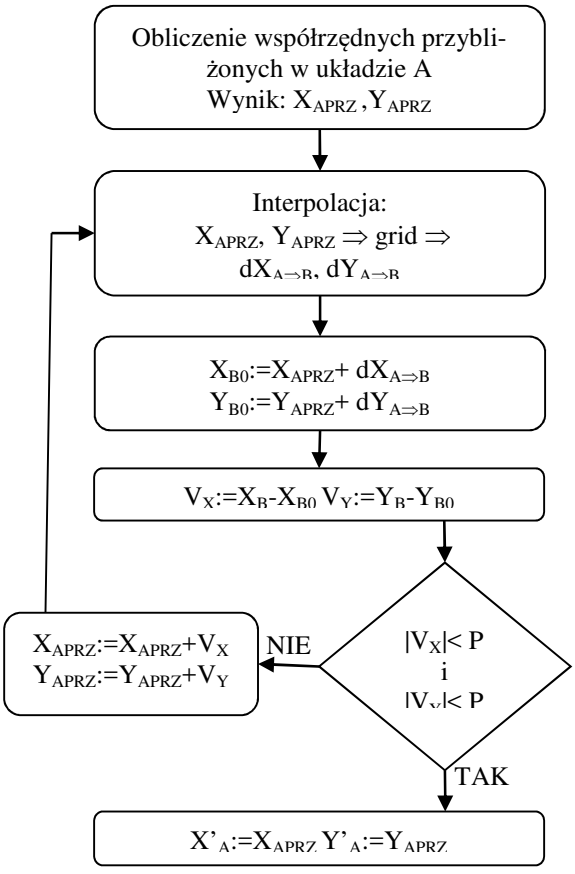
Istotną wadą tej metody jest także to, że nie wszystkie metody interpolacji nadają się do zastosowania w nieregularnym oczku siatki. Tym samym nie zawsze jesteśmy w stanie zastosować metodę interpolacji wewnątrz oczka wykorzy-

staną podczas transformacji z układu pierwotnego. W rezultacie warunek (3) nie zawsze może być spełniony, co ogranicza możliwości stosowania powyższego algorytmu.

## 2.2. Metoda iteracyjna

Kolejnym rozwiązaniem problemu transformacji odwrotnej jest metoda iteracyjna. Zakłada ona kilkakrotne wykonywanie transformacji w obie strony w celu znalezienia jak najlepszego przybliżenia transformowanych współrzędnych. Schemat obliczeń przedstawiono na rysunku 2.

Podobnie jak w poprzedniej metodzie zakładamy, że siatka jest zdefiniowana w układzie A. Poszukujemy metody pozwalającej nam na transformację współrzędnych z układu B do A. Metoda iteracyjna umożliwia znalezienie współ-




Rys. 2. Metoda iteracyjna [źródło: opracowanie własne]

Fig. 2. Iterative method

rzędnych w układzie A z dokładnością większą niż wymagana przez nas, założona a'priori wartość P.

W pierwszej kolejności konieczne jest znalezienie przybliżonych współrzędnych w układzie A ($X_{APRZ}$ , $Y_{APRZ}$). Ponownie wymaga to zastosowania jakiegoś przybliżonego algorytmu, np. przeliczenia w oparciu o definicje układów. Jeśli zdefiniowane w siatce wartości korekt są stosunkowo niewielkie (np. w siatce zdefiniowane są jedynie korekty wynikające z deformacji układu odniesienia, stanowiące tylko finalny etap całego procesu transformacji, lub w siatce zdefiniowane są wyłącznie różnice pomiędzy współrzędnymi geograficznymi na różnych elipsoidach) wówczas jako współrzędne przybliżone można przyjąć:

$$X_{APRZ} = X_B \qquad (5)$$
$$Y_{APRZ} = Y_B$$

W kolejnym kroku interpolowane są w siatce korekty $dX_{A\Rightarrow B}$, $dY_{A\Rightarrow B}$ i wykonywana jest transformacja z układu A do B ($X_{B0}$, $Y_{B0}$) zgodnie z przyjętą metodą. Następnie obliczane są różnice $V_X$, $V_Y$ pomiędzy współrzędnymi w układzie B i wartości te są porównywane z oczekiwaną dokładnością transformacji P. Jeśli wartości bezwzględne różnic są mniejsze wówczas następuje koniec obliczeń a jako wynik transformacji odwrotnej przyjmowane są współrzędne przybliżone $X_{APRZ}$, $Y_{APRZ}$. W przeciwnym wypadku współrzędne przybliżone są poprawiane o wektor $V_X$, $V_Y$, ponownie interpolowane wartości korekt w siatce i cały proces jest powtarzany tak długo, aż otrzymane współrzędne będą wystarczająco dokładne.

Podobna metoda została zaprezentowana w [3] i w chwili obecnej jest wykorzystywana podczas transformacji pomiędzy państwowymi układami NTF ⇔ RGF93. Jej niewątpliwą zaletą jest możliwość uzyskania wyników transformacji odwrotnej z założoną przez nas a'priori dokładnością. W przeciwieństwie do metody opisanej w poprzednim podrozdziale interpolacja zawsze odbywa się w regularnej siatce korekt. Unikamy dzięki temu problemów związanych ze strukturami danych siatki nieregularnej. Ponadto metoda ta jest niezależna od użytego algorytmu interpolacji wewnątrz oczka siatki. Wadą tego rozwiązania jest zastosowanie procesu iteracyjnego, co zawsze wiąże się z ryzykiem spowolnienia obliczeń.

### 2.3. Metoda uproszczona

Metoda uproszczona stanowi pewnego rodzaju modyfikację metody iteracyjnej omówionej w poprzednim podrozdziale. Zastosowanie tej metody jest możliwe, jeśli algorytm obliczenia współrzędnych przybliżonych w układzie A ($X_{APRZ}$ , $Y_{APRZ}$) jest wystarczająco dokładny aby korekty $dX_{A\Rightarrow B}$, $dY_{A\Rightarrow B}$ zostały wyliczone z zadowalającą dokładnością już w pierwszej iteracji. Innymi słowy konieczne jest znalezienie takiego algorytmu obliczenia współrzędnych przybli-

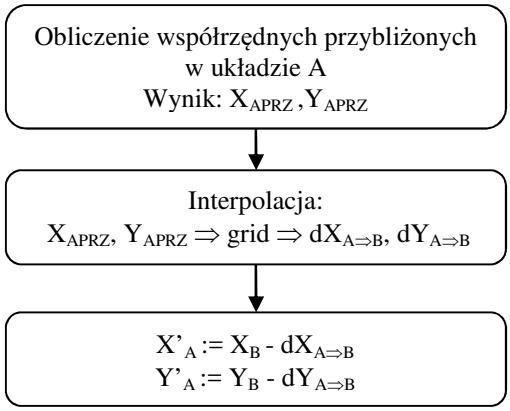
żonych, że dla konkretnej siatki i konkretnego algorytmu interpolacji wewnątrz oczka siatki zawsze spełnione są warunki:

$$|V_X| < P \qquad (6)$$

$$|V_Y| < P$$

Przy takim założeniu transformacja może zostać wykonana w trzech krokach przedstawionych na rysunku 3.

Podobnie jak w metodzie iteracyjnej, w pierwszym kroku obliczane są współrzędne przybliżone w układzie A. Następnie interpolowane są korekty do układu $dX_{A\Rightarrow B}$, $dY_{A\Rightarrow B}$. Ponieważ przyjmuje się założenie, że dokładność określenia współrzędnych przybliżonych jest na tyle wysoka, że nie zachodzi konieczność stosowania procesu iteracyjnego, ostateczne współrzędne w układzie A można obliczyć przez zastosowanie korekt układu z przeciwnym znakiem, co stanowi trzeci, finalny etap transformacji.




Rys. 3. Metoda uproszczona [źródło: opracowanie własne]

Fig. 3. Simplified method

Zastosowanie powyższej metody wymaga:

1. Założenia a' priori oczekiwanej dokładności transformacji odwrotnej P,
2. Określenia dokładności przybliżonej transformacji odwrotnej $\delta_{PRZ}$ zastosowanej do obliczenia współrzędnych przybliżonych. Przez $\delta_{PRZ}$ rozumiana jest tutaj maksymalna różnica pomiędzy wartościami współrzędnych transformowanych przy pomocy siatki i przy pomocy transformacji przybliżonej.
3. Zdefiniowania zależności pomiędzy wartościami P i $\delta_{PRZ}$ dla danego algorytmu interpolacji wewnątrz oczka siatki i dla danej siatki. Pozwoli to na ocenę, czy algorytm wykorzystywany do transformacji przybliżonej zapewnia wystarczającą dokładność i w związku z tym, czy metoda uproszczona może być stosowana w danym przypadku.

Precyzyjne określenie zależności pomiędzy dokładnością przybliżonej transformacji $\delta_{PRZ}$ a oczekiwaną dokładnością transformacji odwrotnej P wymaga badania przebiegu zmienności funkcji, którą zamierzamy wykorzystać do interpolacji wewnątrz oczka. Celem analizy jest wyszukanie miejsca gdzie występują największe lokalne zmiany wartości poprawek i jednocześnie dokładność określenia współrzędnych przybliżonych będzie miała największy wpływ na ostateczny wynik transformacji. Sam sposób przeprowadzenia takiej analizy będzie się różnił w zależności od zastosowanej funkcji interpolacyjnej.

Warto jednak pamiętać, że w przypadku transformacji pomiędzy państwowymi układami współrzędnych względne różnice wartości w oczkach siatki będą stosunkowo niewielkie w porównaniu do rozmiaru oczka. Ponadto w siatce interpolacyjnej nie występują żadne strefy nieciągłości a sam przebieg funkcji interpolacyjnej zwykle jest łagodny. Tym samym, wyłącznie w celu oszacowania dokładności uproszczonej transformacji odwrotnej, można pokusić się o uproszczenie i założyć, że interpolacja wewnątrz oczka siatki ma charakter zbliżony do liniowego co znacząco ułatwi obliczenia.

Jeśli przyjmiemy powyższe założenie, określenie zależności pomiędzy wartościami P i $\delta_{PRZ}$ rozpoczynamy od wyszukania oczka w siatki w którym występuje największa lokalna zmienność wartości poprawek. W tym celu musimy wyszukać oczko w którym występują największe względne różnice wartości węzłów w ramach pojedynczego oczka siatki $D_{MAX}$.

Określenie wartości $D_{MAX}$ i znalezienie oczka, w którym ta wartość występuje, jest procesem stosunkowo czasochłonnym (wymaga wykonania serii prostych obliczeń dla każdego węzła), ale wykonywane jest jednorazowo dla danej siatki. Jeżeli przez $C_{(i,j)}$ oznaczymy długość wektora korekty w węźle o indeksach [i,j], wyliczonym jako:

$$C_{(i,j)} = \sqrt{dX^2_{A\Rightarrow \mathrm{B(i,j)}} + dY^2_{A\Rightarrow \mathrm{B(i,j)}}} \tag{7}$$

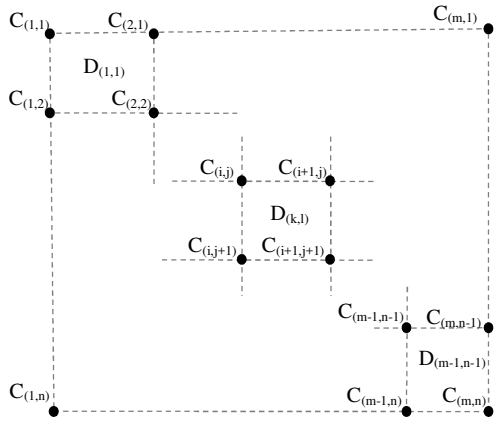
wówczas największa względna różnica wartości $D_{(k,l)}$ w oczku siatki oznaczonym [k,l] i zdefiniowanym przez cztery węzły może zostać obliczona jako:

$$D_{(k,l)} = \max(|C_{(i,j)} - C_{(i,j+1)}|; |C_{(i,j)} - C_{(i+1,j+1)}|; |C_{(i,j)} - C_{(i+1,j)}|;$$

$$|C_{(i,j+1)} - C_{(i+1,j+1)}|; |C_{(i,j+1)} - C_{(i+1,j)}|; |C_{(i+1,j)} - C_{(i+1,j+1)}|) \tag{8}$$

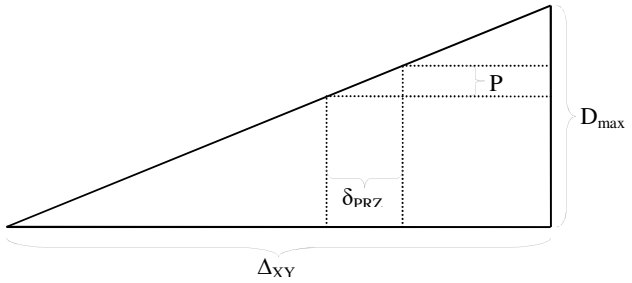
Na rysunku 4 przedstawiono oznaczenia indeksów wartości C w poszczególnych węzłach i indeksów wartości D w siatce. Przez $D_{MAX}$ rozumiana jest największa spośród wartości $D_{(k,l)}$ dla całej siatki.

Znając rozmiar oczka siatki $\Delta_{XY}$ i pamiętając, że na potrzeby niniejszych rozważań przyjęto, że interpolacja wewnątrz oczka siatki ma charakter zbliżony do liniowego możemy przyjąć, że rysunek 5 ilustruje zależność pomiędzy wartościami $\delta_{PRZ}$, $D_{MAX}$ i P.




Rys. 4. Oznaczenia indeksów wartości C i D w siatce [źródło: opracowanie własne]

Fig. 4. Indexes of values C and D in grid




Rys. 5. Zależność pomiędzy dokładnością obliczenia współrzędnych przybliżonych a dokładnością określenia korekty dla interpolacji liniowej [źródło: opracowanie własne]

Fig. 5. The relationship between the accuracy of approximate coordinates and accuracy of corrections in linear interpolation.

Z prostych, geometrycznych zależności możemy wyliczyć, że:

$$\delta_{PRZ} = \frac{P*\Delta_{XY}}{D_{MAX}} \tag{9}$$

Z powyższej zależności wynika, że jeżeli będziemy w stanie obliczyć współrzędne przybliżone z dokładnością większą niż tak określone $\delta_{PRZ}$ i znając wartość $D_{MAX}$ będziemy mogli zastosować uproszczoną metodę interpolacji odwrotnej.

Stosując metodę uproszczoną do siatki transformacyjnej opublikowanej przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii [7], stanowiącej element programu Transpol 2.05, musimy pamiętać, że siatka ta jest zdefiniowana bezpośrednio we

współrzędnych geograficznych-geodezyjnych na elipsoidzie Krassowskiego. Najłatwiejszym sposobem obliczenia współrzędnych przybliżonych $B_{KRAS}$, $L_{KRAS}$ na elipsoidzie Krassowskiego jest transformacja matematyczna w oparciu o definicje obu układów. Maksymalne deformacje układu „1965" i, tym samym, deformacje obliczonych tą metodą współrzędnych $B_{KRAS}$, $L_{KRAS}$, nie przekraczają wartości $\delta_{PRZ} \leq 0.00001446^{\circ}$. Analiza otrzymanej siatki przy pomocy wzorów (7) i (8) wskazuje, że wartość bezwzględna maksymalnych różnic pomiędzy sąsiednimi oczkami wynosi $D_{MAX} = 0.00000536^{\circ}$. Aby określić dokładność przybliżonej interpolacji odwrotnej w siatce przekształcamy wzór (9) otrzymując:

$$P = \frac{D_{MAX} * \delta_{PRZ}}{\Delta_{XY}} \tag{10}$$

Rozmiar oczka tej konkretnej siatki to $\Delta_{XY} = 0.01^{\circ}$. Podstawiając wszystkie wartości do wzoru otrzymujemy dokładność odwrotnej interpolacji $P=0.0000000077^{\circ} \approx 0.0007$m. Można więc stwierdzić, że dokładność interpolacji odwrotnej metodą przybliżoną, przy obliczeniu współrzędnych przybliżonych $B_{KRAS}$, $L_{KRAS}$ transformacją matematyczną $B_{GRS}$, $L_{GRS} \Rightarrow B_{KRAS}$, $L_{KRAS}$, jest poniżej 1 mm. Oznacza to, że w praktyce, dla zdecydowanej większości zadań metoda uproszczona jest skuteczna w siatce opublikowanej przez GUGiK jeśli współrzędne przybliżone w układzie A określimy bazując jedynie na matematycznych definicjach obu układów.

## 3. Wnioski

Transformacja pomiędzy układami odniesień przestrzennych jest zadaniem często realizowanym w codziennej praktyce geodezyjnej, ale transformacja w oparciu o Regularną Siatkę Korekt dotychczas nie była rozwiązaniem powszechnie stosowanym w Polsce. Wraz z opublikowaniem przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii Regularnej Siatki Korekt umożliwiającej transformację pomiędzy układem 1965 i 2000, zadanie to z pewnością będzie realizowane częściej. Transformacja w oparciu o opublikowaną siatkę może być wykonywana przy pomocy dedykowanego programu Transpol 2.06, ale też innych, autorskich aplikacji. Opracowanie takiego programu wymaga użycia jednego z dostępnych algorytmów transformacji odwrotnej.

Zarówno metoda iteracyjna, metoda uproszczona jak i metoda polegająca na interpolacji w układzie wtórnym pozwalają na poprawne wykonanie transformacji odwrotnej, ale występują pomiędzy nimi pewne różnice. Do najistotniejszych należą: możliwość wykorzystania dowolnych algorytmów interpolacji wewnątrz oczka siatki, szybkość, z jaką realizowane są obliczenia, oraz dokładność uzyskiwanych wyników. Na uwagę zasługuje zaproponowana metoda uproszczona. Metoda ta zakłada, że wykorzystywany do transformacji algorytm

obliczenia współrzędnych przybliżonych w układzie, w którym zdefiniowana jest Regularna Siatka Korekt, jest wystarczająco dokładny, aby wyinterpolowane korekty mogły zostać wykorzystane do prostej transformacji odwrotnej z dokładnością oczekiwaną w większości praktycznych zadań geodezyjnych. Zastosowanie tej metody wymaga jednak oszacowania wymaganej dokładności algorytmu obliczenia współrzędnych przybliżonych. Jest to proces czasochłonny, ale wystarczy wykonać go jednorazowo dla każdej siatki. W rezultacie, tak wykonana transformacja odwrotna jest bardzo prosta w implementacji, a obliczenia mogą zostać wykonane bardzo szybko, co może być istotne, jeśli mamy do czynienia z dużą ilością danych lub transformacją wykonywaną w czasie rzeczywistym.

Analiza opublikowanej przez GUGiK Regularnej Siatki Korekt dla układu 1965 wskazuje na możliwość zastosowania, jako algorytmu obliczenia współrzędnych przybliżonych, przeliczenia wyłącznie w oparciu o matematyczne definicje obu układów. Tak wykonana transformacja odwrotna zapewnia wykonanie obliczeń z dokładnością większą niż 1 mm, co spełnia większość wymagań praktycznych tradycyjnej geodezji.

## Literatura

[1] NGS 2010. *NADCON v4.2 User Manual* National Geodetic Survey 2010.
[2] Junkins D. R., Farley S.A. 1995. *NTv2 National Transformation Version 2. User's Guide.* Geodetic Survey Division Geomatics Canada.
[3] IGN 1997. *Grille de parameters de transformation de coordonnees GR3DF97A. Notice d'utilisation*. Institut Geographique National.
[4] Dewhurst W. T. 1990. *NADCON, The application of minimum-curvature-derived surfaces in transformation of positional data from the North American Datum of 1927 to the North American Datum of 1983* National Oceanic And Atmospheric Administration.
[5] Świętoń T. 2014a. *Regularna Siatka Korekt układu 1965.* Przegląd Geodezyjny 8/2014.
[6] Świętoń T. 2014b. *Optymalizacja korekt lokalnych w zadaniach transformacji pomiędzy układami kartograficznymi na przykładzie układów 1965 i 2000.* Rozprawa doktorska. AGH Kraków, Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska 20 marzec, 2014.
[7] Kadaj R., Świętoń T. 2012. *Transpol w wersji 2.0. Program transformacji i przeliczeń współrzędnych pomiędzy różnymi układami w Państwowym Systemie Odniesień Przestrzennych. Opis metod, algorytmów i oprogramowania*. Materiały niepublikowane. Opracowanie firmy AlgoRes-soft dla GUGIK.
[8] Kadaj R. 2001. *Formuły odwzorowawcze i parametry układu współrzędnych. Wytyczne Techniczne G-1.10* GUGiK.

## THE INVERSE TRANSFORMATION IN A REGULAR GRID AS A METHOD OF TRANSFORMATION BETWEEN THE NATIONAL DATUMS

**S u m m a r y**

Grid of datum corrections is a well known method of transformation between the national datums. In Poland it is used for transformation between 1965 and 2000 coordinate systems. In this paper three methods of inverse transformation are described. By inverse transformation is meant a calculation from "target" coordinate system to coordinate system in which grid is defined. Interpolation in second coordinate system and iterative method are presented and simplified method is proposed. Is was proofed that for grid published by GUGiK simplified method gives satisfactory results.

**Keywords:** transformation, datum, coordinate system, grid, inverse transformation

DOI:10.7862/rb.2016.231

*Przesłano do redakcji: 13.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 489-496

**Jarosław TATARCZAK**[1]
**Jarosław SIKORA**[2]

# KONWERSJA ENERGII SŁONECZNEJ W ELEKTRYCZNĄ Z WYKORZYSTANIEM FOTONOWO WZMOCNIONEJ TERMOEMISJI ELEKTRONOWEJ

W pracy przedstawiono sposób generacji energii elektrycznej w oparciu o fotonowo wzmocnioną termoemisję elektronową (ang. *photon-enhanced thermionic emission* - PETE), w której do przetwarzania energii promieniowania słonecznego w elektryczną wykorzystuje się zjawiska fotowoltaiczne i termoemisji elektronowj. Zaletą rozwiązania jest relatywnie wysoka sprawność energetyczna względem klasycznych metod wytwarzania energii elektrycznej, w tym, konwersji fotowoltaicznej (PV). W pracy przedstawiono podstawy działania PETE, obecny stan badań oraz dokonano analizy porównawczej konwersji PV i PETE.

**Słowa kluczowe:** przetwornik fotowoltaiczny, termoemisja elektronowa, PETE, energetyka słoneczna

## 1. Wprowadzenie

Dominującym źródłem do wytwarzania energii elektrycznej na świecie jest energia pozyskiwana z surowców kopalnych, między innymi węgla, materiałów rozszczepialnych. Proces realizacji konwersji energii cieplnej w elektryczną wymaga stosowania szeregu urządzeń, między innymi, pomp wodnych, turbin parowych, prądnic a w przypadku elektrowni jądrowych – reaktorów oraz zaawansowanych układowo i technologicznie systemów zabezpieczeń. Wraz ze wzrostem liczby podzespołów obniżają się sprawność systemu oraz jego niezawodność z powodu np. zużycia podzespołów ruchomych. Rozwiązaniem tych problemów mogą być metody wytwarzania energii elektrycznej, w których nie stosuje się podzespołów ruchomych np. konwertery fotowoltaiczne lub termoemisyjne. Ogniwo fotowoltaiczne (ang. *photovoltaic* - PV),stanowiące złącze p-n,

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Jarosław Tatarczak, Politechnika Lubelska, Katedra Automatyki i Metrologii, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin; jaroslaw.tatarczak@gmail.com
[2] Jarosław Sikora, Politechnika Lubelska, Katedra Automatyki i Metrologii, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin

generuje napięcie pod wpływem strumienia fotonów, których energia jest większa od przerwy energetycznej półprzewodnika. W przypadku dołączenia zewnętrznego obciążenia do zacisków obszarów p i n, następuje przepływ prądu elektrycznego, którego maksymalną gęstość natężenia, $J_{max}$, można opisać poniższą zależnością [1]:

$$J_{\max} = qN_f \tag{1}$$

gdzie: $q$ – ładunek elementarny, $N_f$ – liczba fotonów o energii większej niż przerwa energetyczna półprzewodnika, padających na jednostkową powietrznię czynną w jednostkowym czasie.

Wraz ze wzrostem temperatury ogniwa maleje napięcie wyjściowe i sprawność konwersji. Jest to istotna wada, zwłaszcza w sezonie letnim, który jest najbardziej nasłonecznioną porą roku na półkuli północnej Ziemi.

Termoemisyjne konwertery energii (ang. TEC - *Thermionic energy converters*), mogą być wykorzystane do przekształcenia energii cieplnej w elektryczną. Prosty konwerter składa się z gorącej katody i zimnej anody umieszczonych w środowisku próżni. Jeżeli elektron w obszarze katody, posiada energię większa niż praca wyjścia materiału katody, nastąpi jego emisja w kierunku anody. W przypadku połączenia zacisków katody i anody w obwodzie popłynie prąd elektryczny. Gęstość prądu nasycenia zależy od pracy wyjścia materiału katody oraz jej temperatury i jest opisana równaniem Richardsona-Dushmana [2]:

$$J = A \cdot T_K^2 e^{-\phi_K / kT_K} \tag{2}$$

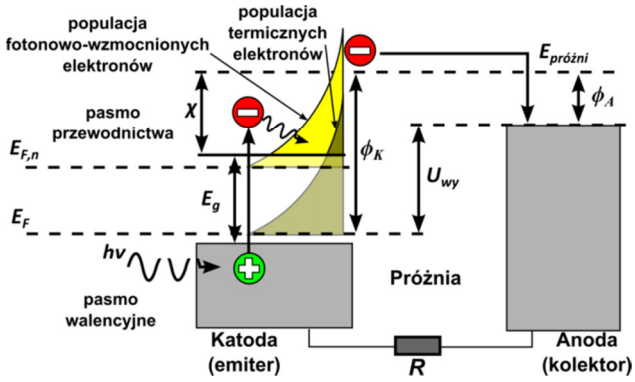
gdzie: $A$ – stała Richardsona, $T_K$ – temperatura katody, $\phi_K$ – praca wyjścia katody, $k$ – stała Boltzmana.

Termoemisyjne konwertery energii znalazły zastosowanie w programach kosmicznych, jednak nie zostały upowszechnione w zastosowaniach cywilnych.

Rozwiązaniem problemu nagrzewania i spadku sprawności ogniw PV może być zastosowanie konwertera PETE [2], który wykorzystuje zarówno efekt fotoelektryczny wewnętrzny jak i zjawisko termoemisji elektronowej. W tej sytuacji wzrost temperatury ogniwa jest potencjalnie korzystny, ponieważ zwiększa udział termoemisji elektronowej w bilansie energetycznym. Konwerter PETE został opatentowany w 2010 roku [3]. Samo zjawisko termoemisji elektronowej było już wzmiankowane w 1873 roku przez brytyjskiego naukowca Fredericka Guthrie'a, dopiero jednak w 1923 roku prace nad tym zjawiskiem zostały wyróżnione nagrodą Nobla dla Owen Richardsona, również brytyjskiego naukowca. Źródła elektronów z gorącą katodą, wykorzystujące termoemisję elektronową, są stosowane w wielu urządzeniach technicznych [4,5]

## 2. Fotonowo wzmocniona termoemisja elektronowa

Konwerter (ogniwo) PETE w swoim działaniu wykorzystuje zjawiska fotowoltaiczne wewnętrzne i termoemisji elektronowej. Zbudowany jest z półprzewodnikowej katody i metalowej anody, oddzielonych od siebie próżnią lub gazem (np. pary cezu). Na Rys. 1 przedstawiono schemat pasm energetycznych konwertera.




Rys. 1. Schemat pasm energetycznych konwertera PETE (Schwede i inni, 2010) (J.Schwede, Melosh i Shen, 2010), $hv$ – kwant światła, $E_g$ – przerwa energetyczna, $E_F$ – poziom Fermiego, $E_{F,n}$ – quasi poziom Fermiego, $\chi$ – powinowactwo elektronowe, $\phi_K$ – praca wyjścia katody, $\phi_A$ – praca wyjścia anody, $U_{wy}$ – napięcie wyjściowe, odłożone na obciążeniu $R$. Na podstawie [2,3]

Fig. 1. Band diagram of PETE converter, $hv$ - a quantum of light, $E_g$ - energy bandgap, $E_F$ - Fermi level, $E_{F,n}$ - quasi Fermi level, $\chi$ – electron affinity, $\phi_K$ – cathode work function, $\phi_A$ – anode work output, $U_{wy}$ - voltage that can be set aside for the receiver $R$. Figure based on: [2,3]

Elektrony w paśmie walencyjnym, pod wpływem zaabsorbowanych fotonów o energii $h\nu$ większej od przerwy energetycznej $E_g$, są wzbudzane do pasma przewodnictwa, dzięki czemu znacząco wzrastają ich koncentracja i poziom quasi-Fermiego, którego wartość można opisać następującą zależnością [6]:

$$E_{F,n} = E_F + kT_K \ln \frac{n}{n_{ref}} \tag{3}$$

gdzie: $E_{F,n}$ – poziom quasi – Fermiego, $E_F$ – poziom Fermiego (Rys. 1), $n$ - koncentracja elektronów w paśmie przewodzenia po iluminacji półprzewodnika, $n_{ref}$ – koncentracja elektronów bez iluminacji, w stanie równowagi termodynamicznej.

W celu uproszczenia opisu, w rozważaniach pomija się wpływ ładunku przestrzennego, co jest uzasadnione dla małych odległości międzyelektrodowych oraz wpływ temperatury na szerokość przerwy energetycznej półprzewodnika.

Nadwyżka energii fotonów, w stosunku do przerwy energetycznej $E_g$, jest przekazywana sieci krystalicznej w procesie termalizacji, w formie energii cieplnej.

Elektrony, których energia jest większa od energii powinowactwa elektronowego $\chi$ materiału katody są emitowane do próżni i odbierane na anodzie. Napięcie wyjściowe, zgodnie ze schematem przedstawionym na Rys. 1, jest równe:

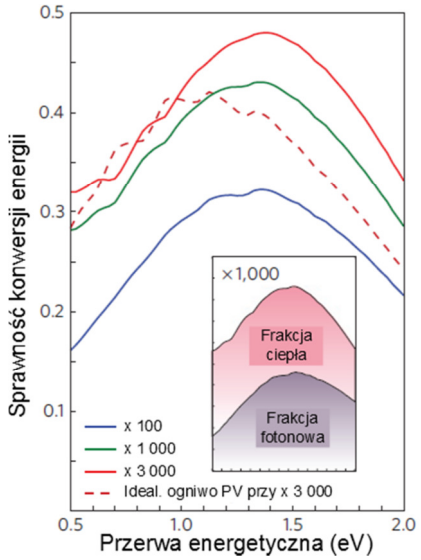
$$U_{wy} = \phi_K - \phi_A \tag{4}$$

Gęstość natężenia prądu nasycenia, przy założeniu, że gęstość natężenia prądu anody jest pomijalnie mała, $J_A << J_K$, można opisać zależnością:

$$J_K = AT_K^2 \exp\left(\frac{-\left(\phi - \left(E_{F,n} - E_F\right)\right)}{kT_K}\right) \tag{5}$$

Jak widać wzrost wartości poziomu quasi – Fermiego, wskutek wzrostu koncentracji fotoelektronów w paśmie przewodnictwa (wzór (3)), zwiększa gęstość natężenia prądu termoemisji elektronowej. Dla ogniw PETE wskazane jest by praca wyjścia $\phi_K$ katody wynosiła 1,4 eV, podobnie jak w przypadku ogniw PV [1,3,7], natomiast praca wyjścia anody $\phi_A$ powinna być jak najmniejsza aby uzyskać maksymalne napięcie wyjściowe.

Na Rys. 2 są przedstawione zależności sprawności ogniwa PETE w funkcji wartości przerwy energetycznej materiału katody oraz sprawność ogniwa PV.

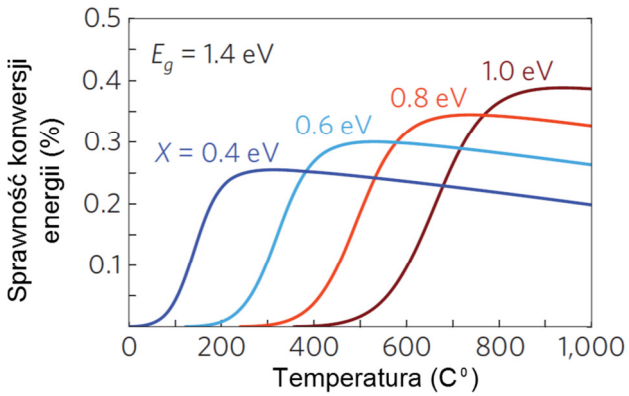



Rys. 2. Zależność sprawności ogniwa PETE (GaN) w funkcji przerwy energetycznej, *Eg*, dla zadanych koncentracji światła: x100, x1 000, x3 000 oraz idealnego ogniwa PV. Na podstawie [2]

Fig. 2. Dependence of the efficiency of the PETE (GaN) cell of the energy bandgap *Eg* including the appropriate concentration of the light: x100, x1 000, x3 000 and comparison to an ideal PV cells at its x3 000 concentration. Figure based on [2]

Na podstawie przedstawionych wykresów można ocenić, iż optymalny zakres wartości przerwy energetycznej, dla którego sprawność jest największa wynosi od 1,1eV do 1,7eV, dla przyjętej temperatury anody $T_A = 450K$.

Konwersja PETE może być realizowany w niższych temperaturach, niż w konwerterach typu TEC. Dobierając odpowiednie energie powinowactwa elektronowego materiału katody, można określić punkt pracy konwertera, dla którego sprawność przyjmuje wartości maksymalne. Zależność sprawności konwersji PETE w funkcji temperatury, dla zadanych wartości energii powinowactwa elektronowego, $\chi$, jest przedstawiona na Rys. 3.




Rys. 3.Zależności sprawności konwersji PETE w funkcji temperatury, dla zadanych wartości powinowactwa elektronowego $\chi$ i koncentracji światła x1000. Na podstawie [2]

Fig. 3. The dependence of the efficiency of the PETE cell of the cathode including electron affinity $\chi$ energy. Figure based on [2]

Wraz ze spadkiem energii powinowactwa elektronowego zmniejsza się temperatura pracy konwertera, przyporządkowana maksymalnej sprawności konwersji. Jako warstwy emisyjne katody wykorzystywane są, między innym, bor i cez.

W tabeli 1 przedstawiono, w sposób syntetyczny, porównanie wybranych właściwości ogniw PETE i PV.

Obecnie w literaturze (od 2010 roku) można dostrzec trzy istotne kierunki badań:

- modelowanie i optymalizacja procesu PETE [7,8,9,10,11],
- dobór materiałów elektrod konwertera [12,13.14,15],
- poszukiwanie metod ograniczenia wpływu ładunku przestrzennego na pracę konwertera [16,17,18,19].

Tabela 1. Porównanie właściwości ogniw PETE i PV

Table 1. Comparison of PETE and PV cells

| PETE | PV |
|---|---|
| Katoda–półprzewodnik, anoda–metal | Katoda–półprzewodniku, anoda–półprzewodnik |
| Przestrzeń międzyelektrodowa–próżnia lub np. pary cezu | Brak przestrzeni separującej–złącze p–n |
| Wysoka temperatura pracy | Relatywnie niska temperatura pracy |
| Wzrost temperatury–wzrost sprawności | Wzrost temperatury–spadek sprawności |
| Wymaga silnej koncentracji światła (nawet x1000) | Nie jest konieczna koncentracja światła |
| Wymaga systemu śledzenia pozycji Słońca | Nie wymaga systemu śledzenia pozycji słońca |
| Praca w układzie hybrydowym np. z silnikiem Stirlinga | Praca w układzie hybrydowym np. system grzewczy |

## 3. Podsumowanie

Fotonowo wzmocniona termoemisja elektronowa jest procesem, który łączy, w aspekcie przyczynowo skutkowym, zjawiska fotowoltaiczne i termoemisji elektronowej. Emisja elektronu w obszar próżni a następnie do anody odbywa się kosztem części energii fotonu potrzebnej do wzbudzenia elektronu z pasma walencyjnego do pasma przewodnictwa oraz części energii fotonu, w formie energii termicznej, niezbędnej do pokonania przez elektron bariery energetycznej, określonej energią powinowactwa elektronowego materiału katody. W ten sposób, przy wykorzystaniu zjawiska termoemisji elektronowej, energię kwantów światła wykorzystuje się w znacząco wyższym stopniu w porównaniu z przetwarzaniem fotowoltaicznym [20]. Opracowanie metody eliminacji wpływu ładunku przestrzennego na pracę konwertera oraz wdrożenie technologii fotonowo wzmocnionej termoemisji elektronowej umożliwi produkcję wysokosprawnych solarnych systemów generacji energii elektrycznej.

### Literatura

[1] Olchowik J. M.: Cienkie warstwy w strukturach baterii słonecznych, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Lubelskiej, Lublin 2006.

[2] Schwede J. W., Bargatin I., Riley D. C., Hardin B. E., Rosenthal S. J., Sun Y., Schmitt F., Pianetta P., Howe R. T., Shen Z., Melosh N. A.: Photon-enhanced thermionic emission for solar concentrator systems, Nature Materials, 2010, pp. 762-767.

[3] Schwede J. W., Melosh, N. A., Z. Shen Z.: Photon enhanced thermionic emission. USA Patent US 20100139771 A1, 2010.

[4] Sikora J.: Dekorelacja natężenia wiązki jonizującej i energii elektronów w źródłach jonów z gorącą katodą, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2004, pp. 1-77.

[5] Sikora J., Hałas S.: A novel circuit for independent control of electron energy and emission current of a hot cathode electron source, Rapid. Commun. Mass Spectrom., nr 25, 2011, pp. 689-692.
[6] Wurfel P.: Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts, Wiley-VCH, Weinheim 2009.
[7] Segev G., Rosenwaks Y., Kribus A.: Limit ofefficiency for photon-enhanced thermionic emission vs. photovoltaic and thermal conversion, Solar Energy Materials & Solar Cells, nr 140, 2015, pp. 464-476.
[8] Reck K., Hansen O.: Thermodynamics of photon-enhanced thermionic emission solar cells, Applied Physics Letters, nr 104, 2014.
[9] Yang Y., Yang W., Sun C.: Diffusion emission model for solid-state photon-enhanced thermionic emission solar energy converters, Materials Science in Semiconductor Processing, nr 35, 2015, pp. 120-126.
[10] Varpula A., M. Prunnila: Diffusion-emission theory of photon enhanced thermionic emission solar energy harvesters, Journal Of Applied Physics, nr 112, 2012.
[11] Wang Y., Su S., Liu T., Su J. C. G.: Performance evaluation and parametric optimum design of an updated thermionic-thermoelectric generator hybrid system, Energy, nr 90, 2015, pp. 1575-1583.
[12] Tang W., Yang W., Yang Y., Sun C.: GaAs film for photon-enhanced thermionic emission, Materials Science in Semiconductor Processing, nr 25, 2013, pp. 143-147.
[13] Segev G., Rosenwaks Y., Kribus A.: Loss mechanisms and back surface field effect in photon enhanced thermionic emission converters, Journal Of Applied Physics, nr 114, 2013.
[14] Su S., Wang Y., Wang J., Xu Z., Chen J.: Material optimum choices and parametric design strategies of a photon-enhanced solar cell hybrid system, Solar Energy Materials & Solar Cells, nr 128, 2014, pp. 112-118.
[15] Zhuravlev A. G., Romanov A. S., Alperovich V. L.: Photon-enhanced thermionic emission from p-GaAs with nonequilibrium Cs overlayers, Applied Physics Letters, nr 105, 2014.
[16] Ito T., Cappelli M. A.: Optically pumped cesium plasma neutralization of space charge in photon-enhanced thermionic energy converters, Applied Physics Letters, nr 101, 2012.
[17] Meir S., Stephanos C., Geballe T. H., Mannhart J.: Highly-efficient thermoelectronic conversion of solar energy and heat into electric power, Journal Of Renewable And Sustainable Energy, nr 5, 2013.
[18] Su S., Wang Y., Liu T., Su G., Chen J.: Space charge effects on the maximum efficiency and parametric design of a photon-enhanced thermionic solar cell, Solar Energy Materials & Solar Cells, nr 121, 2013, pp. 137-143.
[19] Green M. A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E. D.: „Solar cell efficiency tables (version 46), Progress In Photovoltaics: Research And Applications, nr 23, 2015, pp. 805-812.
[20] Sikora J.: Układ stabilizacji natężenia prądu termoemisji elektronowej i napięcia przyspieszającego elektrony zwłaszcza dla wysokich energii elektronów, Patent PL 219991, 2015.

## CONVERSION OF SOLAR ENERGY INTO ELECTRICITY USING PHOTON ENHANCED THERMIONIC EMISSION

**S u m m a r y**

The article presents new method generation of electricity by the use conversion of solar radiation. This method is the Photon-enhanced Thermionic emission - PETE, which converts solar energy into heat energy and then into electricity. The advantage of this solution is to avoid losses in relation to photovoltaic conversion (PV), resulting from the excessive heating energy converter. Presents the basics of PETE and the current state of research on this phenomenon in the world. In addition, a comparative analysis of PV conversion and PETE.

**Keywords:** PETE, thermionic emission, solar energy, heat converter

DOI:10.7862/rb.2016.232

*Przesłano do redakcji: 24.05.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 497-506

**Dawid TĄTA**[1]
**Henryk FOIT**[2]

# POSZUKIWANIE NAJKORZYSTNIEJSZEJ WIELKOŚCI OKIEN BUDYNKU PASYWNEGO

Podczas projektowania budynku, projektant musi rozwiązać wiele kluczowych problemów. Jednym z takich problemów jest ustalenie wielkości okien. Prócz rozwiązania kwestii estetycznych, należy się zastanowić jak wielkość okien będzie wpływać na bilans cieplny budynku. Zwiększanie powierzchni przeszkleń z jednej strony zwiększa straty ciepła (współczynnik *U* okna jest znacznie większy niż ściany, w której okno zlokalizowano – okno posiada mniejsze właściwości izolacyjne), z drugiej potęguje bierne zyski ciepła od promieniowania słonecznego. Zyski takie są pożądane w okresach zimnych (zmniejszają zapotrzebowanie na ciepło pomieszczenia), jednak w okresach letnich mogą powodować nadmierne przegrzewanie. Poniższa praca jest próbą wskazania wielkości okna zewnętrznego elewacji południowej budynku pasywnego. W analizach wykorzystano przykładowy model budynku, a obliczenia prowadzono przy pomocy programu ESP-r. Analizowano różne powierzchnie przeszkleń oraz różne wielkości zacienień okien elewacji południowej. Powierzchnię przeszkleń odnoszono do całkowitej powierzchni ściany zewnętrznej danego pomieszczenia – rozpatrywano przypadki, w których powierzchnia szklenia odpowiadała od 15% do 50% całkowitej powierzchni ściany. Dla każdej wielkości okna prowadzono dodatkowo obliczenia wpływu 4 wielkości zacienień: 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, a także przypadku okna niezacienionego. Badania prowadzono w kierunku określenia zapotrzebowania na energię do ogrzewania oraz chłodzenia. Zgodnie z przewidywaniami zwiększanie udziału przeszklenia ściany zmniejsza się zapotrzebowanie na ciepło pomieszczenia, jednak znacząco wzrasta zapotrzebowanie na energię do chłodzenia.

**Słowa kluczowe:** wielkość okien, budynek pasywny, ESP-r, zacienienia, gruntowy wymiennik ciepła, ogrzewanie budynku pasywnego, chłodzenie budynku pasywnego, wentylacja

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Dawid Tąta, Politechnika Śląska, Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania, ul. Konarskiego 20, 44-100 Gliwice; tel. 322372395; dawid.tata@polsl.pl

[2] Henryk Foit, Politechnika Śląska, Katedra Ogrzewnictwa, Wentylacji i Techniki Odpylania, ul. Konarskiego 20, 44-100 Gliwice

# 1. Wstęp

Projektowanie budynku wiąże się z koniecznością rozwiązania wielu problemów. Jednym z nich jest wielkość okien. Z jednej strony duże okna zapewniają dobre oświetlenie pomieszczeń promieniami słonecznymi oraz nagrzewanie pomieszczeń zlokalizowanych w południowej części budynku. Z drugiej strony przeszklenia powodują większe straty ciepła (szyby okienne cechują się niższą izolacyjnością cieplną w porównaniu do ścian), natomiast w okresie letnim mogą powodować przegrzanie pomieszczeń wynikające z przedostawania się dużej ilości promieniowania słonecznego do pomieszczeń.

Próba wskazania korzystnego stosunku wielkości okna względem powierzchni ściany zewnętrznej, w której okno zostało zlokalizowane jest tematem tego opracowania. W celu określenia optymalnej wielkości okien dla budynku pasywnego przeprowadzono symulacje numeryczne w programie ESP-r [1, 2]. W czasie symulacji zmieniano wielkość okien oraz wielkość elementów zacieniających w postaci balkonu nad parterem i strzechy dachu, tak aby uzyskać konfigurację optymalną.

# 2. Budynek

Obliczenia przeprowadzono dla budynku, który ma wiernie oddać charakterystykę budynku pasywnego. Obliczenia przeprowadzono dla wszystkich pomieszczeń budynku. Jedynym zmiennym parametrem była wielkość okien pomieszczeń znajdujących się po stronie południowej. Dodatkowo wszystkie pomieszczenia od strony południowej miały te same wymiary, różniły się jedynie położeniem. Przyjęte założenia miały na celu uniezależnienie wyników końcowych od cech specyficznych budynku.

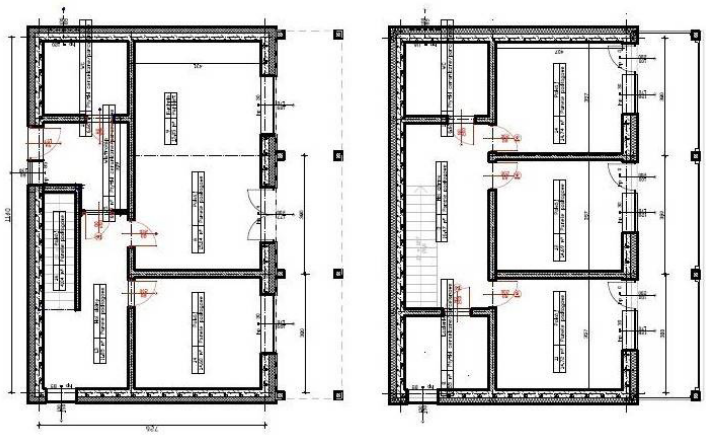
Na rysunku 1 przedstawiono rzuty kondygnacji budynku, a na rysunku 2 umieszczono wizualizację domu od strony wschodnio-południowej. Rzuty oraz wizualizację przygotowano przy pomocy programu InterSoft ArCADia START 6.5. Natomiast w tabeli 1 zestawiono powierzchnie poszczególnych pomieszczeń.

Tabela 1. Powierzchnie pomieszczeń

Table 1. Surfaces spaces

| **Parter** | | **Piętro** | |
|---|---|---|---|
| **Pomieszczenie** | **Powierzchnia** | **Pomieszczenie** | **Powierzchnia** |
| Pokój 1 | 16,40 $m^2$ | Pokój 3 | 16,40 $m^2$ |
| Pokój 2 | 16,40 $m^2$ | Pokój 4 | 16,40 $m^2$ |
| Kuchnia | 16,40 $m^2$ | Pokój 5 | 16,40 $m^2$ |
| Toaleta dolna | 7,67 $m^2$ | Toaleta górna | 7,67 $m^2$ |
| Wiatrołap | 7,99 $m^2$ | Hol górny | 13,50 $m^2$ |
| Hol dolny | 13,30 $m^2$ | Łazienka | 7,82 $m^2$ |
| Schody | 4,64 $m^2$ | | |

*schody zostały ujęte w specyfikacji pomieszczeń parteru, w stropie piętra w tym miejscu znajduje się otwór



Rys. 1. Rzuty budynku. W lewej części parter, po prawej pierwsze piętro
Fig. 1. Building project. On the left first-floor, on the right the floor



Rys. 2.Wizualizacja budynku
Fig. 2. Visualization of the building

## 2.1. Konstrukcja przegród

W czasie obliczeń wprowadzono do programu 7 własnych konstrukcji przegród oraz skorzystano z jednej domyślnej (strop pomiędzy piętrami). Konstrukcje przegród przedstawiają się następująco:

1. **Ściany zewnętrzne**

| Materiał | $\lambda$ W/(mK) | Grubość warstwy mm |
|---|---|---|
| Tynk wewnętrzny | 0,350 | 13 |
| Bloczek YTONG | 0,095 | 365 |
| Styropian | 0,040 | 250 |
| Tynk zewnętrzny | 0,840 | 15 |

Całkowita grubość przegrody wynosi 64,3 cm, a współczynnik $U = 0{,}116$ W/(m$^2$·K) – współczynnik wyznaczony przez program ESP-r.

2. **Ściany wewnętrzne**

| Materiał | $\lambda$ W/(mK) | Grubość warstwy mm |
|---|---|---|
| Tynk wewnętrzny | 0,350 | 13 |
| Cegła | 0.940 | 250 |
| Tynk wewnętrzny | 0,350 | 13 |

Całkowita grubość przegrody wynosi 27,6 cm, a współczynnik $U = 1{,}765$ W/(m$^2$·K) – współczynnik wyznaczony przez program ESP-r.

3. **Przegroda wirtualna -** zastosowana dla oddzielenia kuchni od pokoju 2 oraz oddzielenia klatki schodowej od pozostałych pomieszczeń. Domyślnie w tym miejscu nie znajduje się żadna przegroda, jednak w programie należało wprowadzić rozdział stref obliczeniowych; przegroda ta została zamodelowana jako papierowa, tak aby nie wpływała na przepływ ciepła.

4. **Podłoga na gruncie**

| Materiał | $\lambda$ W/(mK) | Grubość warstwy mm |
|---|---|---|
| Podsypka żwirowa | 0,360 | 200 |
| Folia PVC | 0,160 | 10 |
| Wełna mineralna | 0,100 | 400 |
| Folia PVC | 0,160 | 10 |
| Podkład betonowy | 1,400 | 150 |
| Folia PVC | 0,160 | 10 |
| Wełna mineralna | 0,100 | 400 |
| Wylewka z chudego betonu | 0,380 | 30 |
| Wykończenie podłogi | 1,500 | 12 |

Całkowita grubość przegrody wynosi 122,2 cm, a współczynnik $U = 0{,}108$ W/(m$^2$·K) – współczynnik wyznaczony przez program ESP-r.

5. **Szklenie okien -** szklenie zadano w programie jako zespół 3 szyb o grubości 6 mm, rozdzielonych warstwami powietrza o grubości 16 mm. Współczynnik $U = 0{,}590$ W/(m$^2$·K). Rama okienna została zamodelowana w programie z wykorzystaniem gotowej konstrukcji ramy izolowanej cieplnie.

6. **Strop pomiędzy piętrem a nieużytkowym poddaszem**

| Materiał | $\lambda$ W/(mK) | Grubość warstwy mm |
|---|---|---|
| Konstrukcja stropowa* | 0,380 | 100 |
| Styropian | 0,040 | 250 |

* - konstrukcja stropowa wybrana z bazy konstrukcji programu.

Całkowita grubość przegrody wynosi 35 cm, a współczynnik $U = 0{,}126$ W/(m$^2$·K) – współczynnik wyznaczony przez program ESP-r.

7. **Dach -** w programie ESP-r uwzględniono przegrodę o konstrukcji drewnianej, izolowanej wełną mineralną, z folią PCV i pokryciem ceramicznym. Współczynnik $U = 0{,}160$ W/(m$^2$·K).
8. **Strop między piętrami -** w obliczeniach uwzględniono gotowy strop żelbetonowy z odpowiednią izolacją cieplną i warstwami wierzchnimi. Współczynnik $U = 0{,}126$ W/(m$^2$·K).

## 3. Założenia obliczeń

Wymiary ściany zewnętrznej (elewacji) przypadającej na jedno pomieszczenie od strony południowej wynoszą 3,8 m x 2,8 m (szerokość x wysokość), co daje powierzchnię 10,64 m$^2$ w tym powierzchnia okien.

Powierzchnia szklenia okna balkonowego jest równa 1,55 m$^2$ (1,84 m x 0,84 m). Taka powierzchnia okna jest wielkością początkową w obliczeniach - powierzchnia okien na parterze została dobrana podobnie, z uwzględnieniem odsunięcia okna od gruntu oraz początkowej wysokości okna równej 1,7 m. Kolejne wielkości szkleń są ustalane na podstawie procentowego udziału szklenia. Na tej podstawie obliczano całkowitą powierzchnię szklenia.

Wartością graniczną w obliczeniach jest powierzchnia szklenia stanowiąca 50% całkowitej powierzchni południowej ściany zewnętrznej pomieszczeń. Jest to graniczna wielkość, większe udziały powierzchni okna w powierzchni ściany wymagają zwiększania wysokości okna.

Kolejne prace dla pomieszczeń na parterze i piętrze prowadzone były dwojako:

**Parter -** uzyskaną powierzchnie szklenia przyjmowano wprost jako powierzchnię szklenia okna w danym pomieszczeniu (w przypadku pokoju dziennego była to powierzchnia szklenia okna balkonowego, w pozostałych dwóch pomieszczeniach powierzchnia okna *zwykłego.*

**Piętro -** od uzyskanej powierzchni szklenia odejmowano powierzchnię szklenia okna balkonowego (wielkość stała dla wszystkich przypadków) i uzyskana różnica była powierzchnią szklenia dodatkowego okna.

W tabeli 2 podano powierzchnie szklenia okien w poszczególnych przypadkach obliczeniowych.

Tabela 2. Zestawienie powierzchni szkleń

Table 2. The specification of area glazing

| Numer przypadku | Procentowy udział szklenia | Powierzchnia szklenia |
|---|---|---|
| 1. | 14,53% | 1,55 $m^2$ |
| 2. | 20% | 2,13 $m^2$ |
| 3. | 25% | 2,66 $m^2$ |
| 4. | 30% | 3,19 $m^2$ |
| 5. | 35% | 3,72 $m^2$ |
| 6. | 40% | 4,26 $m^2$ |
| 7. | 45% | 4,79 $m^2$ |
| 8. | 50% | 5,32 $m^2$ |

**Dodatkowe założenia obliczeniowe:**

– szerokość ramy okiennej wynosi 8 cm z każdej strony;
– okna balkonowe umieszczone są 4 cm powyżej powierzchni podłogi, a okna zwykłe 30 cm powyżej podłogi;
– okna na parterze są lokalizowane centralnie w przegrodzie, w przypadku pomieszczeń na piętrze okno balkonowe jest zlokalizowane w lewej części ściany zewnętrznej (patrząc od wewnątrz pomieszczenia) odsunięte od ściany działowej o 5 cm, a okna zwykłe są niejako przedłużeniem okna balkonowego.

## 3.1. Wentylacja

Zgodnie z wytycznymi dla budynków pasywnych, w analizach założono wentylację nawiewno-wywiewną, wyposażoną w rekuperator i gruntowy wymiennik ciepła. W obliczeniach założono wentylację pomieszczeń strumieniem powietrza wentylacyjnego wymaganego ze względów higienicznych. Przyjęto pracę rekuperatora o sprawności 90%. Temperaturę powietrza nawiewanego założono jako 20°C.

Podczas wyznaczania zapotrzebowania na energię do chłodzenia pomieszczeń nie uwzględniano działania rekuperatora ani gruntowego wymiennika ciepła. Takie założenie pozwala określić zapotrzebowanie na chłód, które powinno być podstawą doboru gruntowego wymiennika ciepła. W przypadku gruntowego wymiennika ciepła omijanie przez świeże powietrze rekuperatora w okresach wysokich temperatur ma na celu uniknięcie podgrzania powietrza w rekuperatorze. Innymi słowy, gruntowy wymiennik ciepła powinien być tak zaprojektowany, aby mógł umożliwić schłodzenie powietrza odpowiadające wyznaczonemu zapotrzebowaniu na chłód.

## 3.2. Ogrzewanie i chłodzenie

Na potrzeby obliczeń programem ESP-r założono ogrzewanie oparte o indywidualne źródła ciepła dla wszystkich pomieszczeń. Przyjęto indywidualną regulację ogrzewania. Jedyną przestrzenią nieogrzewaną w budynku stanowi nieużyt-

kowe, niedostępne dla domowników poddasze. Nie przyjmowano konkretnego typu źródeł ciepła (jak grzejnik elektryczny, czy wodny). Podobne założenia podjęto dla systemu chłodzenia: każde pomieszczenie chłodzone indywidualne z indywidualną regulacją.

Zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania oraz energię potrzebną do chłodzenia są wartościami wynikowymi analizy.

### 3.3. Zacienienia

W analizach dokonano obliczeń dla różnych wielkości okien, a także rozważano wpływ zmieniających się wielkości zacienień okien elewacji południowej. Rozpatrywano zacienienia o wysięgu 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m (model startowy nie posiadał żadnych zacienień). Zacienienia tworzą balkony (zacienienie okien parteru) oraz okapu dachu - zacienienie okien pomieszczeń piętra. W programie zacienienia utworzono przy pomocy funkcji *solar obstruction* dostępnych dla poszczególnych pomieszczeń. Tak utworzone zacienienia nie wpływają na bilans strat ciepła przez przegrody - zacienienia nie uczestniczą w przekazywaniu ciepła z pomieszczenia do otoczenia.

## 4. Dane klimatyczne

Dane klimatyczne przyjęte do obliczeń odpowiadają reprezentatywnemu rokowi, opracowanemu na podstawie danych klimatycznych z 30-sto lecia. Reprezentatywne przebiegi roczne uzyskano przez zestawienie miesięcznych przebiegów, wybranych z 30 miesięcy związanych z okresem 1966 ÷ 1996. Podstawowym kryterium wyboru była średnia temperatura miesięczna porównywana ze średnimi temperaturami miesięcznymi z 30-sto lecia. Kryteriami dodatkowymi była średnia suma miesięczna promieniowania całkowitego na płaszczyznę poziomą porównywana z odpowiadającą jej średnią z wielolecia, średnia miesięczna prędkość wiatru porównywana ze średnimi z wielolecia oraz średnia miesięczna wartość amplitudy wahań dobowych temperatury porównywana z odpowiadającymi jej średnimi z wielolecia.

## 5. Wyniki obliczeń

Analizę z wykorzystaniem programu ESP-r prowadzono dwutorowo. W pierwszym przypadku obliczenia prowadzono w kierunku określenia zapotrzebowania na ciepło na potrzeby ogrzewania budynku. W tym przypadku w programie ESP-r kontrola systemu ogrzewania i chłodzenia została dobrana tak, aby ogrzewanie utrzymywało minimalną temperaturę powietrza równą 20°C (24°C w przypadku łazienki i WC). Maksymalną moc cieplną urządzenia grzewczego dla każdego pomieszczenia ustalono na stosunkowo wysokim poziomie, dzięki czemu istniała pewność, iż nie dojdzie do niedogrzania pomieszczenia. Równocześnie system chłodzenia ograniczono ustawiając wysoką temperaturę jego włączenia – dawało to pewność, iż w tych analizach system chłodzenia nie uruchomi się.

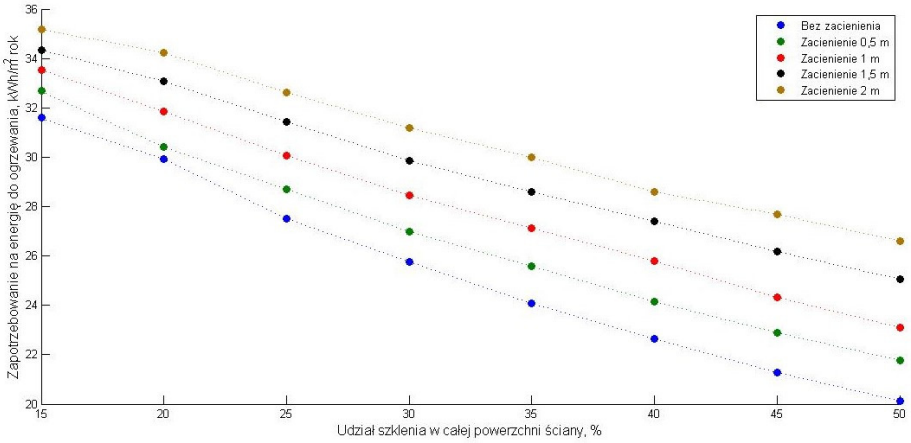
Przeprowadzono również analizę zapotrzebowania na energię na potrzeby chłodzenia. Podczas tych prac sterowanie systemu odwrócono – ustawiono parametry włączenia systemu chłodzenia tak, aby temperatura w pomieszczeniach nie przekraczała 23°C (26°C w przypadku łazienki i WC), a temperaturę uruchomienia systemu grzewczego ustalono na odpowiednio niską, dzięki czemu wyeliminowano możliwość uruchomienia ogrzewania. Temperatury dobrano zgodnie z temperaturami zamieszczonymi w normie PN-B-03421[3]. Analiza systemu chłodzenia została przeprowadzona w celu pozyskania danych do dalszych analiz, wyniki nie są decydujące o wnioskach tej pracy.

Każde pomieszczenie budynku tworzyło osobną strefę, dla której obliczano zapotrzebowanie na energię, osobno na potrzeby ogrzewania i chłodzenia.

## 5.1. Wpływ wielkości okna na zapotrzebowanie na ciepło

Uzyskane wyniki zestawiono na rysunku 3. Zgodnie z przewidywaniami, wraz z zwiększaniem powierzchni okna (dla przypadku bez zacienień) maleje zapotrzebowanie na ciepło - intensyfikowane są zyski ciepła od promieniowania słonecznego. Rezultat taki związany jest z przyjętymi współczynnikami *U* okien i przegród zewnętrznych pełnych rozpatrywanego budynku. Natomiast pojawienie się i zwiększanie zacienienia powoduje zwiększenie zapotrzebowania na energię do ogrzewania. Zacienienia zmniejszają zyski ciepła od promieniowania słonecznego, co było spodziewane.

Analizując wyniki prowadzonych obliczeń można dojść do wniosku, iż najkorzystniejszym rozwiązaniem jest maksymalna możliwa wielkość okien i brak zacienień. Taki układ może prowadzić do okresowych przegrzań pomieszczeń w okresach letnich, przeciwdziałać temu będzie gruntowy wymiennik ciepła, wspomagany układem chłodniczym - te elementy będą analizowane podczas dalszych prac.

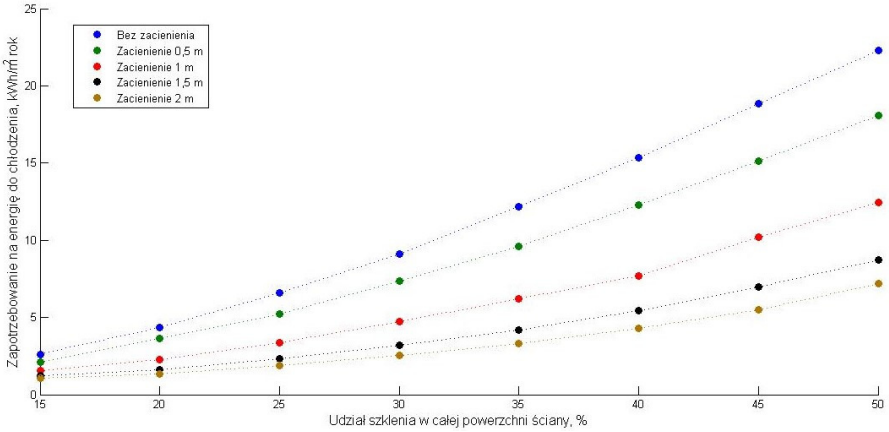



Rys. 3. Zapotrzebowanie na energię do ogrzania

Fig. 3. The demand for energy for heating

### 5.2. Wpływ wielkości okna na zapotrzebowanie na energię do chłodzenia

Równolegle prowadzone obliczenia zapotrzebowania na energię do chłodzenia dały, zgodnie z przewidywaniami, niemal całkowicie odwrotne wyniki. Rysunek 4 przedstawia układ wyników, z którego widać, iż wraz ze zwiększającą się powierzchnią okien wzrasta zapotrzebowanie na energię do chłodzenia budynku. Wprowadzenie zacienień poprawia sytuację - zapotrzebowanie na energię maleje wraz ze wzrostem zacienień.




Rys. 4. Zapotrzebowanie na energię do chłodzenia

Fig. 4. The demand for energy for cooling

Okresowemu przegrzewaniu pomieszczeń może przeciwdziałać układ chłodzenia oparty o aktywne urządzenia chłodzące lub pasywne jak np. gruntowy wymiennik ciepła. W przypadku budynku wyposażonego w odpowiednio dobrany gruntowy wymiennik ciepła, zapewniający pasywne chłodzenie wydaje się możliwe rozwiązanie problemu usuwania nadmiaru zysków ciepła przy znacznych przeszkleniach ścian. W takim rozwiązaniu minimalizowane będą koszty związane z zaopatrzeniem w ciepło, przy jednoczesnym naturalnym chłodzeniu. Ograniczeniem w tym rozwiązaniu jest dostępna wielkość gruntowego wymiennika ciepła, który miałby odpowiadać za chłodzenie. Jeśli wielkość GWC jest ograniczona należałoby wprowadzić zacienienia okien. W prezentowanej pracy zapotrzebowanie na energię do chłodzenia wyznaczano w celu określenia właściwej wielkości gruntowego wymiennika ciepła lub ewentualnego dodatkowego systemu chłodzenia.

W przeprowadzonych analizach pominięto koszty energetyczne dotyczące działania gruntowego wymiennika ciepła i rekuperatora.

## 6. Podsumowanie

Dobór wielkości okien elewacji południowej budynku pasywnego (a także energooszczędnego) jest skomplikowanym problem. Wskazanie jednoznacznego rozwiązania jest niezwykle trudne. Wybór rozwiązania ostatecznego jest zależny

od wielu czynników, wśród których należy wyróżnić: dokładne położenie geograficzne budynku (które będzie wpływać na zyski ciepła od słońca), konstrukcji budynku (izolacyjności przegród zewnętrznych),a nawet instalacji, w które budynek jest wyposażony, jak np. zastosowanie gruntowego wymiennika ciepła, czy elementy zacieniania.

Możliwe jest wskazanie orientacyjnej optymalnej wielkości okien dla konkretnego rozwiązania budynku. W przypadku budynku wyposażonego w gruntowy wymiennik ciepła, którego wymiary nie są ograniczane można dopuścić montaż okien o maksymalnej możliwej powierzchni, dodatkowo wyposażanych w aktywne zacienienie, np. w postaci rolet. Jeśli wielkość GWC jest ograniczona, najkorzystniejszego rozwiązania związane jest z przeszkleniem nie przekraczającym 40÷45% powierzchni ściany i wysięgiem elementów zacieniających o szerokości 1,5 m. Dokładnego określenia tych wielkości wymaga sprecyzowanie wielkości gruntowego wymiennika ciepła.

## Literatura

[1] The ESP-r System for Building Energy Simulation User Guide Version 10 Series, ESRU Manual U02/1, Wydawca: University of Strathclyde, 2002.

[2] Hensen, J.L.M.: On System Simulation for Building Performance Evaluation, Building Performance Simulation Association, 1995.

[3] Norma PN-B-03421:1978: Wentylacja i klimatyzacja -- Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego przebywania ludzi. *Norma wycofana.*

## RESEARCH OF OPTIMUM WINDOWS SIZE IN PASSIVE BUILDING

While designing a building, the designer has to resolve a number of key issues. One of these issues is to determine the size of windows. In addition to solving aesthetic aspect, we should ponder how the windows' size will affect the thermal balance of the building. On one hand, increasing the glazing area increases heat losses (window's U coefficient is much larger than wall's in which the window is located - window has lower insulating properties), but on the other hand it intensifies passive heat gains from solar radiation. Such gains are desired during cold periods (they reduce room's heat demand), however during summer periods they can cause excessive overheating. This research is an attempt to indicate the size of external window of passive building's south facade. In the analysis, the exemplary building model was used and the calculations were carried out with the use of ESP-r software. Various areas of glazing and windows' shading of south facade were analyzed. The glazing surface was compared with the total surface of given room's external wall - the cases in which glazing surface corresponded to 15% to 50% of wall's total surface were considered. For each window's size the additional calculations of the impact of 4 shading sizes: 0,5 m, 1 m, 1,5 m, 2 m, as well as the case of window without shading, were carried out. The research was conducted in the direction of determining energy demand for heating and cooling. As expected, increasing wall's glazing reduces room's heat demand, however, the demand for cooling energy rises.

**Keywords:** passive house, ESP-r, shading, ground heat exchanger, heating, cooling, ventilation

DOI:10.7862/rb.2016.233

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2015, s. 507-516

**Barbara TCHÓRZEWSKA-CIEŚLAK**[1]
**Dorota PAPCIAK**[2]
**Jadwiga KALETA**[3]
**Alicja PUSZKAREWICZ**[4]

# ANALIZA NIEZAWODNOŚCI STACJI UZDATNIANIA WODY

Systemy zbiorowego zaopatrzenia w wodę składają się z połączonych ze sobą elementów (podsystemów ) stanowiących integralna całość, współpracujących ze sobą w sposób ciągły w celu zapewnienia dla konsumentów wody o odpowiedniej jakości. W przypadku gdy jakość wody w źródle nie odpowiada normatywom stawianym wodzie przeznaczonej do spożycia przez ludzi, woda musi być poddana procesom uzdatniania. Niezawodność funkcjonowania stacji uzdatniania wody jest jednym z podstawowych elementów szeroko rozumianej analizy niezawodności i bezpieczeństwa całego systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę. Niezawodność dostawy wody polega na zapewnieniu stabilnych warunków, umożliwiających pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania na wodę w odpowiedniej ilości i wymaganej jakości w dowolnym, dogodnym dla konsumentów wody czasie. W pracy przedstawiono podstawy analizy niezawodności, podano podstawowe miary oraz zasady wykorzystania struktur niezawodnościowych. Obliczenia wykonano dla stacji uzdatniania wody na podstawie schematu niezwodnościowego metodą jednoparametryczną. Na podstawie danych z eksploatacyjnych stacji uzdatniania wody (SUW) wchodzącej w skład systemu zbiorowego zaopatrzenia w wodę miasta liczącego ok 80 tys. mieszkańców sporządzono schemat niewodności stacji oraz przeprowadzono obliczenia wskaźnika gotowości K. W metodzie wykorzystano podstawowe struktury niezawodnościowe. Wyznaczoną miarę niezawodności porównano z wartościami kryterialnymi.

**Słowa kluczowe:** stacja uzdatniania wody, niezawodność, bezpieczeństwo, ryzyko

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Barbara Tchórzewska-Cieślak, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. 17 8651435, cbarbara@prz.edu.pl
[2] Dorota Papciak, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów
[3] Jadwiga Kaleta, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów
[4] Alicja Puszkarewicz, Politechnika Rzeszowska, Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów

# 1. Wprowadzenie

Systemy zbiorowego zaopatrzenia w wodę (SZZW) zgodnie z Ustawą z dnia 17 lipca 2009 r. o zmianie ustawy o zarządzaniu kryzysowym (Dz. U. z 2009 r .Nr 131, poz.1076) należą do infrastruktury krytycznej, a niezawodne i bezpieczne funkcjonowanie wszystkich jego podsystemów od ujęcia wody poprzez jej uzdatnianie oraz dystrybucję do konsumentów warunkują bezpieczeństwo dostawy wody.

Bezpieczeństwo SZZW ma swoje międzynarodowe regulacje prawne, których źródłem są przede wszystkim wytyczne Światowej Organizacji Zdrowia – WHO (ang. *World Health Organization*). W 2004 roku, w trzeciej edycji wytycznych dotyczących jakości wody do spożycia (*Guidelines for Drinking-Water Quality*), organizacja WHO przedstawiła założenia do opracowania tzw. Planu Bezpieczeństwa Wodnego (ang. *Water Safety Plan* – WSP), które są przeznaczone dla systemów zbiorowego zaopatrzenia ludności w wodę i które wychodzą naprzeciw wymaganiom odnośnie do ochrony infrastruktury krytycznej.

Stan bezpieczeństwa zwykle jest akceptowany, jeśli system spełnia wymagania bezpieczeństwa sformułowane w przepisach prawnych i normach [3,8,10,11,12].

W odniesieniu do konsumentów wody do spożycia bezpieczeństwo jest rozumiane jako prawdopodobieństwo uniknięcia zagrożenia wynikającego ze spożycia wody o jakości niezgodnej z obowiązującym normatywem lub z braku wody [1,2,6,8,9,11,12]. Niezawodność dostawy wody polega na zapewnieniu stabilnych warunków, umożliwiających pokrycie bieżącego i perspektywicznego zapotrzebowania na wodę w odpowiedniej ilości i wymaganej jakości w dowolnym, dogodnym dla konsumentów wody czasie, a także w akceptowalnej przez nich cenie [5,13].

# 2. Metodyka badań

## 2.1 Miary niezawodności

Ilościowo niezawodność systemów opisuje się, wykorzystując do tego celu wskaźniki niezawodności tzw. miary. Są to charakterystyki funkcyjne lub liczbowe uwzględniające właściwości systemu i jego elementów oraz opisujące procesy losowe związane z ich funkcjonowaniem. Wśród wskaźników można wyróżnić wskaźniki o charakterze podstawowym, opisujące prawdopodobieństwo przebywania systemu w stanach niezawodności lub zawodności oraz wskaźniki uzupełniające np. średni czas przebywania systemu w określonych stanach. Do podstawowych wskaźników stosowanych w analizie niezawodności SZW należą [7,5,13].

Średni czas pracy bezuszkodzeniowej $T_p$ jest wartością oczekiwaną zmiennej losowej $T_p'$ określającej czas pracy (zdatności) systemu (lub jego elementów), między dwoma kolejnymi uszkodzeniami [13].

$$T_p = \frac{1}{k+z} \cdot \left( \sum_{i=1}^{k} t_{pi} + z \cdot t \right) \tag{1}$$

t- czas obserwacji,
$t_{pi}$- wartość i-tego czasu pracy obiektów uszkadzających się,
k- liczba okresów pracy obiektów uszkadzających się,
z- liczba okresów pracy obiektów nieuszkadzających się
f(t)- gęstość prawdopodobieństwa zmiennej losowej $T_p'$.

Średni czas naprawy $T_n$ jest sumą czasu oczekiwania na naprawę $T_d$ i czasu naprawy rzeczywistej (do moment włączenia elementu do eksploatacji) $T_0$.

$$T_n = T_d + T_0 \tag{2}$$

Średni czas naprawy jest wartością oczekiwaną zmiennej losowej $T_n'$ określającej czas naprawy.

$$T_n = \frac{1}{n_o} \sum_{i=1}^{n_o} t_{ni} \tag{3}$$

$f_o(t)$ - gęstość zmiennej losowej $T_o'$,
$n_o$ - liczba napraw w badanym okresie,
$t_{ni}$ - czas trwania i – tej naprawy.

Intensywność uszkodzeń $\lambda(t)$

$$\lambda = \frac{1}{T_{pś}}, \tag{4}$$

$$\lambda(t) = \frac{n(t, t+\Delta t)}{N \cdot \Delta t} \tag{5}$$

$T_{pś}$- średnia wartość czasu pracy pomiędzy kolejnymi uszkodzeniami,
$n(t,t+\Delta t)$ - liczba wszystkich uszkodzeń w przedziale czasu $\Delta t$,
N- liczba badanych elementów lub w przypadku systemów liniowych dł. w km,
$\Delta t$ - czas obserwacji.

Intensywność odnowy $\mu(t)$ określa liczbę niesprawności w jednostce czasu, można ją wyznaczyć z danych eksploatacyjnych wg wzoru:

$$\mu(t) = \frac{n(t, t+\Delta t)}{n(t) \cdot \Delta t} \tag{6}$$

n (t,t+Δt) -liczba elementów, których odnowa zakończyła się w przedziale czasu (t,t+Δt),
n (t) - liczba elementów, których odnowa zakończyła się do czasu t,
Δt -długość okresu obserwacji.

Wskaźnik gotowości K(t) określa prawdopodobieństwo, że system będzie w stanie niezawodności. Wraz ze wzrostem długości czasu eksploatacji systemu, wartość wskaźnika gotowości K(t) zmierza do granicznej wartości, która nosi nazwę stacjonarnego wskaźnika gotowości K [5,7,13]

$$K = \lim_{t\to\infty} K(t) = \frac{\mu}{\mu+\lambda} = \frac{T_p}{T_p + Tn} = \frac{\frac{T_p}{T_n}}{\frac{T_p}{T_n} + 1} \tag{7}$$

Wskaźnik zawodności U określa prawdopodobieństwo, że system będzie znajdował się w stanie zawodności.

$$U = 1 - K \tag{8}$$

## 2.2. Analiza niezawodności układu technologicznego SUW na podstawie schematu technologicznego - metoda jednoparametryczna

W trakcie sporządzania schematu niezawodnościowego, jego elementy traktuje się jako ogniwa pracujące z określonym prawdopodobieństwem, określającym zdarzenie pracy bezuszkodzeniowej. Można wyróżnić następujące struktury niezawodnościowe [5,7,13].:

a) Struktura szeregowa- jeżeli uszkodzenie dowolnego elementu powoduje uszkodzenie całego podsystemu, to odpowiadające mu ogniwa niezawodnościowe należy sytuować w szeregowej strukturze niezawodnościowej

Dla struktury szeregowej wskaźnik gotowości $K_s$, jest równy iloczynowi niezawodności poszczególnych jej elementów składowych:

$$K = \prod_{i=1}^{n} K_i \tag{9}$$

jeżeli dla każdego „i”:

$$K_i = K_o \text{ to } K = K_o{}^n \tag{10}$$

i = 1,2,3,...,n., n - liczba elementów.

b) Struktura progowa- jeżeli uszkodzenie podsystemu następuje z chwilą uszkodzenia „k" z pośród „M" wszystkich jednorodnych elementów, to ogniwa niezawodnościowe odpowiadające tym elementom należy sytuować w jednorodnej progowej strukturze typu „M-k z M"

Niezawodność jednorodnej struktury progowej wynosi [13]:

$$K_S = \sum_{k=0}^{k_{dop}} \binom{M}{k} \cdot K_0^{M-k} \cdot K_{p0}^{k} \tag{11}$$

gdzie:
k - liczba elementów uszkodzonych,
$k_{dop}$ - dopuszczalna liczba elementów uszkodzonych,
$K_S$ - wskaźnik gotowości struktury progowej,
$K_0$ - wskaźnik gotowości pojedynczego elementu,
$Kp_0$ - wskaźnik postoju pojedynczego elementu
M - liczba wszystkich elementów.

$$\binom{M}{k} = \frac{M!}{k!\cdot(M-k)!} \text{ - wartość współczynnika dwumianowego} \tag{12}$$

c) Struktura równoległa - jeżeli uszkodzenie podsystemu następuje z chwilą uszkodzenia wszystkich jednorodnych elementów, to poszczególne ogniwa odpowiadające tym elementom należy sytuować w równoległej strukturze niezawodnościowej .Struktura równoległa jest szczególnym przypadkiem struktury progowej. Niezawodność struktury wyraża się wzorem:

$$K_S = 1 - \prod_{j=1}^{M} (1 - K_j) \tag{13}$$

gdzie:
$K_S$ - wskaźnik gotowości struktury równoległej,
$K_j$ - wskaźnik gotowości pojedynczego elementu,
M - liczba wszystkich elementów.

## 2.3. Wymagane wartości wskaźników niezawodności

W tabeli 1 przedstawiono wartości wymaganego poziomu niezawodności dla SZW [4,13].

Tabela 1. Wymagane wartości wskaźnika K

Table 1. The required values K

| Kategoria wodociągu | Stopień pokrycia całkowitego zapotrzebowania na wodę [%] | Wymagany wskaźnik gotowości $K_W$ |
|---|---|---|
| I- wodociągi duże, liczba mieszkańców >500 000 | 100 | ≥0,9917809 |
| | ≥70 | ≥0,9945206 |
| | <70 | ≥0,9999453 |
| II- wodociągi średnie, liczba mieszkańców 50 000-500 000 | 100 | ≥0,9835617 |
| | ≥70 | ≥0,9917809 |
| | <70 | ≥0,99945421 |
| I- wodociągi duże, liczba mieszkańców ≤50 000 | 100 | ≥0,9671233 |
| | ≥70 | ≥0,9835617 |
| | <70 | ≥0,9972603 |

## 3. Przykład aplikacyjny

Analizie poddano układ stacji uzdatniania wody podziemnej dla miasta liczącego ok 80 tys. mieszkańców.

Urządzenia wodne do poboru wody to ujęcia pompowe:

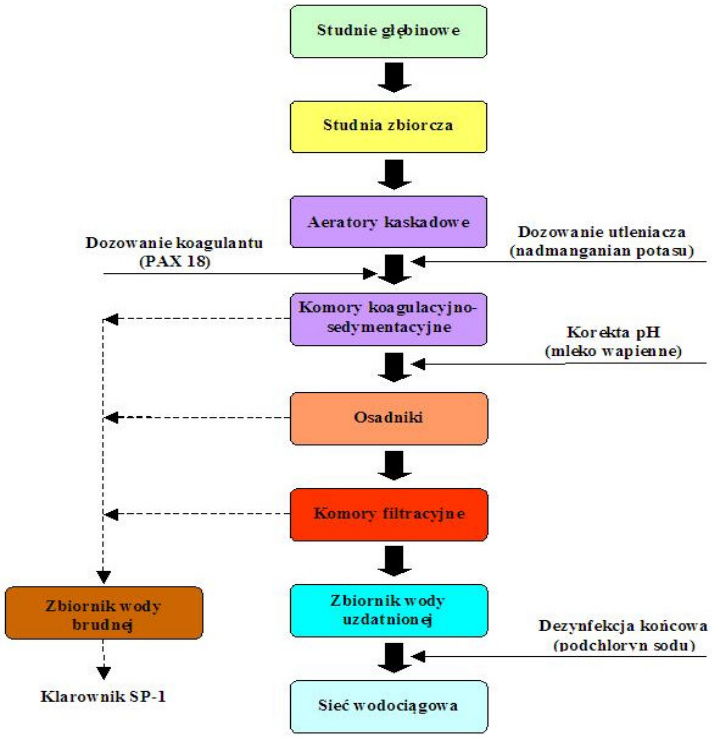
- SI w skład którego wchodzi 5 szt. studni wierconych ($Q_{emax}$ 183 $m^3/h$ ).
- S II w skład którego wchodzi 22 szt. studni wierconych ($Q_{emax}$ = 715 $m^3/h$).

Projektowana maksymalna wydajność stacji uzdatniania wody(SUW) to 715 $m^3/h$; średnia roczna np. w 2012/2013 roku wyniosła około 265 $m^3/h$.

Ujmowana woda kierowana jest do studni zbiorczej (czas zatrzymania 2-4 godziny, w zależności od aktualnej produkcji wody). Następnie woda kierowana jest do „napowietrzalni" (kaskady natleniającej). Tuż pod kaskadą umiejscowione jest dozowanie utleniacza chemicznego jakim jest nadmanganian potasu oraz koagulantu PAX – 18. Kolejnym etapem uzdatniania wody są pionowe komory koagulacyjno - sedymentacyjne o czasie kontaktu 6 – 8 godzin. Czas zatrzymania w osadnikach wynosi kilkanaście godzin. Następnym etapem jest filtracja wody (filtry trójwarstwowe: piasek kwarcowy, wpracowane złoże manganowe, antracyt, prędkość filtracji około 3 m/h,), a końcowym dezynfekcja za pomocą podchlorynu sodu (rys. 1)

Analizę niezawodności SUW wykonano na podstawie schematu technologicznego oraz danych eksploatacyjnych uzyskanych od przedsiębiorstwa wodociągowego. Symbole na rysunku 2 oznaczają:

Sb- studnia zbiorcza
A - pompownia I st
B - aeratory
C - osadniki poziome
F - filtry
B - pompownia II st
ZB - zbiorniki wody czystej.




Rys. 1. Schemat technologiczny SUW

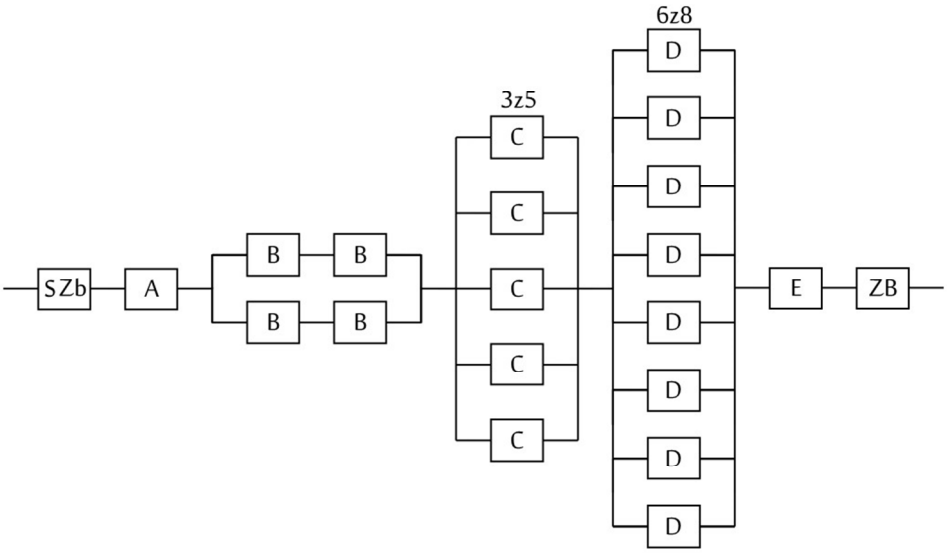
Fig. 1. The scheme of water treatment plant

W tabeli 2 zamieszczono wartości wskaźników niezawodności K dla poszczególnych obiektów SUW. Dla pompowni wartość $K_A$ wyznaczono na podstawie schematu przedstawionego na rysunku 3. Pozostałe wartości wskaźników przyjęto wg danych literaturowych [5].

Tabela 2. Wartości wskaźników K przyjęte do obliczeń

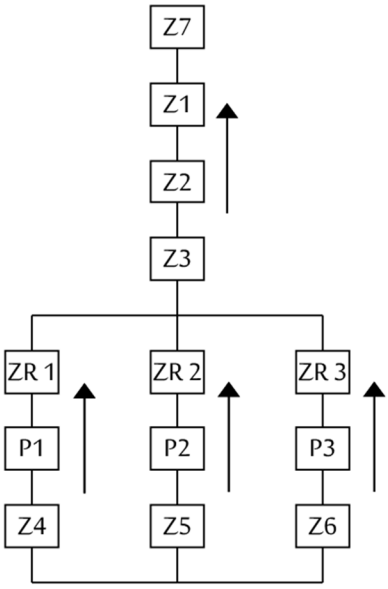
Table 2. The values of K index

| Symbol obiektu SUW | K |
|---|---|
| SZb | 0,994 |
| A | 0,988 |
| B | 0,999 |
| C | 0,995 |
| D | 0,961 |
| E | 0,988 |
| ZB | 0,994 |
| P1,P2,P3 | 0,956 |
| Z1,Z2,Z3,Z4,Z5,Z6,Z7 | 0,998 |
| ZR1,ZR2,ZR3 | 0,999 |




Rys. 2. Schemat niezawodnościowy SUW

Fig. 2. The scheme of WTP




Rys. 3. Schemat niezawodnościowy pompowni

Fig. 3. The scheme of pump station

Dla pompowni (struktura równoległa 1 z 3), przejęto następujące oznaczenia: P1, P2, P3 – pompy; Z1, Z2, Z3, Z4, Z5, Z6, Z7 – zawory odcinające; ZR1, ZR2, ZR3 – zawory zwrotne

Na podstawie wzorów (9-13) obliczono wartości wskaźników niezawodności K dla poszczególnych struktur:

- SZb - A

$K_{SZbA}$= 0,994·0,998=0,992

- B

$K_B$= 1- [1-(0,999)$^2$ ]$^2$ = 0,999

- C 3 z 5

$K_{pC=}$ 1-$K_C$

$$K_C^{'} = \binom{5}{5-0} \cdot K_C^{5-0} \cdot K_{pC}^{0} + \binom{5}{5-1} \cdot K_C^{5-1} \cdot K_{pC}^{1} + \binom{5}{5-2} \cdot K_C^{5-2} \cdot K_{pC}^{2} = 0{,}999$$

- D 6 z 8

$$K_D^{'} = \binom{8}{8-0} \cdot K_D^{8-0} \cdot K_{pD}^{0} + \binom{8}{8-1} \cdot K_D^{8-1} \cdot K_{pD}^{1} + \binom{8}{8-2} \cdot K_D^{8-2} \cdot K_{pD}^{2} = 0{,}997$$

**Dla całości: K=0,9851**

Analizując wyznaczoną wartość K z wartością wymaganymi dla miast o liczbie mieszkańców poniżej 50 000 oraz zakładając wymagane 100% pokrycie zapotrzebowania na wodę Kw≥0,9671233 zgodnie z tab. 1 oceniono, że wskaźnik niezawodności dostawy wody mieści się w wartościach normatywnych.

## 4. Wnioski

- Na podstawie analizy stwierdza się, że wartość wskaźnika niezawodności układu technologicznego SUW mieści się wartościach zalecanych.
- Analiza niezawodności układu technologicznego wykazała, że stopień rezerwowania poszczególnych etapów uzdatniania wody jest wystarczający, a układ technologiczny może pracować również w stanach awaryjnych niektórych urządzeń zapewniając przy tym odpowiednią jakość wody uzdatnionej.
- Można natomiast rozważyć modernizację zbiorników wody czystej.

## Literatura

[1] Aven T.: Reliability and Risk Analysis. Elsevier, London 1992.

[2] Haimes Y.Y., Moser D., Stakhin E.: Risk Based Decision Making in Water Resources. Journal of Infrastructure Systems, ASCE, 12, 2006, s. 401-415.

[3] Hrudey S.E.: Drinking water quality – a risk management approach. Water, 26(1), 2001, s. 29-32.

[4] Iwanejko R.: Preliminary analysis of risks attributed to operation of small surface water intakes. Mat. konf. „Water Supply and Water Quality", Wydawn. PZiTS O/Wielkopolski, Poznań–Gniezno, I, 2008, s. 229-239.

[5] Kwietniewski M., Roman M., Kłos-Trębaczkiewicz H.: Niezawodność wodociągów i kanalizacji. Arkady, Warszawa 1993.

[6] Rak J.: A study of the qualitative methods for risk assessment in water supply systems. Environment Protection Engineering, Wydawn. Politechniki Wrocław-skiej, z. 3-4, s. 123-134, 2003.

[7] Rak J.: Niezawodność systemu uzdatniania wód powierzchniowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, nr 111, Inżynieria Środowiska, z. 20, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1993.

[8] Rak J.: Podstawy bezpieczeństwa systemów zaopatrzenia w wodę. PAN, Komitet Inżynierii Środowiska, t. 28, Lublin 2005.

[9] Rak J.: Selected problems of water supply safety. Environmental Protection Engineering, Wydawn. Politechniki Wrocławskiej, 35, 2009, s. 29-35.

[10] Rak, J., Pietrucha-Urbanik, K. New directions for the protection and evolution of water supply systems - smart water supply. Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury - Journal of Civil Engineering, Environment And Architecture. JCEEA, z. 62 (3/I/2015), pp. 365-373. DOI: 10.7862/rb.2015.121.

[11] Rak J, Tchórzewska-Cieślak B.: Ryzyko w eksploatacji systemów zbiorowego zaopatrzenia w wodę. Wydawnictwo Sidel-Przywecki, 2013, s. 1-164.

[12] Tchórzewska-Cieślak B. Metody analizy i oceny ryzyka awarii podsystemu dystrybucji wody. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej. Rzeszów 2011. s. 1-217.

[13] Wieczysty A., Iwanejko R., Lubowiecka T.: Podnoszenie niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę. Metody oceny podnoszenia niezawodności działania komunalnych systemów zaopatrzenia w wodę. PAN, Wydawn. Komitetu Inżynierii Środowiska PAN, Lublin 2001.

## ANALYSIS OF RELIABILITY OF WATER TREATMENT STATION

**S u m m a r y**

Collective water supply systems (CWSS) consist of interconnected elements (subsystems) constitute an integral whole, working together on a continuous basis to ensure consumers of water of appropriate quality. If the water quality does not match the source normative values posed water intended for human consumption, the water must be subjected to treatment processes. Reliability of the water treatment plant is one of the basic elements of the broader analysis of reliability and safety of the entire system of collective water supply. The reliability of water supply is to ensure stable conditions, allowing to cover the current and prospective demand for water in sufficient quantity and quality required at any convenient time for water consumers. The paper presents the basics of reliability analysis, are given basic measures and the rules for the use of structures reliability. Calculations were made for the water treatment plant on the basis of the reliability scheme one way method. Based on data from the operating water treatment plants (WTP), which is part of a system of collective water supply a city of about 80 thousand. residents prepared reliability scheme station and the calculations of the indicator K. Method uses the basic structure reliability. The determined reliability as compared with the values of criteria.

**Keywords:** water treatment, reliability, security, risk

DOI:10.7862/rb.2016.234

*Przesłano do redakcji: 24.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 517-524

**Beata WILK-SŁOMKA**[1]
**Janusz BELOK**[2]

# PARAMETRY OSZKLENIA A KOMFORT CIEPLNY W STREFIE O REGULOWANEJ TEMPERATURZE

Streszczenie: Celem pracy było określenie wpływu parametrów oszklenia na komfort cieplny w wybranej strefie budynku. Jako strefę o regulowanej temperaturze wybrano fragment budynku jednorodzinnego o powierzchni ogrzewanej ok. 110 $m^2$ z dużą powierzchnią przeszkloną od strony południowej. Metoda badawcza przyjęta w pracy to badania numeryczne z wykorzystaniem programów EnergyPlus, OpenStudio, oraz Window. Dane klimatyczne niezbędne do przeprowadzenia obliczeń przyjęto dla miasta Katowice. W budynku założono funkcjonowanie systemu wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła, a instalację grzewczą oparto na kotle gazowym zasilającym grzejniki płytowe, konwekcyjne. Ocenę komfortu cieplnego przeprowadzono posługując się wskaźnikiem PMV. W rozważaniach uwzględniono podział na pory roku (lato, zima) oraz porę dnia (dzień, noc) poprzez przyjęcie odpowiednich wartości opisujących aktywność fizyczną człowieka (met) oraz oporność cieplną odzieży (clo). Do analiz przyjęto 4 warianty oszklenia. Punkt odniesienia stanowi przeszklona fasada złożona z zestawu szybowego jednokomorowego wypełnionego powietrzem. Pozostałe warianty dobrano tak, aby odpowiadały współczesnym rozwiązaniom zestawów szybowych dla budownictwa niskoenergetycznego. Spełniają one aktualne wymagania izolacyjności termicznej, przy czym różnią się wartościami współczynników: przenikania ciepła U, całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego g oraz przepuszczalności światła $\tau_{vis}$. Są to zestawy trójszybowe, w których komory wypełniono argonem, szyby pokryto powłokami selektywnymi. Najbardziej korzystnymi z punktu widzenia uzyskania warunków odczuwania komfortu cieplnego dla opisanych powyżej założeń wydaje się być rozwiązanie W3.

**Słowa kluczowe:** wskaźnik PMV, oporność cieplna odzieży, aktywność fizyczna człowieka, średnia temperatura promieniowania otaczających przegród

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Beata Wilk-Słomka, Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice; tel. 322372142; beata.wilk-slomka@polsl.pl

[2] Janusz Belok, Politechnika Śląska, Katedra Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli, ul. Akademicka 5, 44-100 Gliwice; tel. 322372687; janusz.belok@polsl.pl

## 1. Wprowadzenie

Poprzez stan komfortu cieplnego człowieka rozumiemy stan zrównoważonego bilansu cieplnego z otoczeniem, czyli ilość ciepła wytwarzanego w wyniku metabolizmu jest równa ilości ciepła traconego do otoczenia, przy jednoczesnym braku odczuwania dyskomfortu lokalnego. Na ów bilans cieplny wpływa aktywność fizyczna człowieka oraz izolacyjność cieplna odzieży, a także parametry środowiska: temperatura, wilgotność względna i prędkość przepływu powietrza, oraz średnia temperatura promieniowania. Znając te czynniki (oszacowanie lub pomiar) możliwe jest prognozowanie odczucia cieplnego całego ciała poprzez obliczenie wskaźnika PMV – tzw. przewidywanej średniej oceny przez dużą grupę osób w siedmio lub dziewięciostopniowej skali [1], [2], [3]. Wskaźnik PMV = 0 określa stan równowagi cieplnej uznawany jako komfortowy. Komfort cieplny jest pojęciem subiektywnym. Jak wynika z przeprowadzonych badań, temperatury zapewniające dobre samopoczucie są zazwyczaj wyższe dla kobiet i osób starszych niż dla mężczyzn i osób młodszych. Ponadto, przyjmuje się, że zimą dla osoby ubranej zakres temperatur powietrza zapewniających dobre samopoczucie wynosi $t_i = 20 \div 23^oC$, natomiast latem ze względu na „lżejsze" ubranie $t_i = 24 \div 28^oC$ [1].

Do oceny komfortu cieplnego jest stosowana średnia temperatura promieniowania oraz temperatura operacyjna. *Temperatura operacyjna jest definiowana jako jednorodna temperatura teoretycznego czarnego pomieszczenia, w którym człowiek wymienia tę samą ilość ciepła przez promieniowanie i konwekcję, jak w rzeczywistym, niejednorodnym środowisku* [2]. Średnia temperatura promieniowania jest określana jako jednorodna temperatura pomieszczenia, w którym człowiek wymienia na drodze promieniowania taką samą ilość ciepła jak w rzeczywistym, niejednorodnym środowisku.

W zakresie komfortu cieplnego oszklenie ma wpływ na temperaturę pomieszczenia, średnią temperaturę promieniowania oraz warunki oświetleniowe. Jakość energetyczna zestawów szybowych (niska izolacyjność termiczna) wpływa na zmniejszenie temperatury operacyjnej w stosunku do temperatury powietrza. Z kolei zapewnienie wysokiej temperatury w pomieszczeniu nie musi oznaczać zagwarantowania warunków komfortu cieplnego. Brak jego odczuwania może być spowodowany niepożądanym nagrzaniem lub nadmiernym ochłodzeniem określonej części ciała (miejscowy dyskomfort termiczny). Może to być wywołane przeciągiem, zbyt dużą różnicą temperatury w pionie między głową i kostkami u nóg, zbyt ciepłą lub chłodną podłogą oraz zbyt dużą asymetrią temperatury promieniowania. Należy zatem zauważyć, że średnia temperatura promieniowania, a tym samym temperatura operacyjna zależą od usytuowania człowieka względem powierzchni o obniżonej lub podwyższonej temperaturze [1], [2].

W niniejszym artykule autorzy podjęli próbę określenia wpływu wybranych parametrów oszklenia na komfort cieplny w strefie o regulowanej temperaturze.

# 2. Opis procedury badawczej

## 2.1. Opis programu symulacyjnego i założenia analiz

Metoda badawcza przyjęta w pracy to badania numeryczne z wykorzystaniem programów EnergyPlus, Window oraz OpenStudio [3], [4], [5]. Za ich pomocą można modelować parametry energetyczne i optyczne okien, fasad przeszklonych oraz wyznaczać zużycie energii na potrzeby ogrzewania, chłodzenia, wentylacji, oświetlenia oraz zużycia ciepłej wody w budynkach. Ponadto dają możliwość modelowania oświetlenia pomieszczeń (wyznaczenie natężenia oświetlenia, iluminancji, olśnienia w wybranych punktach analizowanej strefy) z uwzględnieniem elementów zacieniających. Istnieje także możliwość określenia komfortu cieplnego w analizowanej strefie. Analizy bazują na wykorzystaniu metody MES w powiązaniu z implementacją równań empirycznych dla zjawisk nie opisanych w inny sposób. Obliczenia prowadzone są z godzinowym krokiem czasowym na bazie rzeczywistych danych klimatycznych. W analizach wykorzystano bazę danych klimatycznych dla miasta Katowice, stacja aktynometryczna – Chorzów wraz z jej analizą statystyczną i wytypowanymi dniami projektowymi, udostępnianą przez [3]. Charakterystycznymi datami ilustrującymi skrajne warunki pogodowe dla wybranej lokalizacji w ciągu roku są dni: 21.01 oraz 21.07 [3]. Dane klimatyczne zostały zebrane w okresie lat 1971÷2000.

Założenia przyjęte w analizach:
– rodzaj budynku: mieszkalny,
– strumień objętości powietrza wentylacyjnego $V_{inf}$ = 20 m$^3$/h · osoba,
– liczba osób: n = 2,
– zyski ciepła od źródeł wewnętrznych przyjęto zgodnie z [6] dla budynku jednorodzinnego $q_{int}$ = 6,8 W/m$^2$, od oświetlenia $q_{electr}$ = 5,0 W/m$^2$,
– system c.o.: kocioł gazowy, grzejniki konwekcyjne,
– system wentylacji: mechaniczna z odzyskiem ciepła,
– temperatura w pomieszczeniu w zimie 20$^o$C, w okresie letnim 26$^o$C.

Wentylacja pracuje zgodnie z powyżej opisanymi założeniami, z możliwością okresowego zwiększenia wymiany powietrza celem wychłodzenia budynku. Temperatura dla okresu letniego nie jest regulowana poprzez system aktywnego chłodzenia (wytwarzanie chłodu). Przyjęto, że chłodzenie budynku odbywa się poprzez intensyfikację wentylacji (intensywna wentylacja w okresie nocnym). Jeżeli temperatura powietrza w budynku przekroczy 26$^o$C, a temperatura powietrza zewnętrznego jest od niej niższa, wówczas następuje zwiększenie wymian powierza do 3/h. Chcąc uzyskać wyniki dla budynku pod pełnym obciążeniem cieplnym wprowadzono zyski ciepła od oświetlenia i źródeł wewnętrznych. Ich wartości przyjęto sugerując się danymi zawartymi w [6], z uwagi na znaczne rozbieżności tych danych w literaturze. Obliczenia były realizowane według odrębnego algorytmu [3], niezwiązanego z [6].

W celu określenia komfortu cieplnego posłużono się wskaźnikiem PMV. Do obliczeniowego ustalenia wartości tego wskaźnika przyjęto poniższe wartości wielkości opisujących rodzaj ubioru i sposób zachowania się człowieka [2]:
– aktywność fizyczna: met = 108 W/osobę w godz. $8^{00}$-$23^{00}$; met = 72 W/osobę w godz. $23^{00}$-$8^{00}$;
– oporność cieplna odzieży: zima: clo = 1,0 w godz. $8^{00}$-$23^{00}$; clo = 1,5 w godz. $23^{00}$-$8^{00}$; lato: clo = 0,5 w godz. $8^{00}$-$23^{00}$; clo = 1,5 w godz. $23^{00}$-$8^{00}$;
– prędkość przepływu powietrza, $w_{air}$ = 0,1 m/s.

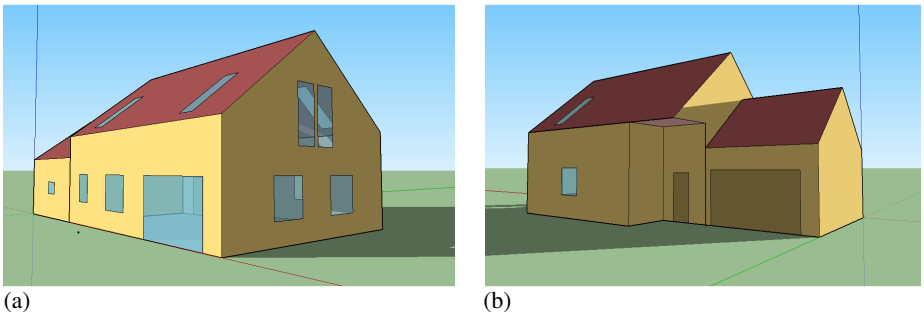
## 2.2. Przedmiot analiz i charakterystyka wariantów

Przedmiotem pracy jest budynek jednorodzinny parterowy z poddaszem użytkowym, niepodpiwniczony, wykonany w technologii tradycyjnej murowanej. Na parterze znajdują się pokój dzienny połączony z kuchnią, wc, wiatrołap. Na poddaszu zlokalizowano trzy sypialnie oraz łazienkę. Powierzchnia ogrzewana wynosi 109,59 $m^2$. Od strony zachodniej został dobudowany garaż, który jest nieogrzewany (41,43 $m^2$). W tab. 1 zestawiono współczynniki przenikania ciepła przegród nieprzezroczystych, spełniające aktualne wymagania izolacyjności termicznej zawarte w [7]. Na rys. 1 przedstawiono widok elewacji budynku.

Tabela 1. Współczynniki przenikania ciepła przegród nieprzezroczystych

Table 1. Thermal transmittance coefficients of building's opaque partitions

| Rodzaj przegrody | Współczynnik przenikania ciepła U [W/m$^2$K] |
|---|---|
| podłoga na gruncie | 0,21 |
| ściana zewnętrzna | 0,12 |
| dach | 0,14 |
| drzwi wejściowe | 0,79 |



(a) (b)

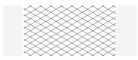
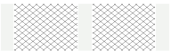
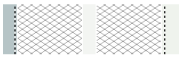
Rys. 1. Widok analizowanego budynku: (a) elewacja południowo-wschodnia, (b) elewacja północno-zachodnia

Fig. 1. View of analyzed building: (a) S-E elevation, (b) N-W elevation

W celu określenia wpływu parametrów oszklenia na komfort cieplny w wybranej strefie o regulowanej temperaturze przeprowadzono badania porównawcze. Rozpatrzono 4 warianty oszklenia. Wariant wyjściowy W0 spełnia wymagania izolacyjności termicznej stawiane przegrodom przezroczystym do 2014 r. Pozostałe warianty dobrano tak, aby odpowiadały aktualnym rozwiązaniom technicznym, spełniały aktualne wymagania izolacyjności termicznej [7], ale różniły się wartością współczynników: przenikania ciepła U, całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego g oraz przepuszczalności światła $\tau_{vis}$ [4], [7], [8]. W tab. 2 zestawiono parametry dla poszczególnych wariantów.

Tabela 2. Charakterystyka analizowanych wariantów

Table 2. Characteristic of analyzed variants

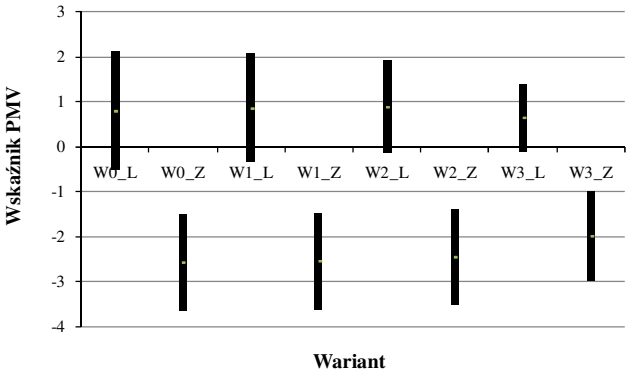
| Wariant | Schemat zestawu szybowego | Współczynnik g [-] | Współczynnik $\tau_{vis}$ [-] | Współczynnik U [W/m$^2$K] |
|---|---|---|---|---|
| W0 |  (4-18-4) | 0,79 | 0,82 | 2,71 |
| W1 |  (4-18-4-18-4) | 0,71 | 0,74 | 1,64 |
| W2 |  (6-18-4-18-6) | 0,60 | 0,72 | 0,65 |
| W3 |  (4-18-4-18-6) | 0,34 | 0,43 | 0,71 |

Wariant W0 to zestaw jednokomorowy złożony z szyb zwykłych, z wypełnieniem komory międzyszybowej powietrzem. Warianty W1 ÷ W3 to zestawy trójszybowe, w których komory są wypełnione argonem. W1 to zestaw złożony z szyb zwykłych, W2 – szyby zwykłe z powłokami niskoemisyjnymi, natomiast W3 od strony zewnętrznej szkło z powłoką przeciwsłoneczną oraz od wewnętrznej strony z powłoką niskoemisyjną.

## 3. Wyniki badań i ich analiza

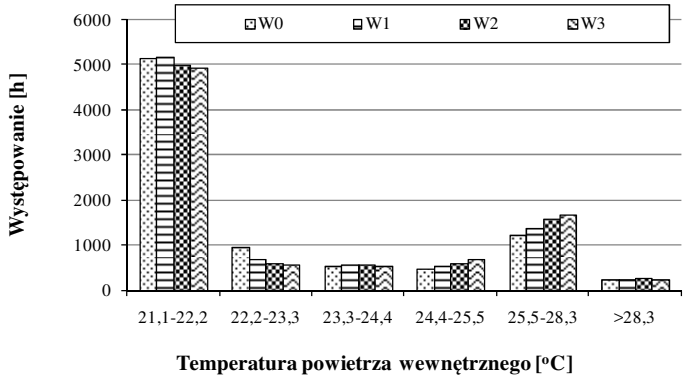
W efekcie przeprowadzonych obliczeń uzyskano szereg wyników obrazujących zachowanie się modelu pod obciążeniem cieplnym wywołanym klimatem zewnętrznym. Z punktu widzenia celu jakiemu podporządkowane były badania, uzyskane wyniki obliczeń, dla założeń opisanych w rozdziale 2, przedstawiają wykresy na rys. 2 ÷ 4. Najbardziej korzystnym wariantem pod względem speł-

nienia wymagań komfortu cieplnego (PMV) zarówno dla okresu zimowego, jak i letniego wydaje się być wariant W3 (por. rys. 2). W pozostałych przypadkach w odniesieniu do skali PMV – mamy do czynienia odpowiednio z odczuwaniem zimna (W_Z – 21.01) lub ciepła (W_L – 21.07).




Rys. 2. Przedziały zmienności wskaźnika PMV w dniu 21.07 (W_L) oraz 21.01(W_Z)

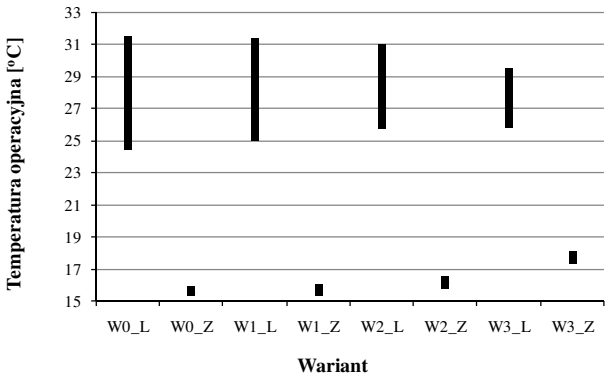
Fig. 2. PMV index variation ranges on July 21st (W_L) and January 21st (W_Z)




Rys. 3. Liczba godzin występowania dla danego przedziału temperatur

Fig. 3. The number of hours of occurrence for a given temperature range

Największą liczbę godzin występowania obserwujemy dla zakresu temperatury powietrza 21,1 ÷ 22,2°C, natomiast najniższą liczbę dla temperatur powyżej 28,3°C (różnice między poszczególnymi wariantami są nieznaczne). Rozpatrując przedziały z temperaturami powietrza powyżej 24,4°C najwyższa liczba godzin występowania przypada dla wariantu W3. Dla przedziałów z temperaturą powietrza poniżej 21,1°C najniższa liczba godzin występowania przypada dla W3 (8h), natomiast najwyższa dla W0 (34h).




Rys. 4. Zakresy temperatury operacyjnej w dniu 21.07 (W_L) oraz 21.01 (W_Z)

Fig. 4. Range of operative temperature on July 21st (W_L) and January 21st (W_Z)

Analizując wartości temperatury operacyjnej ($t_{OP}$) najbardziej korzystne przedziały występują dla wariantu W3, zarówno w okresie letnim jak i zimowym, najmniej korzystne dla W0. W okresie letnim temperatura $t_{OP}$ zawiera się w przedziale 24,45 ÷ 31,54°C dla W0, natomiast dla W3 25,79 ÷ 29,48°C. Różnice wartości temperatury $t_{OP}$ dla tych wariantów nie są znaczące, natomiast koszty inwestycyjne różnią się znacznie. Dla okresu zimowego występują znacznie większe różnice temperatur, dla wariantu W0 zakres wynosi 15,27 ÷ 15,92°C, a dla W3 17,33 ÷ 18,09°C. Na końcowy efekt energetyczny i odczucie komfortu cieplnego składa się zatem wypadkowe współdziałanie parametrów optyczno-energetycznych (U oraz g) oszkleń (nie należy kierować się tylko jednym z parametrów). Widoczny jest tutaj także wpływ temperatury powierzchni oszklenia na temperaturę operacyjną w pomieszczeniu.

## 4. Podsumowanie

Zakres temperatury powietrza wewnętrznego, w którym człowiek odczuwa komfort cieplny jest bardzo zróżnicowany. Zależy on przede wszystkim od indywidualnych preferencji, wieku, płci, rodzaju ubrania, stopnia aktywności fizycznej oraz pory roku. Ze względu na indywidualne różnice nie jest możliwe określenie środowiska termicznego, które będzie satysfakcjonowało każdą osobę. Istnieje natomiast możliwość doboru środowiska, które będzie przewidywalnie akceptowalne dla określonego odsetka użytkowników.

Zdaniem autorów zjawisko komfortu cieplnego powinno być uwzględniane już na etapie projektowania obiektu budowlanego, szczególnie w przypadku obiektów o dużych powierzchniach przeszklonych, celem optymalizacji w zakresie rozwiązań architektoniczno-budowlano-instalacyjnych.

## Literatura

[1] Fanger P.O., Popiołek Z., Wargocki P.: Środowisko wewnętrzne: wpływ na zdrowie, komfort i wydajność pracy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej 2003.

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

[3] http://bigladdersoftware.com/epx/docs/8-0/input-output-reference/page-094.html {dostęp 10.05.2016 r.}.

[4] https://windows.lbl.gov/software/comfen/comfen.html {dostęp 10.05.2016 r.}.

[5] https://www.openstudio.net/ {dostęp 10.05.2016 r.}.

[6] Rozporządzenie MIiR z dn. 18.03.2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku ... Dz. U. z 2015 r. poz. 376.

[7] Rozporządzenie MIiR z dn. 17.07.2015 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, Dz.U. z 2015 r. poz. 1422.

[8] EN ISO 10077-1.: Cieplne właściwości użytkowe okien, drzwi i żaluzji – obliczanie współczynnika przenikania ciepła. Cz. 1.: Postanowienia ogólne.

## GLAZING PARAMETERS VS. THERMAL COMFORT IN A ZONE WITH ADJUSTABLE TEMPERATURE

**S u m m a r y**

The goal of this paper was to determine the impact of glazing parameters on thermal comfort in a building. A part of detached building with heated area of approx. 110 $m^2$ with large glazed area from southern side was selected as such a zone. There was chosen as testing method the numerical method - EnergyPlus, OpenStudio and Window software. Climate data necessary for calculations were taken for Katowice. It was assumed that in the building operates mechanical ventilation system with heat recovery and heating installation with a gas boiler and panel convection radiators. Estimation of thermal comfort was carried out using PMV index. In considerations were taken into account seasons (summer, winter) and time of day (day, night) by taking suitable values describing man physical activity (met) and thermal resistance of clothing (clo). 4 variants of glazing were used in the analysis. The reference point was the glazed façade made of single chamber pane set filled with air. Other variants were selected in such a way that they corresponded to modern solutions of pane sets assigned for low-energy buildings. They meet current requirements of thermal insulating power but they have different values of the following coefficients: thermal transmittance U, total permeability of solar radiation energy g and light transmittance $\tau_{vis}$. They are sets with three glasses and with chambers filled with argon and the panes are covered with selective coats. From the point of view of feeling thermal comfort for described above assumptions it seems that the most advantageous is W3 solution.

**Keywords:** PMV index, thermal resistance of clothing, man physical activity, average radiation temperature of surrounding partitions

DOI:10.7862/rb.2016.235

*Przesłano do redakcji: 11.07.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 525-532

**Barbara WŁODARCZYK**[1]
**Paweł P. WŁODARCZYK**[2]

# MIKROBIOLOGICZNE OGNIWO PALIWOWE Z KATODĄ Cu-B

Elektrody w mikrobiologicznych ogniw paliwowych najczęściej wykonywane są z tkaniny węglowej, czasami z 1% dodatkiem platyny. Praca przedstawia analizę możliwości wykorzystania stopu Cu-B jako katalizatora katody. Metodyka obejmuje przygotowanie katalizatora, analizę jego aktywności w redukcji $H_2O_2$ oraz porównanie zmian stężenia ChZT, $NH_4^+$ oraz $NO_3^-$ podczas oczyszczania ścieków komunalnych w reaktorze z napowietrzaniem oraz przy wykorzystaniu mikrobiologicznego ogniwa paliwowego z katodą Cu-B. Czas redukcji ChZT przy wykorzystaniu mikrobiologicznego ogniwa paliwowego z katodą Cu-B jest zbliżony do czasu redukcji przy napowietrzaniu. Uzyskana w ogniwie gęstość prądu (0,21 mA/cm$^2$) oraz ilość energii elektrycznej jest niewielka (0,87 Wh), jednak pomiary przeprowadzono w reaktorach o pojemności 15 l. Uzyskana ilość energii pozwala jednak na eliminację energii koniecznej do napowietrzania zbiorników. Badania wykazały, więc że istnieje możliwość wykorzystania stopu Cu-B jako katalizatora katody mikrobiologicznego ogniwa paliwowego.

**Słowa kluczowe:** mikrobiologiczne ogniwo paliwowe, katalizator, stop Cu-B, katoda, inżynieria środowiska, odnawialne źródła energii

## 1. Wprowadzenie

Stały wzrost gospodarczy powoduje generowanie ogromnych ilości odpadów, które stanowić mogą cenny surowieć do pozyskiwania energii [1]. Taki sposób podejścia do wszelkiego rodzaju substancji odpadowych, stanowić będzie z pewnością przyszłościowe rozwiązanie w każdej dziedzinie gospodarki. Silnie rozwijającą się technologią oczyszczania ścieków przy jednoczesnym generowaniu energii elektrycznej jest technologia mikrobiologicznych ogniw paliwowych (MFC – *microbial fuel cell*) [1, 2]. Technologia ta wykorzystuje bezpośrednią

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Barbara Włodarczyk, Uniwersytet Opolski, Wydział Przyrodniczo-Techniczny, Samodzielna Katedra Inżynierii Procesowej, ul. Dmowskiego 7-9, 45-365 Opole; tel. 77 4016717; barbara.wlodarczyk@uni.opole.pl

[2] Paweł P. Włodarczyk, Uniwersytet Opolski, Wydział Przyrodniczo-Techniczny, Samodzielna Katedra Inżynierii Procesowej, ul. Dmowskiego 7-9, 45-365 Opole; tel. 77 4016706; pawel.wlodarczyk@uni.opole.pl

przemianę materii organicznej zgromadzonej w odpadach przy udziale mikroorganizmów [2-5]. Mikroorganizmy odżywiając się ściekami jednocześnie generują jony $H^+$ [6-9]. Głównym parametrem określającym funkcjonowanie MFC jest spadek stężenia ChZT w ściekach [2, 10, 11]. Praca MFC jest wynikiem procesów zachodzących na elektrodach. Najczęściej stosowanym materiałem na elektrody jest tkanina węglowa, często z 1% dodatkiem Pt [1]. Ze względu na niską gęstość prądu generowaną przez obecnie wykorzystywane MFC konieczne jest poszukiwanie nowych materiałów na elektrody (katalizatory). Praca przedstawia badania możliwości wykorzystania stopu Cu-B jako katalizatora elektrody tlenowej (katody).

## 2. Materiały i metodyka

### 2.1. Materiał badawczy

Pierwszym etapem było przygotowanie katody. Stop Cu-B naniesiono na siatkę miedzianą metodą elektrochemiczną. Siatkę przed naniesieniem stopu odpowiednio przygotowano [12]. Następnie przygotowano mieszaninę której skład przedstawiono w tabeli 1 [12, 13]. Stopy otrzymano w temperaturze 365K [14]. Uzyskano stopy o różnym procentowym udziale B. Udział ten określono metodą rentgenograficzną.

Tabela 1. Skład elektrolitu do uzyskania stopu Cu-B [opracowanie własne]
Table 1. Electrolyte composition for the preparation of Cu-B alloy [own compilation]

| składnik | ilość [mol/l] |
|---|---|
| $CuSO_4 \cdot 7H_2O$ | 0,05 |
| $NaBH_4$ | 0,02 |
| NaOH | 1,00 |
| Trilon B | 0,12 |

Tabela 2. Parametry analizowanych ścieków [opracowanie własne]
Table 2. Parameters of analysed wastewater [own compilation]

| parametr | wielkość |
|---|---|
| pH | 6,6 |
| ChZT [mg/l] | 2101 |
| $NH_4^+$ [mg/l] | 15 |
| $NO_3^-$ [mg/l] | 5 |

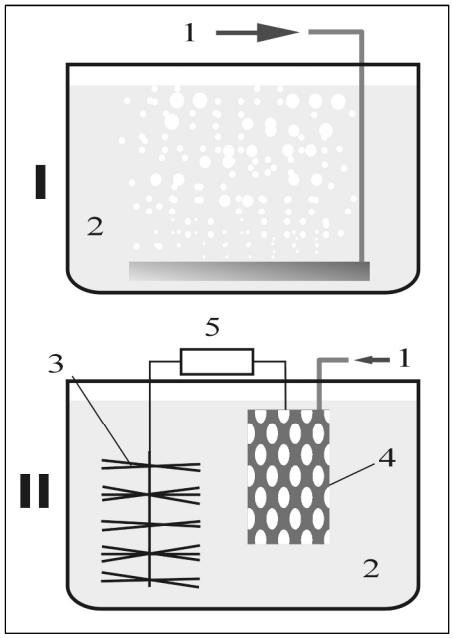
Funkcjonowanie mikrobiologicznego ogniwa paliwowego z katodą Cu-B określono na podstawie szybkości redukcji ChZT, $NH_4^+$ oraz $NO_3^-$ w ściekach komunalnych z osadem czynnym. Parametry ścieków do badań przedstawiono w tabeli 2.

### 2.2. Stanowisko pomiarowe

W pierwszej kolejności określono aktywność katalityczną uzyskanych stopów na podstawie szybkości rozkładu $H_2O_2$ (analiza ilości wydzielanych gazów). Aktywność określono dla katalizatorów z różnym udziałem B, a następnie wybrano stop o najwyższej aktywności rozkładu do dalszych badań funkcjonowania mikrobiologicznego ogniwa paliwowego.

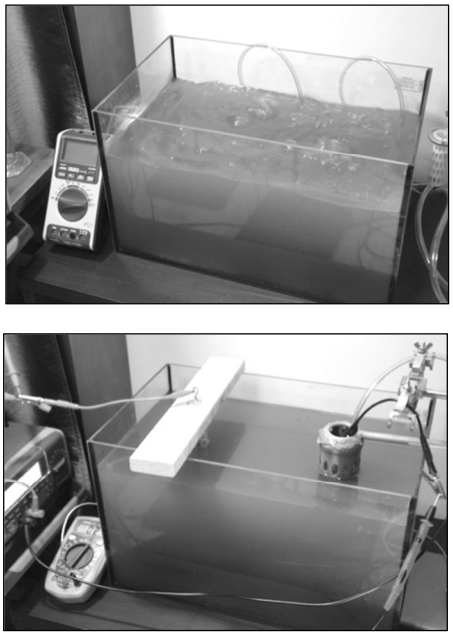
Następnie przeprowadzono pomiary zmiany stężeń ChZT, $NH_4^+$ oraz $NO_3^-$ w ściekach komunalnych z osadem czynnym podczas ich oczyszczania w reaktorze zbiornikowym podczas napowietrzania oraz funkcjonowania mikrobiologicznego ogniwa paliwowego (z katodą Cu-B) [15, 16]. Pomiarów dokonano w temperaturze 293K w reaktorach o pojemności 15 litrów. Rysunki 1 i 2 przedstawiają schemat i widok stanowiska pomiarowego (reaktorów) do oczyszczania ścieków.

Napowietrzanie ścieków w pierwszym reaktorze zrealizowano wykorzystując pompę o mocy 5W (270 l/h). Natomiast w drugim reaktorze oczyszczano ścieki z wykorzystaniem MFC z katodą Cu-B. Na materiał anody wykorzystano tkaninę węglową. MFC było na stałe obciążone odbiornikiem prądu elektrycznego (10Ω). Obserwację zmian stężeń ChZT, $NH_4^+$ oraz $NO_3^-$ odnotowywano w czasie. W czasie pracy mikrobiologicznego ogniwa paliwowego dokonano również pomiaru mocy MFC.




Rys. 1. Schemat stanowiska pomiarowego: I – z napowietrzaniem, II – przy wykorzystaniu mikrobiologicznego ogniwa paliwowego z katalizatorem Cu-B [opracowanie własne]; 1–powietrze, 2–ścieki, 3–anoda, 4–katoda (Cu-B) w osłonie ABS, 5–odbiornik prądu

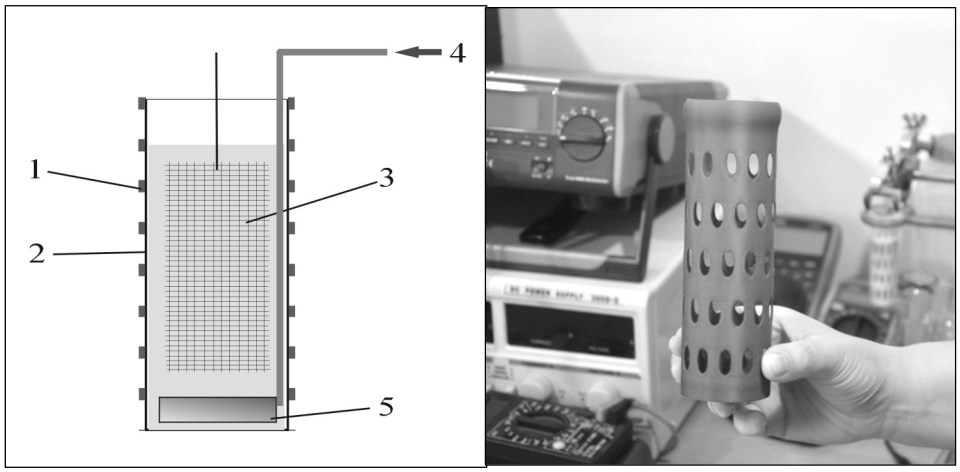
Fig. 1. Scheme of measurement position: I – with aeration, II – with using MFC [own compilation]; 1–air, 2–wastewater, 3–anode, 4–cathode (Cu-B) with ABS cover, 5–electricity receiver



Rys. 2. Reaktor: I – z napowietrzaniem, II – z mikrobiologicznym ogniwem paliwowym [opracowanie własne]

Fig. 2. Reactor: I – with aeration, II – with MFC [own compilation]

Na rys. 3 przedstawiono konstrukcję katody z membraną wymiany protonowej (PEM) i osłonę z tworzywa ABS. Jako membranę PEM wykorzystano Nafion 117 [17], natomiast osłonę wykonano w technologii druku 3D (grubość warstwy 390μm). Katoda była zanurzona w roztworze KOH i stale napowietrzana z wydajnością 20 l/h.



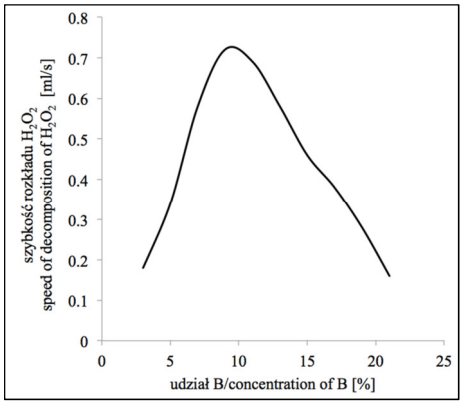

Rys. 3. Schemat katody w osłonie i widok osłony z tworzywa ABS [opracowanie własne]
1–osłona, 2–membrana PEM (Nafion), 3 – katoda Cu-B, 4–doprowadzenie powietrza, 5– bełkotka

Fig. 3. Scheme of cathode and view of ABS cover [own compilation]
1–cover, 2–PEM (Nafion), 3–Cu-B cathode, 4– air supply, 5–bubbler

## 3. Wyniki badań

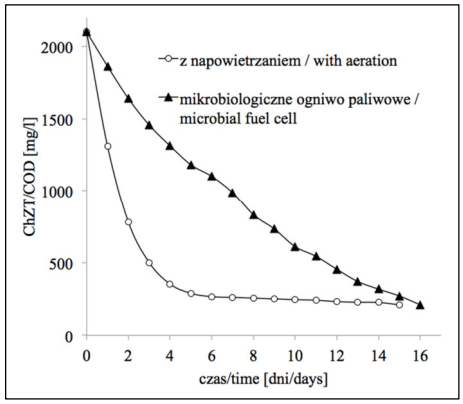
Rysunek 4 przedstawia szybkość rozkładu $H_2O_2$ na katalizatorze Cu-B w zależności od procentowego udziału B. Najwyższą aktywnością w procesie charakteryzuje się stop z 9% udziałem B, który wybrano do dalszych pomiarów MFC. Rysunek 5 przedstawia krzywą spadku ChZT podczas oczyszczania ścieków w reaktorze z napowietrzaniem i z MFC z katodą Cu-B. Przeprowadzone pomiary pozwoliły również na wyznaczenie zmian wartości stężeń $NH_4^+$ oraz $NO_3^-$ w trakcie procesu oczyszczania ścieków (rys. 6 i rys. 7).

Uzyskana średnia gęstość prądu w MFC w okresie 16 dni wyniosła 0,21 mA/cm$^2$. Natomiast całkowita ilość energii wyprodukowana w MFC w ciągu 16 dni wyniosła 0,87 Wh.



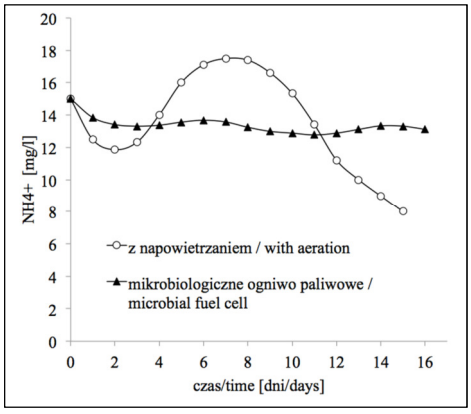

Rys. 4. Szybkość rozkładu $H_2O_2$ na katalizatorze Cu-B w zależności od udziału B w stopie [opracowanie własne]

Fig. 4. Speed of $H_2O_2$ decomposition on Cu-B catalyst depending on concentration of B in alloy [own compilation]



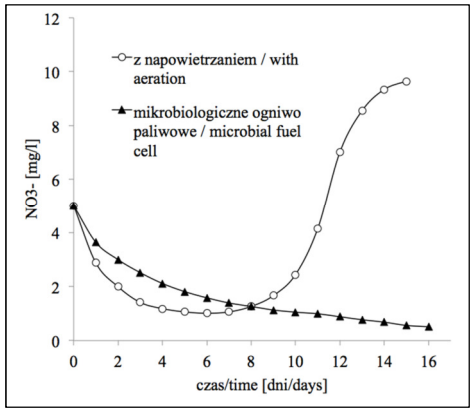

Rys. 5. Zmiana stężenia ChZT podczas oczyszczania ścieków z napowietrzaniem oraz przy wykorzystaniu mikrobiologicznego ogniwa paliwowego z katodą Cu-B [opracowanie własne]

Fig. 5. Change of concentration of COD during wastewater treatment with aeration and with using a microbial fuel cell with Cu-B cathode [own compilation]




Rys. 6. Zmiana stężenia $NH_4^+$ podczas oczyszczania ścieków z napowietrzaniem oraz przy wykorzystaniu mikrobiologicznego ogniwa paliwowego z katodą Cu-B [opracowanie własne]

Fig. 6. Change of concentration of $NH_4^+$ during wastewater treatment with aeration and with using a microbial fuel cell with Cu-B cathode [own compilation]




Rys. 7. Zmiana stężenia $NO_3^-$ podczas oczyszczania ścieków z napowietrzaniem oraz przy wykorzystaniu mikrobiologicznego ogniwa paliwowego z katodą Cu-B [opracowanie własne]

Fig. 7. Change of concentration of $NO_3^-$ during wastewater treatment with aeration and with using a microbial fuel cell with Cu-B cathode [own compilation]

## 4. Dyskusja wyników i wnioski

Pomiary wykazały skuteczność usuwania ChZT na poziomie 90% zarówno w przypadku napowietrzania jak i wykorzystania MFC. Również czas uzyskania tej wartości był zbliżony (rys. 5). W serii pomiarów oczyszczania ścieków komunalnych z napowietrzaniem największą szybkość usuwania ChZT uzyskano w pierwszych czterech dniach pomiaru. Redukcja ChZT przy wykorzystaniu ogniwa paliwowego następowała równomiernie podczas całego cyklu. Dla serii pomiarów dotyczących zmian stężeń $NH_4^+$ wykazano, że praktycznie wyeliminowano ten parametr tylko w przypadku napowietrzania ścieków. W serii pomiarów z wykorzystaniem mikrobiologicznego ogniwa paliwowego nie odnotowano praktycznie zmian stężenia $NH_4^+$ w czasie. W pomiarach zmian wartości stężeń $NO_3^-$ w czasie wykazano, że w serii pomiarów z mikrobiologicznym ogniwem paliwowym wartość stężenia $NO_3^-$ zredukowano o 91% (w czasie 16-u dni). Wzrost stężenia $NH_4^+$ podczas napowietrzania wynika z przyłączania jonu wodorowego do cząstki amoniaku (np. w wyniku procesu gnilnego) [18-20], natomiast wzrost stężenia $NO_3^-$ (rys. 6 i rys. 7) jest wynikiem procesu nitryfikacji podczas rozwoju bakterii [21, 22]. Uzyskana w MFC ilość energii jest niewielka (0,87 Wh), jednak wykorzystanie MFC pozwoliłoby na całkowite zaoszczędzenie energii potrzebnej do napowietrzania zbiorników. Wyniki przeprowadzonych badań wykazały, że istnieje możliwość zastosowania stopu Cu-B jako katalizatora katody w mikrobiologicznym ogniwie paliwowym do oczyszczania ścieków komunalnych.

### Literatura

[1] Logan B.E.: Microbial fuel cell, John Wiley & Sons, 2007.

[2] Logan B.E., Hamelers B., Rozendal R., Schrorder U., Keller J., Freguia S., Aelterman P., Verstraete W., Rabaey K.: Microbial fuel cells: Methodology and technology. Environmental Science & Technology. v.40, 2006, pp.5181-5192.

[3] Rabaey K., Verstraete W.: Microbial fuel cells: novel biotechnology from energy generation. Trends Biotechnol. 23, 2005, pp.291-298.

[4] Kim H.J., Park H.S., Hyun M.S., Chang I.S., Kim M., Kim B.H.: A mediator-less microbial fuel cell using a metal reducing bacterium, Shewanella putrefacians. Enzyme Microbiol. Technol., 30, 2002, pp.145-152.

[5] Park H.S., B.H. Kim B.H., Kim H.S., Kim H.J., Kim G.T., Kim M., Chang I.S., Park Y.K., Chang H.I.: A novel electrochemically active and Fe(III)-reducing bacterium phylogenetically related to Clostridium butyricum isolated from a microbial fuel cell. Anaerobe, 7, 2001, pp.297-306.

[6] Allen R.M., Benetto H.P.: Microbial Fuel Cells: electricity production from carbohydrates. Appl. Biochem. Biotech., 39, 1993, pp.27-40.

[7] Chaudhuri S.K., Loveley D.R.: Electricity generation by direct oxidation of glucose in mediatorless microbial fuel cells. Nat. Biotechnol. v.21, 2003, pp.1229-1232.

[8] Bond D.R., Lovley D.R.: Electricity production by Geobacter sulfurreducens attached to electrodes, Appl. Environ. Microbiol., 69, 2003, pp.1548-1555.

[9] Liu H., Cheng S., Logan B.E.: Production of electricity during wastewater treatment using a single chamber microbial fuel cell. Environ. Sci. Technol. 38, 2004, pp.2281-2285.

[10] Logan B.E.: Biologically extracting energy from wastewater: biohydrogen production and microbial fuel cells. Environ. Sci. Technol. 38, 2004, pp.160A-167A.

[11] Rabaey K., Aelterman P., Clauwaert P., L. De Schamphelaire, Boon N., Verstraete W.: Microbial fuel cells in relations to conventional anaerobic digestion technolog engineering in Life Sciences, 6, 2006, pp.285-292.

[12] Włodarczyk B., Włodarczyk P.P.: Electricity production in microbial fuel cell with Cu-B alloy as catalyst of anode, QUAESTI-Virtual Multidisciplinary Conference, 3 (1), 2015, pp.305-308. DOI: 10.18638/quaesti.2015.3.1.211.

[13] Włodarczyk P.P., Włodarczyk B.: Electrooxidation of hydrazine with copper boride catalyst, Conference proceedings, 21st International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA, P1.131, 2014.

[14] Włodarczyk P.P., Włodarczyk B.: Analysis of the possibility of using stainless steel and copper boride alloy as catalyst for microbial fuel cell fuel electrode, Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska, 17 (1), 2015, pp.111-118.

[15] Huggins T., Fallgren P.H., Jin S., Ren Z.J.: Energy and performance comparison of microbial fuel cell and conventional aeration treating of wastewater, J. Microb. Biochem. Technol., S6:002, 2013. DOI:10.4172/1948-5948.S6-002.

[16] Włodarczyk B., Włodarczyk P.P.: Porównanie skuteczności elektroutleniania w mikrobiologicznym ogniwie paliwowym z katalizatorem stalowym i napowietrzania w oczyszczaniu ścieków, Inżynieria i Ochrona Środowiska, 18 (2), 2015, pp.189-198.

[17] Sumner J.J., Creager S.E., Ma J.J.: DesMarteau D.D, Proton Conductivity in Nafion 117 and in a Novel Bis[(perfluoroalkyl)sulfonyl]imide Ionomer Membrane, J. Electrochem. Soc., 145 (1), 1998, pp. 107-110. DOI: 10.1149/1.1838220.

[18] Bielański A.: Chemia ogólna i nieorganiczna, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, 1981.

[19] Bielański A.: Podstawy chemii nieorganicznej, Wydawnictwo Naukowe PWN, 2013.

[20] Schweda E.: Chemia nieorganiczna, Wydawnicttwo Medpharm, 2014.

[21] Łomotowski J., Szpindor A.: Nowoczesne systemy oczyszczania ścieków, Arkady, 2002.

[22] Ren Z., Yan H., Wang W., Mench M.M., Regan J.M.: Characterization of microbial fuel cells at microbially and electrochemically meaningful time scales, Environ. Sci. Technol., 45 (6), 2011, pp.2435-2441.

## MICROBIAL FUEL CELL WITH Cu-B CATHODE

**S u m m a r y**

In microbial fuel cell as electrode are used carbon cloth (or carbon cloth with 1% Pt) electrodes are most common. The paper presents an analysis of the possibilities of using Cu-B alloy as cathode catalyst in microbial fuel cells. The measurements included a preparation of catalyst, analysis of its activity in reduction $H_2O_2$ and comparison of changes in the concentration of COD, $NH_4^+$ oraz $NO_3^-$ in the reactor with aeration and with using a microbial fuel cell (with Cu-B cathode). The reduction time for COD with the use of microbial fuel cell with the Cu-B catalyst is similar to the reduction time with aeration. The obtained current density (0.21 mA/cm$^2$) and amount of energy are low (0.87 Wh), but this power was obtained in small reactor (15l). However, the obtained amount of energy allows elimination of the energy needed for reactor aeration. It has been shown that the Cu-B can be used as cathode catalyst in microbial fuel cell.

**Keywords:** microbial fuel cell, catalyst, Cu-B alloy, cathode, environmental engineering, renewable energy sources

DOI:10.7862/rb.2016.236

*Przesłano do redakcji: 03.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 533-542

**Krystyna WRÓBEL**[1]
**Wiesław KUBISZYN**[2]

# REMONT ZABYTKOWEGO OGRODZENIA LETNIEGO PAŁACU LUBOMIRSKICH W RZESZOWIE

Letni Pałac Lubomirskich wraz z otoczeniem jest jednym z najcenniejszych zabytków architektury niesakralnej w Rzeszowie. W roku 2013 Okręgowa Izba Lekarska zakupiła Pałac od ostatnich właścicieli - rodziny Nieciów na swoją siedzibę. Zaplanowano remont całego kompleksu. Prace remontowe budynku są w toku. W 2015 roku przeprowadzono gruntowny remont ogrodzenia z uwagi na jego katastrofalny stan techniczny. Cel główny jaki przyświecał działaniom, to zachowanie (w maksymalnym możliwym stopniu) substancji istniejącej. Wyremontowano i zabezpieczono przed oddziaływaniem wilgoci gruntowej i atmosferycznej trzy strony ogrodzenia, pozostawiając stronę wschodnią. Remont polegał na naprawie i wzmocnieniu słupów od ul. Dekerta, wzmocnieniu i zabezpieczeniu przed dalszymi uszkodzeniami istniejącej ściany oporowej oraz dobudowie fragmentu ściany koniecznego do utrzymania stabilności ogrodzenia, przebudowie pozostałych słupów z dwóch stron posesji oraz murków pomiędzy słupami. Wszystkie słupy zabezpieczono głowicami żelbetowymi odwzorowującymi kształt zastanych. Odcinek frontowy, wszystkie naroża i wejście od ul. Dekerta zaakcentowano ustawiając na słupach ozdobne wazy. Wykonano nową bramę wjazdową z wykorzystaniem elementów starej bramy, jej skrzydła ozdobiono replikami herbu Lubomirskich wykutymi w blasze, a bramkę obok bramy wykonano odwzorowując istniejącą od strony ul. Dekerta. Przęsła stalowe ogrodzenia - po naprawie i renowacji wykorzystano istniejące. W referacie szczegółowo opisano stan techniczny ogrodzenia przed remontem oraz sposób i zakres wykonanych prac remontowych.

**Słowa kluczowe:** stan techniczny, zabezpieczenie, korozja biologiczna, słupy, ściana oporowa

## 1. Wprowadzenie

Letni Pałac Lubomirskich w Rzeszowie został wybudowany pod koniec XVII wieku w stylu barokowym przez Hieronima Augustyna Lubomirskiego [1, 2]. Franciszek Lubomirski sprzedał Pałac wraz z otoczeniem w 1798 r. Po czym

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Krystyna Wróbel, Politechnika Rzeszowska, Katedra Konstrukcji Budowlanych, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651553; wrobel@prz.edu.pl

[2] Wiesław Kubiszyn, Politechnika Rzeszowska, Katedra Konstrukcji Budowlanych, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów; tel. 178651553; wkubisz@prz.edu.pl

miał on kilku właścicieli, a w latach 70-tych XX wieku został wywłaszczony. Po remoncie przeprowadzonym w 1981 roku Pałac użytkowało Miasto.

Pałac wraz z otoczeniem został wpisany do ewidencji zabytków w 1968 r. pod numerem ewidencyjnym A-292 na podstawie Karty Zabytku [2]. W roku 2013 stał się własnością Okręgowej Izbie Lekarskiej w Rzeszowie z przeznaczeniem na jej siedzibę. Wnętrza Pałacu, a następnie jego ogrodzenie poddano gruntownemu remontowi na podstawie wcześniej opracowanych projektów.

## 2. Opis ogrodzenia

Ogrodzenie otacza całą posesję przynależną do Pałacu. Z zapisków historycznych [3] wynika, że już w XIX wieku Pałac ogrodzono na nowo, wystawiono ceglane murki i słupy zwieńczone gzymsowaniem oraz wazami pochodzącymi z dawnego ogrodu kwiatowego (rys. 1).



Rys. 1. Widok Pałacu i ogrodzenia od strony południowo-zachodniej. Rys. Edward Janusz [3]

Fig. 1. View of the Palace and the fence from the south -west. Fig. by Edward Janusz [3]

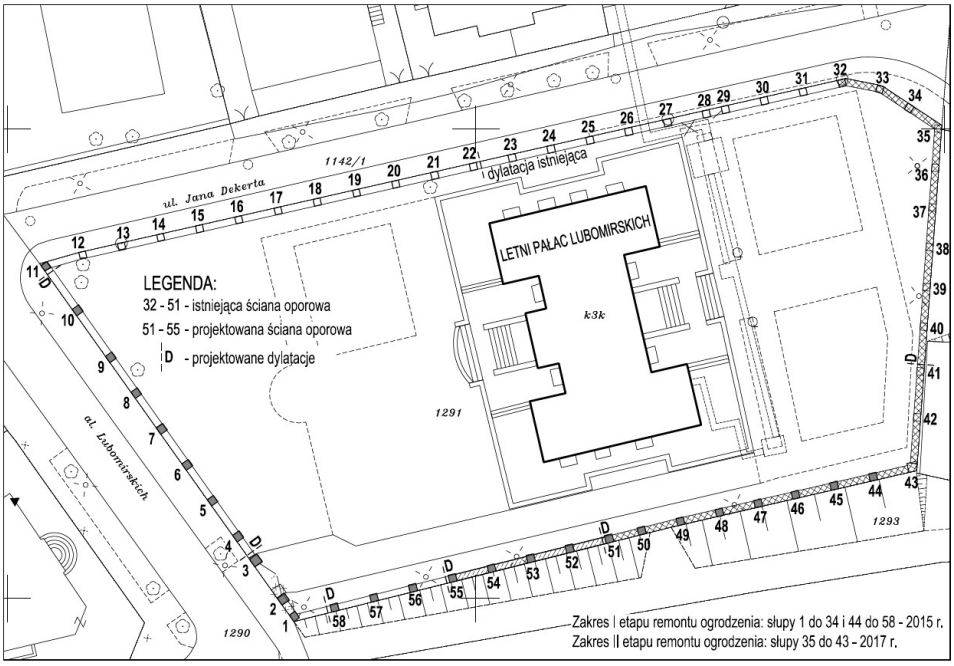
Z Karty Ewidencji Zabytku [2] wynika, że w roku 1959 13 szt. waz było ustawionych na ogrodzeniu od strony południowo-zachod-niej. Stopniowo ich liczbę zwiększono do 25. Na podstawie wywiadu z sąsiadami ustalono, że obecna forma ukształtowania terenu wokół Pałacu powstała w latach 60-tych poprzez podniesienie poziomu terenu od strony wschodniej o około 2,0 m. Wówczas to przebudowano słupy ogrodzeniowe od strony wschodniej i południowej, posadawiając je na ścianie oporowej. Przęsła ogrodzeniowe drewniane zamieniono na stalowe.

Przed remontem przeprowadzonym w roku 2015 ogrodzenie było wykonane w postaci słupów ceglanych z profilowaniem i pogrubieniami przy podstawach i głowicach. Słupy były zwieńczone głowicami o różnych kształtach

i rozwiązaniach materiałowych, betonowe - młodsze wzdłuż granicy wschodniej i południowej (powstały około roku 1960) i ceglane - starsze.

## 3. Opis stanu technicznego ogrodzenia przed remontem

Układ ogrodzenia w terenie z określeniem zakresu i etapów remontu pokazana na rys. 2. Widok ogólny ogrodzenia przed remontem przedstawia rys. 3. Jego stan techniczny oceniono jako katastrofalny na podstawie szczegółowych ekspertyz mykologicznej, konstrukcyjnej-budowlanej i opinii geotechnicznej zawartych w [4].




Rys. 2. Układ ogrodzenia w terenie z określeniem zakresu i etapów remontu [4]

Fig. 2. Layout of the fence in the area with define the field and stages of repair [4]



Rys. 3. Widok ogólny ogrodzenia od strony południowej - stan przed remontem

Fig. 3. General view of the fence on the south side - the state before the renovation

### 3.1. Ogrodzenie wzdłuż Al. Lubomirskich (słupy 1 ÷ 11)

Stan techniczny słupów ceglanych i murków ceglanych pomiędzy słupami oceniono jako awaryjny (rys. 4). Degradacja elementów ogrodzenia nastąpiła w całej grubości przekroju i wzdłuż całej ich wysokości (oprócz słupa nr 2 przemurowanego w latach 80-tych). Zbyt płytkie posadowione słupów ogrodzenia skutkowało licznymi zarysowaniami, spękaniami, wychyleniami i brakiem stabilności. Stan murków przęsłowych oceniono podobnie.




Rys. 4. Widok ogólny bramy i słupów nr 2 i 3

Fig. 4. General view of the gate and columns 2 and 3

### 3.2. Ogrodzenie wzdłuż ul. Dekerta (słupy 12 ÷ 34)

Stan techniczny tej części ogrodzenia okazał się najlepszy (rys. 5):

- posadowienie słupów prawidłowe - stan dobry,
- izolacje poziome z papy (z niewielkimi ubytkami) pomiędzy częścią murowaną słupów i fundamentami betonowymi w dobrym stanie,
- trzony słupów z ubytkami, ale nadające sie do remontu,
- część głowicowa wszystkich słupów w stanie awaryjnym, zawilgocone i przemrożone, odpadające fragmenty tynków i cegieł stanowią zagrożenie bezpieczeństwa życia i zdrowia ludzi,
- murki pomiędzy słupami - stan techniczny zły.




Rys. 5. Słup nr 18: a) widok ogólny od strony zewnętrznej, b) widok głowicy od strony posesji, c) widok podstawy od strony posesji

Fig. 5. Column No 18: a) general view from the outside, b) view of the head of the column on the inside, c) view of base of them on the inside

### 3.3. Ogrodzenie - strona południowa (słupy 43 ÷ 58)

Ściana oporowa wykonana z materiałów złej jakości, liczne ubytki, spękania i uszkodzenia (rys. 6, 8), stan bardzo zły - wymaga gruntownego remontu,

- brak jakiejkolwiek izolacji przeciwwilgociowej, co spotęgowało zakres zniszczeń i degradacji biologicznej wszystkich elementów ogrodzenia (rys. 6-9),
- słupy i ceglane, murki przęsłowe - bardzo zły stan techniczny - degradacja materiału tych elementów objęła równomiernie ich przekrój wzdłuż wysokości,
- odpadające luźne kawałki materiałów budulcowych ogrodzenia w tym obszarze, gdzie na teren rekreacyjny przy fontannie przychodzi bardzo wiele osób stanowią potencjalne zagrożenie zdrowia i życia ludzi.




Rys. 6. Zaniedbania wykonawcze ściany oporowej (pod słupem 44 pozostawiony pień drzewa), degradacja murków ceglanych

Fig. 6. Implementing negligence the retaining wall (under the column 44 left a tree trunk), the degradation of brick walls




Rys. 7. Widok uszkodzeń głowicy słupa nr 45

Fig. 7. View of damage to the column head 45




Rys. 8. Uszkodzenia pomiędzy słupami 49-50

Fig. 8. Damage in the area between columns 49-50




Rys. 9. Pionowe pęknięcie słupa 49

Fig. 9. The vertical crack of the column 49

## 3.4. Ogrodzenie - strona wschodnia (słupy 35 - 42)

- słupy ogrodzenia i murków przęseł 35-40, stan analogiczny jak ogrodzenia od strony ul. Dekerta,
- stan ściany oporowej, słupów i przęseł na niej posadowionych analogiczny jak ogrodzenia od strony południowej.

# 4. Zakres przeprowadzonego remontu

Prace i zasady dotyczące całego ogrodzenia:

- jako kryterium wiodące przyjęto pozostawienie substancji istniejącej w maksymalnym możliwym zakresie,
- rozebrano wszystkie głowice słupów i ceglane murki przęsłowe,
- zabezpieczono elementy ogrodzenia przed wpływem agresji i wilgoci gruntowej oraz niekorzystnymi czynnikami atmosferycznymi,
- odtworzono ww. elementy w linii i kształcie ogrodzenia pierwotnego,
- odcinek frontowy, wszystkie naroża i wejście od ul. Dekerta zaakcentowano ustawiając na słupach ozdobne wazy,
- wykorzystano istniejące przęsła stalowe ogrodzenia - po naprawie i renowacji.

Zakres pozostałych prac dotyczący poszczególnych części ogrodzenia przedstawiono w kolejnych punktach.

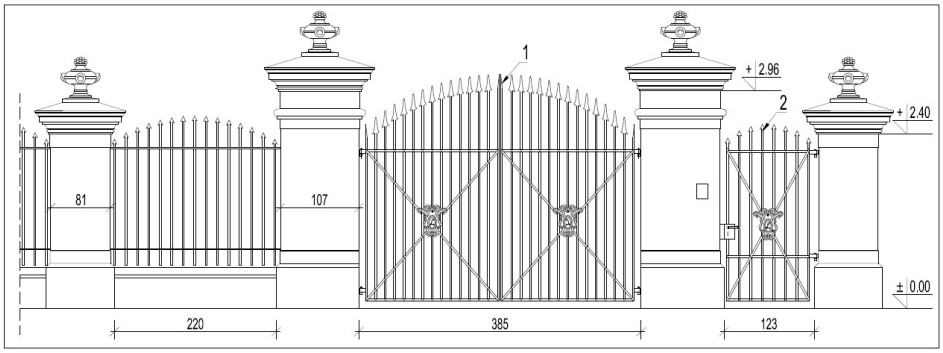
## 4.1. Ogrodzenie wzdłuż Al. Lubomirskich

Rozbiórka ogrodzenia w całości i odtworzenie w następujący sposób:

- fundamenty i cokoły słupów jako żelbetowe,
- trzony słupów - jako ceglane z rdzeniem żelbetowym, a ich głowice jako żelbetowe, prefabrykowane,
- podwaliny pod przęsła ogrodzenia jako żelbetowe, oparte na cokołach słupów, zabezpieczono od wierzchu czapkami żelbetowymi prefabrykowanymi.

Słupy bramy i bramki połączono wspólną podwaliną w celu wyeliminowania wzajemnego przemieszczania się tych elementów względem siebie.

Zastosowane rozwiązania architektoniczne pokazano na rys. nr 10.




Rys. 10. Rysunek rekonstrukcji elementów ogrodzenia wzdłuż Al. Lubomirskich: 1) Brama wjazdowa wyremontowana z wykorzystaniem istniejących elementów stalowych, repliki herbu Lubomirskich wykuto w blasze, 2) Bramka wykonana na wzór bramki od ul. Dekerta. Autor - architekt S. Hałabuz [4]

Fig. 10. Reconstruction drawing of the fence along the Lubomirski Avenue: 1) The entrance gate restored using existing elements, a replica of the Lubomirski coat of arms carved in the steel plate, 2 ) Gateway was made on the model of gateway from the Dekert street. Author - architect S. Hałabuz [4]

## 4.2. Ogrodzenie wzdłuż ul. Dekerta

- rozbiórka uszkodzonych, zawilgoconych i zagrzybionych głowic ceglanych wszystkich słupów oraz w całości cokołów przęseł ogrodzenia,
- skucie tynków z całej powierzchni słupów pozostawianych, uzupełnienie izolacji poziomej, uzupełnienie cegłą pełną ubytków trzonów słupów,
- naprawa betonowych cokołów słupów jednym z systemów naprawczych PCC,
- budowa nowych cokołów przęseł ogrodzenia jako żelbetowych,
- otynkowanie słupów systemem tynków renowacyjnych,
- montaż nowych, żelbetowych głowic słupów i czapek cokołów przęseł ogrodzenia.

## 4.3. Ogrodzenie strona południowa

Rozbiórka ogrodzenia posadowionego na gruncie w całości, a posadowionego na ścianie oporowej, do poziomu wierzchu ściany i odtworzenie go w zakresie:

- naprawy istniejącej ściany oporowej poprzez zszycie powstałych pęknięć, uzupełnienie podstawy ściany w obszarze, gdzie posadowiono ją na pniu ściętego drzewa(rys. 6.), reperacja ubytków korozyjnych betonu systemem zapraw naprawczych PCC,
- w obszarze dużej różnicy terenu po obu stronach ogrodzenia wybudowanie odcinka ściany oporowej celem posadowienia ogrodzenia (pomiędzy słupami 51-55), w nawiązaniu do poziomu posadowienia ściany istniejącej,
- odwodnienie obszaru za ścianą oporową z zastosowaniem drenażu.

Z uwagi na fakt, że stan ogrodzenia w pozostałym zakresie był identyczny jak ogrodzenia od strony Al. Lubomirskich sposób odtworzenia ogrodzenia identyczny jak wyżej wymienionego.



Rys. 11. Widok ogrodzenia od strony południowej - stan po remoncie

Fig. 11. View of the fence on the south side - the state after repairs

## 5. Podsumowanie

1) Brak jakiegokolwiek zabezpieczenia przed oddziaływaniem czynników agresywnych, wcześniejsze remonty - powierzchowne i niezgodne ze sztuką budowlaną oraz brak dbałości o stan techniczny ogrodzenia poprzednich właścicieli i użytkowników Pałacu doprowadziły do całkowitego zużycia technicznego większości elementów ogrodzenia.
2) Przywrócenie stanu prawidłowego wymagało dużych nakładów finansowych i organizacyjnych oraz zaangażowania wielu osób.
3) Ścisła współpraca właściciela Pałacu, Wojewódzkiego Urzędu Ochrony Zabytków, autorów prac projektowych i eksperckich, ścisły nadzór nad prowadzonymi pracami restauracyjnymi, staranne wykonawstwo oraz znacząca pomoc finansowa Prezydenta Miasta Rzeszowa pozwoliły doprowadzić ogrodzenie terenu do stanu prawidłowego, uzyskać jego lekką formę, podkreślającą kunszt bryły budynku (rys. 11).

## Literatura

[1] Kotula F.: Tamten Rzeszów, Wydawnictwo LIBRI RESSOVIENSES, Rzeszów 1997.

[2] Karta Ewidencji Zabytku obiektu zabytkowego "Zespół Pałacu Letniego Lubomirskich" wypełniona 31.VIII.1959r. przez T. Żurawską.

[3] http://www.rzeszow.pl/miasto-rzeszow/historia/zabytki-rzeszowa/palac-letni-lubomirskich {dostęp 30.04.2016 r.}.

[4] Ekspertyza stanu technicznego ogrodzenia Letniego Pałacu Lubomirskich. opracowana przez WIK K. Wróbel i W. Kubiszyn w maju 2015 r.

## REPAIRS OF HISTORICAL FENCE OF THE SUMMER LUBOMIRSKI PALACE IN RZESZÓW

**S u m m a r y**

Lubomirski Summer Palace and its surroundings is one of the most valuable, not sacred monuments of Rzeszow. In 2013 it was bought by the Regional Medical Chamber from the last private owners and was allocated for its headquarters. Comprehensive overhaul of whole facility was planned, repair works of the building are currently in progress. In 2015 Medical Association conducted a thorough renovation of the fence, necessary because of its catastrophic condition. The main objective was to preserve existing substance to the maximum possible extent. Three sides of the fence, apart from the east side, were repaired and protected against the effects of ground and atmospheric moisture. Renovation consisted of repairing and strengthening the columns along the Dekerta street, strengthening and protection against further damage the existing retaining wall and its extension, necessary to maintain the stability of the fence. There was also performed a reconstruction of remaining columns and brick walls between them. All the columns were secured with reinforced concrete heads in a shape with replicates the existing ones. Front section, all the corners and entrance from the Dekerta street were accented by setting decorative vases on each columns. New gateway was made using old elements, its leaves were decorated with replicas of the Lubo-

mirski coat of arms carved in the steel plate. Small gate next to the main one was made by mapping the existing one from the Dekerta street. The existing steel fence spans were reused after their repair and renovation. The paper describes in details the technical condition of the fence before the renovation, the way and range of the performed repair work.

**Keywords:** technical condition, protection, biological corrosion, column, retaining wall

DOI:10.7862/rb.2016.237

*Przesłano do redakcji: 20.04.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 543-552

**Wojciech ZALEWSKI**[1]

# OBLICZENIA CIEPLNE WYMIENNIKA STANOWIĄCEGO UJĘCIE DOLNEGO ŹRÓDŁA CIEPŁA POWIETRZNEJ POMPY CIEPŁA

W pracy przedstawiono sposób przeprowadzania obliczeń cieplnych lamelowanego wymiennika ciepła, stanowiącego ujęcie dolnego źródła ciepła powietrznej pompy ciepła, pełniącego w obiegu termodynamicznym pompy funkcję parowacza. Podano algorytm obliczeń pozwalający na wyznaczenie pola powierzchni wymiany ciepła przy znanej wydajności cieplnej wymiennika. Posłużono się metodą NTU, służąca do przeprowadzania obliczeń cieplnych wymienników. Do wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła od strony powietrza zastosowano wzór *Schmidta* [4], dotyczący wymiany ciepła na powierzchniach ożebrowanych. Sprawność lameli określono w przybliżony sposób za pomocą wzorów odnoszących się do żeber, dzieląc lamelę na żebra o kształcie wynikającym z układu przestrzennego rur. W obliczeniach uwzględniono również, za pomocą współczynnika wymiany wilgoci *RCJ*, wpływ ciepła utajonego wykraplającej się z powietrza pary wodnej na intensywność wymiany ciepła. Ze względu na możliwość pracy wymiennika w warunkach oszronienia powierzchni wymiany ciepła, przedstawiono sposób uwzględnienia wpływu powstającej warstwy szronu na wartość współczynnika przenikania ciepła. Współczynnik przejmowania ciepła przy wrzeniu czynnika roboczego w rurach proponuje się wyznaczać za pomocą uogólnionej korelacji *Iwaszkiewicza* [6]. Stosowanie wzorów *Schmidta* i *Iwaszkiewicza* ograniczone jest zakresami ich ważności, które podane są we wskazanych materiałach źródłowych. Przedstawiony algorytm obliczeń cieplnych wymienników lamelowanych może zostać wykorzystany do przeprowadzania obliczeń mających na celu weryfikację istniejących rozwiązań konstrukcyjnych, a także uzupełnienie i rozszerzenie danych eksploatacyjnych, podawanych przez producentów wymienników ciepła i pomp ciepła.

**Słowa kluczowe:** wymiana ciepła, lamelowany wymiennik ciepła, parowacz, współczynnik przejmowania ciepła, pole powierzchni wymiany ciepła

## 1. Wprowadzenie

Pompy ciepła zyskują ciągle na znaczeniu jako urządzenia grzewcze, stosowane głównie do ogrzewania pomieszczeń i przygotowania ciepłej wody użytkowej. W ostatnich latach daje się zauważyć gwałtowny wzrost popularno-

[1] Wojciech Zalewski, Politechnika Krakowska, Zakład Chłodnictwa i Klimatyzacji, al. Jana Pawła II 37, 31-864 Kraków; tel. 126283590; e-mail: wzalewski@pk.edu.pl

ści pomp ciepła typu powietrze-woda, czyli takich, w których dolnym źródłem ciepła jest powietrze zewnętrzne lub powietrze wentylacyjne. Tylko w okresie od 2014 do 2015 roku nastąpił w Polsce ponad 70 procentowy wzrost liczby zamontowanych powietrznych pomp ciepła [1].

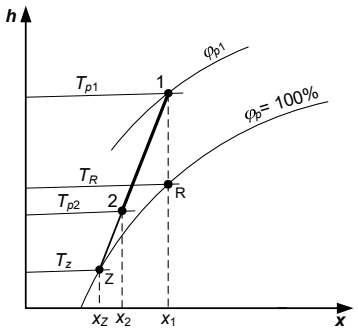
Wymiennikiem ciepła stanowiącym ujęcie dolnego źródła ciepła w tego typu pompach jest parowacz, czyli wymiennik, w którym zachodzi proces wrzenia czynnika roboczego. Najczęściej są to wymienniki z wymuszonym wentylatorem przepływem powietrza. Zasadniczą ich część stanowią wężownice wykonane z miedzianych rur i aluminiowych lamel.

Producenci pomp ciepła najczęściej oferują kompletne urządzenia, składające się ze sprężarki, wymienników dolnego i górnego źródła ciepła oraz potrzebnej automatyki. W niektórych przypadkach zdarzyć się może, że projektant zmuszony będzie do dobrania, a nawet zaprojektowania we własnym zakresie niektórych elementów pompy ciepła, w tym parowacza.

## 2. Opis procesu odbioru ciepła w wymienniku

Podczas pracy pompy ciepła w parowaczu następuje proces chłodzenia powietrza, przy czym może występować tylko sam odbiór ciepła z powietrza lub może mu towarzyszyć odprowadzenie wilgoci i osuszanie powietrza. Samo ochładzanie występuje wtedy, gdy temperatura powierzchni chłodzącej $T_z$ jest wyższa od temperatury nasycenia pary wodnej (temperatury punktu rosy powietrza $T_R$). Wtedy proces chłodzenia przebiega bez zmiany zawartości wilgoci w powietrzu.

Najczęściej temperatura powierzchni chłodzącej jest niższa od temperatury punktu rosy przepływającego powietrza. Wtedy wykrapla się na niej para wodna w postaci wody. Zachodzi więc jednocześnie proces ochładzania i osuszania powietrza. Przebieg zmian parametrów powietrza w wymienniku dla tego przypadku można przedstawić w sposób uproszczony na wykresie *Molliera* dla powietrza wilgotnego w układzie "entalpia właściwa $h$ - zawartość wilgoci $x$" w postaci odcinka "1-2" (rys. 1).




Rys. 1. Przebieg zmian parametrów powietrza w wymienniku: 1 – stan powietrza przed wymiennikiem, 2 – stan powietrza za wymiennikiem, Z – stan powietrza nasyconego w średniej temperaturze powierzchni wymiany ciepła $T_z$, $T_R$ – temperatura punktu rosy

Fig. 1. Changes in air parameters inside the exchanger: 1 – air condition upstream of the exchanger, 2 – air condition downstream of the exchanger, Z – air in a saturated state at the mean temperature of the heat exchange surface $T_z$, $T_R$ – dew point temperature

## 3. Algorytm obliczeń cieplnych

Przedstawiony zostanie sposób wyznaczania pola powierzchni wymiany ciepła wymiennika lamelowanego, stanowiącego ujęcie dolnego źródła ciepła (parowacza pompy ciepła), przewidzianego do pracy w określonych warunkach cieplno-przepływowych. Na podstawie otrzymanych wyników obliczeń możliwe jest dobranie lub zaprojektowanie wymiennika, który będzie w stanie odebrać odpowiednią ilość ciepła niskotemperaturowego, zapewniającego właściwe działanie pompy ciepła. Znając wymaganą wydajność pompy ciepła $\dot{Q}_g$ i określając parametry, realizowanego przez pompę, obiegu termodynamicznego, które determinują wartość współczynnika wydajności cieplnej pompy *COP*, można wyznaczyć ze wzoru (1) wymaganą wydajność cieplną wymiennika dolnego źródła ciepła $\dot{Q}_d$ :

$$\dot{Q}_d = \dot{Q}_g \frac{COP-1}{COP} \tag{1}$$

Wartość współczynnika wydajności cieplnej *COP* zależy od rodzaju czynnika roboczego i parametrów pracy pompy (przyjętego obiegu termodynamicznego).

Jako dane do obliczeń przyjmuje się:

- parametry cieplno-przepływowe:
  - wydajność cieplna: $\dot{Q}_d$ , [W],
  - strumień objętości powietrza: $\dot{V}_p$ , [m$^3$/s],
  - temperatura i wilgotność względna powietrza na wlocie do wymiennika, odpowiednio: $T_{p1}$, [$^o$C], $\varphi_{p1}$, [-],
  - temperatura wrzenia czynnika: $T_o$, [$^o$C],
  - praca w układzie ciśnieniowym (całkowite odparowanie czynnika w parowaczu).
- parametry konstrukcyjne:
  - średnica zewnętrzna i wewnętrzna rur, odpowiednio: $d_z$ i $d_w$, [m],
  - podziałka lamel: $t$, [m],
  - grubość lamel: $\delta_z$, [m],
  - podziałka poprzeczna układu rur: $S_q$, [m],
  - podziałka podłużna układu rur: $S_l$, [m].

Wydajność cieplną parowacza można wyznaczyć z zależności:

$$\dot{Q}_o = \varepsilon \dot{W}_p \left(T_{p1} - T_o\right) \tag{2}$$

gdzie: $\varepsilon$ – sprawność termodynamiczna wymiennika,

$\dot{W}_p$ – pojemność cieplna strumienia powietrza, [W/K]:

$$\dot{W}_p = \dot{V}_p \, \rho_p \, c_{pp} \, RCJ \tag{3}$$

gdzie: $\rho_p$ – gęstość powietrza, [kg/m$^3$],
$c_{pp}$ – ciepło właściwe powietrza, [J/(kg/K)],
$RCJ$ – współczynnik wymiany wilgoci równy stosunkowi ciepła całkowitego do ciepła jawnego procesu; jeżeli w wymienniku zachodzi tylko proces chłodzenia powietrza, bez jego osuszania: $RCJ$ = 1,0.

Wartość współczynnika *RCJ* można wyznaczyć z odpowiednich wzorów [2], [3] lub odczytać z wykresu *Molliera*.

Sprawność termodynamiczną parowacza $\varepsilon$ oblicza się z zależności:

$$\varepsilon = 1 - e^{-NTU}, \tag{4}$$

a liczbę jednostek przepływu ciepła *NTU*:

$$NTU = \frac{k_{Aw} A_w}{\dot{W}_p} \tag{5}$$

gdzie: $A_w$ – pole wewnętrznej powierzchni wymiany ciepła, [m$^2$],
$k_{Aw}$ – współczynnik przenikania ciepła odniesiony do wewnętrznej powierzchni wymiany ciepła $A_w$, [W/(m$^2$K)]:

$$k_{Aw} = \frac{1}{\dfrac{1}{\alpha_o} + \dfrac{\delta_r}{\lambda_r}\dfrac{d_w}{d_m} + R_z + \dfrac{A_w'}{\alpha_p \left( A_r' + \varepsilon_{\dot{z}} \, A_{\dot{z}}' \right)}} \tag{6}$$

gdzie: $\alpha_o$ – współczynnik przejmowania ciepła po stronie wrzącego czynnika roboczego w rurach, [W/(m$^2$K)],
$\alpha_p$ – współczynnik przejmowania ciepła po stronie powietrza, [W/(m$^2$K)],
$\delta_r$ – grubość ścianki rury, [m],
$\lambda_r$ – współczynnik przewodzenia ciepła materiału rury, [W/(mK)],
$A'_r$ – pole powierzchni zewnętrznej rury pomiędzy lamelami, [m$^2$/mb],
$A'_{\dot{z}}$ – pole powierzchni lamel, [m$^2$/mb],
$d_m$ – średni promień rury, [m],
$\varepsilon_{\dot{z}}$ – sprawność lamel, [-],
$R_z$ – dodatkowy opór cieplny, np. zanieczyszczeń, [m$^2$K/W].

Górny indeks „′” oznacza pole powierzchni odniesione do metra bieżącego długości rury.

Współczynnik przejmowania ciepła od strony powietrza $\alpha_p$ wyznacza się za pomocą dowolnego wzoru odnoszącego się do opływu pęczka rur lamelowanych. Można posłużyć się na przykład wzorem *Schmidta* [4], który po przekształceniu i uwzględnieniu współczynnika *RCJ* przyjmuje postać:

$$\alpha_p = K\, Re_p^{0,6} \left( \frac{A_c'}{A_o'} \right)^{-0,15} Pr_p^{1/3} \frac{\lambda_p}{d_z} RCJ \tag{7}$$

gdzie: $K$ – stała, zależna od układu przestrzennego rur; $K = 0{,}22$ dla szeregowego układu rur oraz $K = 0{,}38$ dla układu przestawnego,

$A'_c$ – pole zewnętrznej powierzchni wymiany ciepła (lamelowanej) równe sumie pola powierzchni rury pomiędzy lamelami $A_r'$ i powierzchni lamel $A'_ż$: $A'_c = A'_r + A'_ż$, [m$^2$/mb],

$A'_o$ – pole zewnętrznej powierzchni rury gładkiej (bez lamel), [m$^2$/mb],

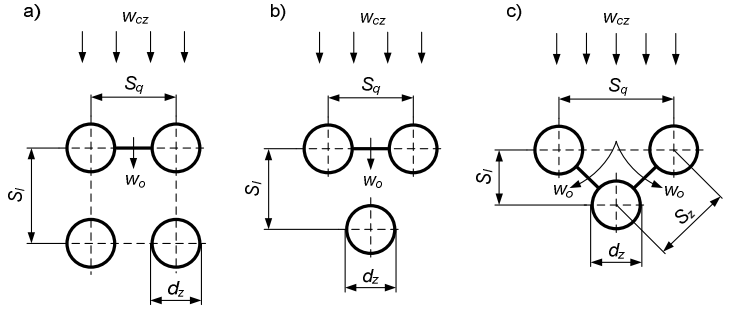
$Pr_p$ – liczba Prandtla,

$\lambda_p$ – współczynnik przewodzenia ciepła powietrza, [W/(mK)].

Liczba Reynoldsa powietrza $Re_p$ zdefiniowana jest wzorem:

$$Re_p = \frac{w_o\, d_z\, \rho_p}{\mu_p} \tag{8}$$

gdzie: $\mu_p$ – współczynnik lepkości dynamicznej powietrza, [kg/(ms)], a $w_o$ oznacza prędkość przepływu powietrza w najmniejszym swobodnym przekroju wymiennika lamelowanego, określoną jak na rysunku 2 (wzory (9), (10)).




Rys. 2. Układ rur w wymienniku [3]: a) szeregowy; b) przestawny i $\frac{S_l}{d_z} \geq 0{,}5\left(2S_q / d_z + 1\right)^{0,5}$; c) przestawny i $\frac{S_l}{d_z} < 0{,}5\left(2S_q / d_z + 1\right)^{0,5}$

Fig. 2. Exchanger tube bundle [3]: a) in-line; b) staggered and $\frac{S_l}{d_z} \geq 0{,}5\left(2S_q / d_z + 1\right)^{0,5}$; b) staggered and $\frac{S_l}{d_z} < 0{,}5\left(2S_q / d_z + 1\right)^{0,5}$

Prędkość $w_o$ w przypadku powierzchni lamelowanych i szeregowego układ rur oblicza się z zależności:

$$w_o = w_{cz} \frac{S_q\, t}{\left(S_q - d_z\right)\left(t - \delta_{\dot{z}}\right)} \tag{9}$$

Dla przestawnego układu rur:

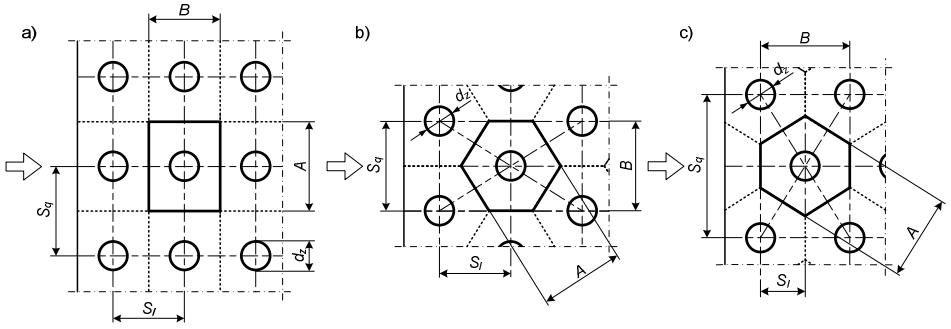
$$w_o = MAX\left( w_{cz} \frac{S_q\, t}{\left(S_q - d_z\right)\left(t - \delta_{\dot{z}}\right)}; w_{cz} \frac{0{,}5\, S_q\, t}{\left(S_z - d_z\right)\left(t - \delta_{\dot{z}}\right)} \right) \tag{10}$$

gdzie podziałka diagonalna $S_z$:

$$S_z = \left(0{,}25\, S_q^2 + S_l^2\right)^{0{,}5}, \tag{11}$$

a $w_{cz}$ oznacza prędkość powietrza w obrysie czołowym wymiennika.

Sprawność lamel $\varepsilon_{\dot{z}}$ wyznacza się w sposób przybliżony dzieląc lamele na żebra elementarne (rys. 3). Kształt tych żeber zależy od układu rozstawienia rur (szeregowy – prostokątne, przestawny – sześciokątne).




Rys. 3. Podział lameli na żebra [2]: a) szeregowy układ rur ($S_q > S_l$); b) przestawny układ rur i $S_l \geq 0{,}5S_q$; c) przestawny układ rur i $S_l < 0{,}5S_q$

Fig. 3. Division of plate fins into fins [2]: a) in-line tube bundle ($S_q > S_l$); b) staggered tube bundle and $S_l \geq 0{,}5S_q$; c) staggered tube bundle and $S_l < 0{,}5S_q$

$$\varepsilon_{\dot{z}} = \frac{tanh\left(m\, h_{\dot{z}}\right)}{m\, h_{\dot{z}}} \tag{12}$$

gdzie:

$$m = \sqrt{\frac{2\alpha_p}{\delta_{\dot{z}}\, \lambda_{\dot{z}}}} \tag{13}$$

gdzie: $\lambda_{ż}$ – współczynnik przewodzenia ciepła lamel, [W/(mK)].
Zastępcza wysokość żeber $h_{ż}$ [2], [3]:

$$h_{ż} = \frac{d_z}{2}(\varphi - 1)\left[1 + 0{,}35\, ln\, \varphi\right] \tag{14}$$

gdzie:

$$\varphi = Z_1 \frac{B}{d_z}\sqrt{\frac{A}{B} - Z_2} \tag{15}$$

Wartości stałych $Z_1$, $Z_2$, oraz wielkości $A$ i $B$ zależą od kształtu żeber. Dla żeber prostokątnych: $Z_1 = 1{,}28$, $Z_2 = 0{,}2$ oraz $A = \mathrm{MAX}(S_q,S_l)$, $B = \mathrm{MIN}(S_q,S_l)$. Dla żeber sześciokątnych: $Z_1 = 1{,}27$, $Z_2 = 0{,}3$ oraz $A = S_z$, $B = S_q$ gdy $S_l > 0{,}5S_q$ i $B = 2S_l$ gdy $S_l < 0{,}5S_q$ [2], [3].

Pompy ciepła pobierające ciepło z powietrza zewnętrznego mogą pracować także w niskich temperaturach, dochodzących nawet do -20°C. Wtedy ich efektywność działania radykalnie maleje i wymagane jest okresowe oszranianie powierzchni wymiany ciepła. Warstwa szronu tworzy się na powierzchni wymiany ciepła wtedy, gdy jej temperatura spada poniżej temperatury 0°C. Chcąc określić wydajność wymiennika w tych warunkach należy zmodyfikować sposób wyznaczania współczynnika przejmowania ciepła $\alpha_p$. Obliczenia przeprowadza się dla pewnej przyjętej, uśrednionej grubości warstwy szronu $\delta_{szr}$ (najczęściej przyjmuje się, że wynosi ona 15% odległości lamel), uwzględniając zmianę parametrów geometrycznych wymiennika.

W takim przypadku w obliczeniach należy uwzględnić zmianę, na skutek oszronienia, średnicy zewętrznej rury i grubości lameli oraz prędkości przepływu powietrza $w_o$, podstawiając we wzorach (7)-(10) w miejsce $d_z$ i $\delta_{ż}$ odpowiednio: $d_{zszr} = d_z + 2\delta_{szr}$ oraz $\delta_{ższr} = \delta_{ż} + 2\delta_{szr}$.

Wtedy współczynnik przejmowania ciepła po stronie powietrza $\alpha_p$, odniesiony do zewnętrznej, nieoszronionej powierzchni wymiany ciepła $A_c$ będzie wyrażał się zależnością:

$$\alpha_p = \frac{1}{\frac{A_c'}{A_{cszr}'}\frac{1}{\alpha_{pszr}} + \frac{A_c'}{A_{mszr}'}\frac{\delta_{szr}}{\lambda_{szr}}} \tag{16}$$

gdzie: $\alpha_{pszr}$ – współczynnik przejmowania ciepła do powierzchni oszronionej wymiennika, wyznaczony z uwzględnieniem zmiany geometrii wymiennika i prędkości przepływu powietrza $w_o$ spowodowanej oszronieniem, [W/(m$^2$K)],
$\lambda_{szr}$ – współczynnik przewodzenia ciepła szronu, [W/(mK)],
$A'_{cszr}$ – pole powierzchni oszronionej wymiennika, [m$^2$/mb],
$A'_{mszr}$ – średnie pole powierzchni oszronionej: $A'_{mszr} = 0{,}5\,(A'_c + A'_{cszr})$.

Stosowane w ogrzewnictwie pompy ciepła są najczęściej urządzeniami sprężarkowymi, pracującymi w układzie ciśnieniowym, tzn. z parowaczami zasilanymi w czynnik roboczy poprzez termostatyczny zawór rozprężny (zwykły lub elektroniczny). W celu obliczenia średniego współczynnika przejmowania ciepła po stronie czynnika roboczego należy zastosować wzór odnoszący się do przypadku wrzenia w warunkach konwekcji wymuszonej przy całkowitym odparowaniu czynnika. Proces przejmowania ciepła podczas wrzenia cieczy w przepływie jest procesem bardzo złożonym i trudnym do opisu matematycznego w sposób uogólniony. W celu wyznaczenia wartości współczynnika przejmowania ciepła można posłużyć się wzorem *Mikielewicza* [5], lub znacznie prostszym w stosowaniu, wzorem *Iwaszkiewicza* [6]. Poniżej przedstawiony zostanie sposób przeprowadzania obliczeń prowadzących do wyznaczenia współczynnika przejmowania ciepła $\alpha_o$ i pola powierzchni wymiany ciepła $A_w$ z wykorzystaniem wzoru *Iwaszkiewicza*, który można przekształcić do postaci:

$$\alpha_o = C\, A_w^{-0,7} \tag{17}$$

gdzie:

$$C = 2\,\frac{\lambda'}{l^{0,3}}\; Ar^{-0,175}\left(\frac{Pr'}{Ku}\right)^{0,35}\left(\frac{\dot{Q}_d}{r\,\mu'}\right)^{0,7}\left(\frac{\rho'}{\rho''}\right)^{0,525} \tag{18}$$

oraz:

$Ar = \dfrac{g\,l^3(\rho'-\rho'')\rho'}{\mu'^2}$ - liczba Archimedesa; $Pr' = \dfrac{\mu' c_p'}{\lambda'}$ - liczba Prandtla;

$Ku = \dfrac{c_p'\,\rho'\,\sigma\,T_o}{r^2\,\rho''^2\,l}$ - liczba Kutateładze,

gdzie: $\rho', \rho''$ – odpowiednio: gęstość cieczy i pary czynnika w stanie nasycenia, [kg/m$^3$],
$\mu'$ – współczynnik lepkości dynamicznej cieczy w stanie nasycenia, [kg/(ms)],
$\lambda'$ – współczynnik przewodzenia ciepła cieczy w stanie nasycenia, [W/(mK)],
$\sigma$ – napięcie powierzchniowe, [N/m],
$r$ – entalpia właściwa wrzenia, [J/kg],
$c'_p$ – ciepło właściwe cieczy w stanie nasycenia, [J/(kgK)],
$g$ – przyspieszenie ziemskie, [m/s$^2$].

Charakterystyczny wymiar liniowy $l$ ,[m]:

$$l = \sqrt{\frac{\sigma}{g\left(\rho' - \rho''\right)}} \tag{19}$$

Pole powierzchni wewnętrznej wymiennika $A_w$ można wyznaczyć z zależności:

$$k_{Aw}\, A_w = -ln\left(1 - \frac{\dot{Q}_d}{\dot{W}_p\left(T_{p1} - T_o\right)}\right)\dot{W}_p \tag{20}$$

wynikającej ze wzorów (2), (4) i (5).

Ponieważ współczynnik przenikania ciepła $k_{Aw}$ jest funkcją pola powierzchni $A_w$ (wzory (6) i (17)), ostateczna postać funkcji, z której wyznacza się pole powierzchni wymiany ciepła $A_w$ jest następująca:

$$f(A_w) = C_1 + C_2\, A_w^{\,0,7} - A_w = 0 \tag{21}$$

Stałe $C_1$, $C_2$ wynoszą:

$$C_1 = C_3\left(\frac{\delta_r}{\lambda_r}\frac{d_w}{d_m} + R_z + \frac{A'_w}{\alpha_p\left(A'_r + \varepsilon_{\dot{z}}\, A'_{\dot{z}}\right)}\right) \tag{22}$$

$$C_2 = \frac{C_3}{C} \tag{23}$$

gdzie:

$$C_3 = -ln\left(1 - \frac{\dot{Q}_d}{\dot{W}_p\left(T_{p1} - T_o\right)}\right)\dot{W}_p \tag{24}$$

## 4. Wnioski

Zaprezentowana metoda wyznaczania pola powierzchni wymiennika stanowiącego ujęcie dolnego źródła ciepła, pełniącego funkcję parowacza powietrznej pompy ciepła jest metodą prostą, a jednocześnie uwzględniającą wpływ wszystkich istotnych parametrów na działanie wymiennika.

Przedstawiony algorytm obliczeń cieplnych wymienników lamelowanych może stanowić cenną pomoc dla projektantów systemów grzewczych. Może zostać wykorzystany do przeprowadzania obliczeń mających na celu weryfikację istniejących rozwiązań konstrukcyjnych, a także uzupełnienie i rozszerzenie danych eksploatacyjnych, podawanych przez producentów wymienników ciepła i pomp ciepła.

## Literatura

[1] Spektakularny wzrost rynku powietrznych pomp ciepła w 2015 roku, Chłodnictwo, nr 3, 2016, s. 9-10.

[2] Niezgoda-Żelasko B., Zalewski W.: Chłodnicze i klimatyzacyjne wymienniki ciepła-obliczenia cieplne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2013.

[3] Zalewski W., Kot J.: Obliczenia cieplno-przepływowe wentylatorowych chłodnic powietrza, cz. I, Chłodnictwo, nr 1-2, 2015, s. 40-44.

[4] VDI-Wärmeatlas: Wärmeübergang an berippten Oberflächen, VDI Verlag, Düsseldorf 1991, S. Mb1-Mb4.

[5] Mikielewicz D., Mikielewicz J.: Analiza możliwości wykorzystania ogólnych korelacji wrzenia w przepływie w technice chłodniczej, Technika Chłodnicza i Klimatyzacyjna, nr 8, 1997.

[6] Madejski J.: Teoria wymiany ciepła, Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 1998.

## HEAT CALCULATIONS FOR AN EXCHANGER CONSTITUTING THE INTAKE OF THE LOW TEMPERATURE HEAT SOURCE OF AN AIR-SOURCE HEAT PUMP

**S u m m a r y**

The paper presents the heat calculations for a plate finned heat exchanger constituting the intake of the low-temperature heat source of an air-source heat pump, operating as an evaporator in the pump's thermodynamic cycle. A calculation algorithm was provided to determine the heat exchange surface area for a given thermal efficiency of the exchanger. The *NTU* method, used in heat calculations for heat exchangers, was applied. The air-side heat transfer coefficient was determined using *Schmidt*'s equation [4] for heat transfer on finned surfaces. Plate fin efficiency was approximated using equations for fins – the plate fin was divided into fins whose shapes followed the spatial arrangement of the tubes. The *RCJ* damp transfer ratio was also used in the calculations to take account of the effect of the latent heat of the water vapour condensing out of the air on the intensity of the heat transfer process. As the exchanger is operational when the heat exchange surface is frosted over, the authors proposed a method to account for the effect of the frost layer on the value of the overall heat transfer coefficient. The heat transfer coefficient for the in-tube boiling process of the refrigerant was proposed to be determined using the generalised correlation by *Iwaszkiewicz* [6]. The application of the formulas proposed by *Schmidt* and *Iwaszkiewicz* is limited by their validity ranges, as stated in relevant reference works. The heat calculation algorithm for plate finned heat exchangers discussed in the paper may be used in calculations aimed to verify existing engineering solutions, as well as to supplement and expand on the operational data provided by heat exchanger and heat pump manufacturers.

**Keywords:** heat transfer, plate finned heat exchanger, evaporator, heat transfer coefficient, heat exchange surface area

DOI:10.7862/rb.2016.238

*Przesłano do redakcji: 20.04.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 553-562

**Robert ZARZYCKI**[1]
**Zbigniew BIS**[2]

# ZASTOSOWANIE PALENISKA CYKLONOWEGO W PROCESIE WITRYFIKACJI POPIOŁÓW LOTNYCH NA POTRZEBY PRODUKCJI MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH

W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania paleniska cyklonowego w procesie witryfikacji popiołów lotnych na potrzeby produkcji materiałów budowlanych. Proponowane rozwiązanie oprócz funkcji topienia popiołów lotnych i przygotowania na ich bazie materiałów o wymaganych właściwościach pozwala na zabudowę w układzie kotła bloku parowego. Dzięki temu palenisko cyklonowe zwiększa elastyczność energetyczną kotła a tym samym całego bloku parowego. Poprzez jego zabudowę możliwe jest w okresie "doliny nocnej" wyłączenie podstawowych palników kotła pyłowego, jednocześnie utrzymując go w stanie gorącej rezerwy dzięki spalaniu gazów powstałych w procesie spalania i zgazowania pyłu węglowego w palenisku cyklonowym. Dzięki takiemu rozwiązaniu możliwe jest znaczące obniżenie kosztów utrzymania bloku parowego w gotowości do produkcji energii elektrycznej przy jednoczesnym przetwarzaniu popiołów lotnych do użytecznych gospodarczo materiałów. Z punktu widzenia procesu witryfikacji popiołu lotnego korzystne jest stosowanie popiołów lotnych o wysokiej stracie prażenia. Uzyskany w trakcie procesu witryfikacji produkt charakteryzuje się stratą prażenia na poziomie 0.1%. Poprzez zastosowanie odpowiedniego procesu chłodzenia płynnego żużla możliwe jest uzyskanie materiału o dużej porowatości który można wykorzystać np. przy produkcji pustaków ściennych.

**Słowa kluczowe:** zeszkliwienie, topienie, kruszywa, oxy-spalanie, kocioł pyłowy

## 1. Wprowadzenie

Bezpieczeństwo energetyczne to nie tylko zapewnienie niezakłóconego zaopatrywania odbiorców w energię elektryczną, utrzymanie niskich kosztów jej wytwarzania, lecz także wypełnienie zobowiązań środowiskowych nie tylko w zakresie ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych, ale także ograniczenia

[1] Autor do korespondencji: Robert Zarzycki, Politechnika Częstochowska, Katedra Inżynierii Energii, ul. Brzeźnicka 60a, 42-200 Częstochowa; tel. 343250902, 343257334 wew. 18; zarzycki@is.pcz.czest.pl

[2] Zbigniew Bis, Politechnika Częstochowska, Katedra Inżynierii Energii, ul. Brzeźnicka 60a, 42-200 Częstochowa; tel. 343257334 wew. 18; zbis@is.pcz.czest.pl

składowania Ubocznych Produktów Spalania (UPS) (popiołów, żużli). Powstające w procesie spalania popioły oraz żużle często zanieczyszczone są niewykorzystanymi pozostałościami sorbentów (np. $CaSO_3$, $CaSO_4$, CaO, amoniak, węgiel aktywny itp.). Dyrektywy Unii Europejskiej (UE) zobowiązują kraje członkowskie do zwiększenia stopnia gospodarczego wykorzystania (recykling) odpadów powstających w procesach produkcji. Oprócz tych, standardowych już dziś, wymagań pojawiają się nowe, będące następstwem sukcesywnego wdrażania polityki klimatycznej. Wprowadzanie w następstwie tych procesów coraz większej mocy wytwarzanej z Odnawialnych Źródłach Energii (OZE), które objęte są priorytetem obowiązkowego odkupienia od wytwórców, powoduje „wypieranie" energetyki węglowej z tzw. „podstawy" w rejon „podszczytowy", który cechuje się zmiennym w ciągu doby zapotrzebowaniem na wytwarzany prąd. Dalszy wzrost udziału OZE prowadzić będzie do pogłębienia tego stanu z koniecznością wyłączania bloków węglowych w okresie nocy, by ponownie uruchamiać je w porze dnia, lub okresach bezwietrznych lub dużego zachmurzenia. Bloki z kotłami opalanymi pyłem węgla kamiennego lub brunatnego aktualnie pracujące w Krajowym Systemie Energetycznym (KSE), nie są przystosowane do takiej elastyczności, wobec czego w najbliższej perspektywie winny być poddane stosownym modyfikacjom.

Wobec powyższego w przypadku polskiego KSE, który w dużym stopniu oparty jest o spalanie paliw kopalnych sektor energetyczny staje przed nie lada wyzwaniami, szczególnie gdy węgle dobrej jakości (m.in. o niskiej zawartości popiołu) w znacznym stopniu zostały już wydobyte i spalone. W Polsce znacząca ilość UPS wykorzystywana jest do produkcji materiałów budowlanych [1,2,3,4] lub jako materiał podsadzkowy dla wypełniania wyrobisk w kopalniach. Wykorzystanie popiołów lotnych do produkcji materiałów budowlanych wymaga jednak spełnienia szeregu wymagań, zwłaszcza dotyczących zawartości węgla (m.in. straty prażenia), zapisanych w normach PN-EN 450-1:2012, PN-EN 206:2014-04.

W niniejszej pracy przedstawiono propozycję urządzenia, które współpracując z kotłem energetycznym bloku parowego opalanego węglem kamiennym lub brunatnym czyni zadość co najmniej dwu w/w ważnym wyzwaniom. Ułatwia zwiększenie jego elastyczności poprzez obniżenie minimum technicznego do poziomu co najmniej 20% maksymalnej wydajności (szczególnie w czasie "doliny nocnej") jednocześnie realizując przetwarzanie popiołu lotnego o właściwościach nie pozwalających na jego bezpośrednie wykorzystanie w produkcji materiałów budowlanych na produkt w postaci kruszyw lekkich lub materiałów zeszkliwionych, spełniające wymagania stawiane materiałom budowlanym.

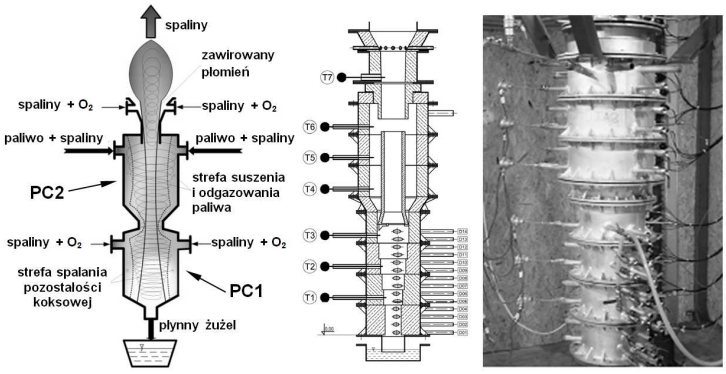
## 2. System elektroenergetyczny

Produkcja energii elektrycznej związana jest bezpośrednio z jej zużywaniem przez jej odbiorców. W chwili obecnej brak technicznych możliwości jej magazynowania na potrzeby KSE. Z tego też względu elektrownie węglowe w ciągu dnia muszą być przygotowane do zapewnienia dostaw energii elektrycznej w ilości

wymaganej w danej chwili przez odbiorców, natomiast w czasie "doliny nocnej", gdzie zapotrzebowanie na energię elektryczną spada, pojawia się konieczność pracy z mocą minimalną. W wielu przypadkach wymagana moc przez system elektroenergetyczny jest niższa od sumy minimalnych mocy pracujących aktualnie bloków energetycznych, co stwarza konieczność ich czasowego wyłączenia na kilka, kilkanaście lub kilkadziesiąt godzin (w okresie weekendów i świąt). Wyłączenie bloku energetycznego wynika z tego, że poniżej minimum technicznego kotła proces spalania paliwa jest niestabilny szczególnie w przypadku kotłów pyłowych co zagraża bezpieczeństwu pracy kotła i obsługi technicznej. Stosowanie palników rozpałkowych opalanych gazem lub olejem opałowym lekkim w czasie utrzymywania kotła w stanie gorącej rezerwy czy też przy ponownym rozruchu, generuje wysokie koszty eksploatacji bloku. Rozwiązaniem tego problemu może być zastosowanie paleniska cyklonowego lub zespołu palenisk cyklonowych do utrzymania kotła w stanie gorącej rezerwy w czasie "doliny nocnej". Proponowane palenisko cyklonowe oprócz funkcji energetycznej służyć może także jako urządzenie to przetwarzania popiołów lotnych w efekcie ich spiekania lub topienia na żużel o pożądanych własnościach fizykochemicznych i mechanicznych. Taki sposób przetwarzania można zastosować dla wykorzystania (utylizacji) popiołów lotnych, które ze względu na swój skład chemiczny (np. zawartość węgla i/lub substancji wykorzystywanych do absorpcji zanieczyszczeń gazowych) nie mogą zostać bezpośrednio wykorzystane do produkcji materiałów budowlanych.

## 3. Palenisko cyklonowe

Paleniska cyklonowe to urządzenia energetyczne, gdzie w silnie zawirowanym przepływie strumienia gazów unoszących ziarna rozdrobnionego paliwa stałego, kropli paliw ciekłych, czy też mieszaniny powietrza i paliwa gazowego realizowane są jednocześnie procesy fizyczne i chemiczne. Poprzez odpowiednie organizowanie procesu możliwe jest nie tylko prowadzenie procesu spalania lecz także zgazowania paliw stałych [5,6,7,8,9,10,11,12,13,14]. Palenisko cyklonowe, prezentowane w niniejszej pracy (rys. 1) składa się z dwóch części: komory dolnej PC1 i komory górnej PC2. Do komory PC2 podawane jest paliwo w postaci pyłu węglowego w strumieniu recyrkulowanych spalin lub przegrzanej pary wodnej. W komorze tej następuje jego nagrzewanie, suszenie i odgazowanie. Odgazowane paliwo przepływa grawitacyjnie do komory PC1 gdzie za pomocą zestawu dysz rozmieszczonych wzdłuż jej wysokości podawany jest gaz "napędowy", którego zadaniem w pierwszej kolejności jest utrzymanie przepływu zawirowanego odgazowanego paliwa oraz stworzenie odpowiednich warunków procesowych pozwalających na jego spalanie lub zgazowanie. Dysze napędowe umieszczone są stycznie to tworzącej walcowej komory PC1. Szczegóły konstrukcyjne budowy paleniska cyklonowego przedstawiono w pracach [11,12,13,14,15,16,17].




Rys. 1. Schemat oraz widok paleniska cyklonowego

Fig. 1. Schematics and view of the cyclone furnace

W palenisku tym może być prowadzony klasyczny proces spalania paliwa w powietrzu, jak również możliwa jest realizacja procesu w atmosferze wzbogaconej w tlen tzw. oxy-spalanie [18, 19]. Ponieważ w paleniskach cyklonowych proces spalania przebiega w wysokich temperaturach [17], przekraczających 1200÷1600$^{o}$C, zasilanie powietrzem przyczynia się do wysokiej emisji tlenków azotu, realizacja w tych warunkach oxy-spalania eliminuje w dużym stopniu ten problem a także pozwala na uzyskiwanie wyższych temperatur prowadzenia procesu. Realizacja procesu oxy-spalania pozwala także na łatwiejsze ograniczenie emisji dwutlenku węgla do atmosfery dzięki temu, że spaliny zawierające duże stężenie $CO_2$ mogą być bezpośrednio wykorzystywane w przemyśle chemicznym, rolnictwie bądź składowane pod ziemią (CCS) [19]. W Katedrze Inżynierii Energii Politechniki Częstochowskiej w ramach Strategicznego Programu „ZAAWANSOWANE TECHNOLOGIE POZYSKIWANIA ENERGII" zostały przeprowadzone obszerne badania procesu spalania i zgazowania pyłu węglowego w opisanym wyżej palenisku cyklonowym. Potwierdziły one założenia dotyczące możliwości prowadzenia procesu spalania i zgazowania pyłu węglowego w warunkach podwyższonego stężenia tlenu [7,9,10,11,12,13]. Otrzymane wyniki pokazały możliwość uzyskania w centralnej części komory PC1 temperatury przekraczającej poziom 1400$^{o}$C [6,11,12,13]. Podobne wyniki osiągnięto także realizując obliczenia numeryczne przebiegu procesu spalania i zgazowania paliwa w analizowanych warunkach [5,7,9,10]. Obliczenia te wykazały także, że prowadząc proces spalania i zgazowania paliwa w atmosferze tlenowej oraz w obecności pary wodnej możliwe jest uzyskiwanie w komorze PC1 temperatur dochodzących do 1700$^{o}$C przy jednoczesnej produkcji gazów palnych zawierających głównie CO oraz $H_2$. Gazy te, których wartość opałowa dochodzi do 12 MJ/kg można spalić w komorze kotła pyłowego np. w celu utrzymania go w gorącej rezerwie w okresie pracy z niskim obciążeniem lub ze względu na wysoką zawartość wodoru dochodzącą do 50% wykorzystać w procesach chemicznych.

Omówione powyżej warunki panujące w komorze PC1 stwarzają potencjalne możliwości realizacji tam procesu witryfikacji popiołu lotnego, osadów ściekowych lub innych substancji w celu ich neutralizacji. Uzyskane produkty mogą zostać wykorzystane jako surowce przy produkcji materiałów budowlanych.

## 4. Witryfikacja popiołów lotnych

Witryfikacja jest procesem termicznym polegającym na kontrolowanym dostarczaniu ciepła [20] do witryfikowanej substancji w celu usunięcia z niej gazów oraz substancji palnej (np. węgiel) a następnie stopieniu pozostałej substancji mineralnej. Powstała faza ciekła poddana procesowi kontrolowanego chłodzenia pozwala na uzyskanie materiału o pożądanych właściwościach i strukturze np. zbliżonej do szkła, lub materiału o dużej porowatości. Źródłem ciepła w procesie witryfikacji może być energia elektryczna (metoda grzania oporowego, metody plazmowe) lub ciepło uzyskane w procesie spalania paliwa (piece obrotowe, paleniska cyklonowe) [21,22,23], rozważane są także metody witryfikacji z wykorzystaniem głowic mikrofalowych. Sam proces zmiany fazy (topienia) substancji popiołów wymaga dostarczenia energii w ilości około 2 MJ/kg [20,21]. W przypadku metod plazmowych i łukowych praktyczne zapotrzebowanie energii na wytryfikacje substancji mineralnych określono w zakresie 3.6-18MJ/kg [22]. Realizacja procesu witryfikacji z wykorzystaniem energii elektrycznej ze względu na koszty, może być stosowana w mniejszej skali, natomiast wykorzystanie energii chemicznej paliwa w procesie witryfikacji oraz do zasilania np. kotła pyłowego gorącymi, palnymi gazami pozwala na bardziej efektywne wykorzystanie energii oraz znaczące obniżenie jednostkowych kosztów procesu.

Do witryfikacji w palenisku cyklonowym wykorzystywane powinny być przede wszystkim popioły, które nie spełniają norm ze względu na wysoką zawartość węgla (wysoka strata prażenia). Zastosowanie takich popiołów może ograniczyć zapotrzebowanie na paliwo do utrzymania warunków wymaganych do realizacji procesu witryfikacji tym samym obniżyć koszty tego procesu.

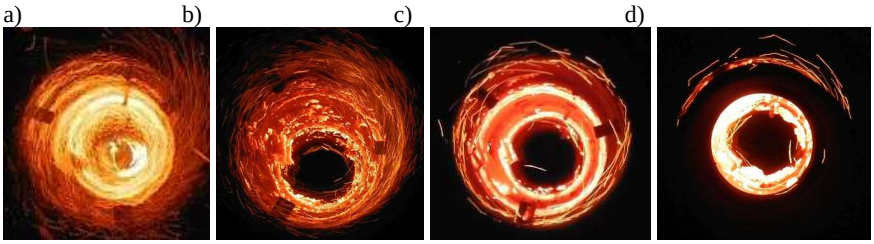
Popioły lotne powstające w wyniku spalenia węgla kamiennego i brunatnego, są wychwytywane poza kotłem ze spalin najczęściej z wykorzystaniem odpylaczy cyklonowych, filtrów workowych lub elektrofiltrów. Skład popiołów lotnych uzależniony jest w dużej mierze od składu substancji mineralnej zawartej w węglu, rodzaju paleniska (pyłowe, fluidalne) oraz warunków prowadzenia procesu (temperatura, stopień rozdrobnienia paliwa, sposób odsiarczania) który wpływa w dużym stopniu na zawartość węgla w popiele lotnym.

Podstawowymi składnikami pyłów są krzemionka ($SiO_2$), związki glinu (np. $Al_2O_3$), związki żelaza (np. $Fe_2O_3$), związki wapnia (CaO), związki magnezu (MgO) [1]. Temperatury topnienia czystych tlenków wchodzących w skład popiołu mieszczą się w zakresie od 800 do 2800$^o$C [1], jednak już mieszaniny eutektyczne tych tlenków posiadają temperatury wyraźnie niższe dochodzące do 1200-1800$^o$C. Temperaturę topnienia można obniżać poprzez dodatek topników w po-

staci CaO czy FeO [1]. W wielu przypadkach w składzie lotnych popiołów CaO występuje w naturalnej formie lub jako niewykorzystana część sorbentów wapniowych, dodawanych w celu redukcji emisji siarki. Dzięki zastosowaniu dodatku topników oraz kontroli temperatury wewnątrz paleniska możliwa jest kontrola procesu witryfikacji od pełnego przetopienia popiołu do stopienia jedynie jego części co pozwoli na uzyskanie materiałów o porowatej strukturze.

Na rys. 2a pokazano przebieg procesu spalania pyłu węglowego w omawianym palenisku cyklonowym w komorze PC1. Wyraźnie widoczny jest przepływ zawirowany ze spalaniem poruszających się intensywnie ziaren paliwa. Wprowadzenie pneumatycznie popiołu lotnego do tak zawirowanego strumienia wyniku podania za pomocą dyszy "napędowej" (rys. 2b) powoduje praktyczne natychmiastowy proces jego topienia w wyniku czego na ściankach wewnętrznych powstaje warstwa płynnego żużla. Żużel ten gromadząc się na stopniach komory PC1 ulega wygrzewaniu i ujednorodnianiu (jasne okręgi - rys. 2c) po czym zaczyna spływać do wanny żużlowej znajdującej sie poniżej komory PC1 (rys. 2d).

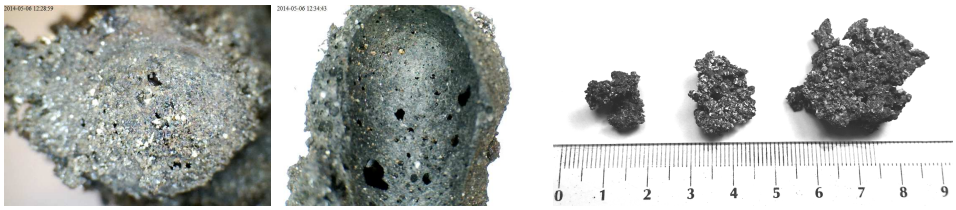
Na rysunku 3 przedstawiono widok wnętrza komory PC1 po zakończonym procesie topienia popiołu lotnego. Widoczne jest pokrycie wnętrza komory warstwą zastygłego żużla (rys. 3 a i b). Taka sytuacja jest korzystna ze względu na ochronę wnętrza przed erozją wywołaną kontaktem ziaren pyłu węglowego oraz popiołu lotnego z materiałem stanowiącym wyłożenie ceramiczne komory. Na rysunku 3c widoczny jest powstały w procesie topienia żużel w dolnej części komory uzyskany w wyniku chłodzenia gazem "napędowym" z dużą prędkością. W tym przypadku możliwe jest uzyskanie żużla o dużej porowatości (rys. 4).




Rys. 2. Widok wnętrza komory PC1 podczas spalania pyłu węglowego pokrytej płynnym żużlem
Fig. 2. View of the interior chamber PC1 during the combustion of coal dust coated with molten slag




Rys. 3. Widok wnętrza komory PC1 pokrytej żużlem
Fig. 3. View of the interior chamber PC1 covered with slag




Rys. 4. Widok materiału uzyskanego podczas procesu witryfikacji popiołu lotnego

Fig. 4. View of the material obtained during the process of vitrification of fly ash

Przeprowadzone badania procesu witryfikacji z wykorzystaniem paleniska cyklonowego pozwoliły, w zależności od warunków prowadzenia procesu, uzyskać żużel o stracie prażenia poniżej 0.1%.

Procesowi witryfikacji oprócz popiołów lotnych podane mogą być odpady powstające w takich gałęziach przemysłu jak: odlewnictwo metali żelaznych i nieżelaznych, przemysł naftowy, chemiczny, elektroniczny a zwłaszcza energetyczny [24]. Poddane procesowi witryfikacji odpady z wymienionych powyżej gałęzi gospodarki charakteryzują się wysoką odpornością na wymywanie składników toksycznych, dużą trwałością, odpornością na czynniki środowiskowe jak i atmosferyczne [24,25,26]. Produkty witryfikacji posiadają właściwości porównywalne do powszechnie stosowanych kruszyw mineralnych i sztucznych stosowanych w budownictwie na podbudowy drogowe [24]. Zeszklone popioły nadają się do szerokiego stosowania w budownictwie do produkcji lekkich betonów i zapraw ciepłochronnych, do wyrobu pustaków ściennych i stropowych, a także do stabilizacji gruntów i drenaży wodnych w geotechnice [24].

## 5. Proces spalania i zgazowania paliwa oraz topienia popiołów lotnych w palenisku cyklonowym

Przeprowadzone badania procesu spalania i zgazowania pyłu węglowego w palenisku cyklonowym, nie tylko potwierdziły możliwość elastycznej realizacji obu procesów, lecz także pokazały możliwość jednoczesnej realizacji tych procesów w połączeniu z topieniem osobno wprowadzanego popiołu lotnego w celu jego stopienia (witryfikacji) [5,6,7,8,9,10,11,12,13]. W takim przypadku paliwo (pył węglowy) podawane jest do komory PC2 gdzie następuje proces jego nagrzewania, suszenia i odgazowania, pozostałość koksowa dopalana jest w komorze PC1 powodując wzrost temperatury do poziomu 1400 – 1500$^{o}$C. Po osiągnięciu tego stanu do komory PC1 może być rozpoczęte pneumatyczne podawanie lotnego popiołu w strumieniu gazu "napędowego" zawierającego utleniacz. W wyniku jego zawirowania i wysokiej temperatury ulega on szybkiemu nagrzaniu i stopieniu. Stopiony popiół w postaci płynnej spływa po ścianach komory PC1 do wanny żużlowej gdzie ulega ochłodzeniu. Dzięki zabudowie dysz doprowadzających gaz "napędowy" w dolnej części paleniska możliwe jest stopniowe

chłodzenie płynnego żużla, jednocześnie tworząc strukturę żużla o dużej porowatości. Dzięki zabudowie w tej strefie elementu obrotowego pozwalającego na zgarnianie i kruszenie żużla można uniknąć problemów z jego niezakłóconym wyprowadzaniem z dolnej części paleniska cyklonowego. Sposób chłodzenia płynnego żużla ma znaczący wpływ na właściwości i strukturę uzyskiwanego produktu. Palenisko opuszcza mieszanina gazów palnych (części lotnych, CO, $H_2$) oraz spalin o wysokiej temperaturze. W komorze kotła pyłowego następuje dopalenie części lotnych i przekazanie ciepła fizycznego zawartego w tych gazach.

Opisana powyżej propozycja pracy paleniska cyklonowego może być realizowana zarówno przy maksymalnej wydajności kotła, jak również, co szczególnie ważne, przy znacznie obniżonej wydajności, zapewniając stabilne utrzymanie znacznie obniżonego minimum technicznego. W tym przypadku w zależności od mocy i liczby palenisk cyklonowych zabudowanych w układzie kotła pyłowego możliwe jest wyłączenie pewnej części palników pyłowych i stabilizacja ich pracy poprzez dopalanie gazów generowanych przez palenisko cyklonowe. Można rozważyć także całkowite wyłączenie palników pyłowych i utrzymywanie kotła w gorącej rezerwie dzięki proponowanemu rozwiązaniu. W tym przypadku w czasie tzw. "doliny nocnej" możliwa jest realizacja procesu witryfikacji popiołu na potrzeby produkcji materiałów budowlanych.

## 6. Podsumowanie

Przedstawione w niniejszej pracy palenisko cyklonowe wykorzystane może być zarówno w celach energetycznych jak i w procesie witryfikacji popiołów lotnych. Palenisko cyklonowe zasilane pyłem węglowym pozwala na jego częściowe spalanie oraz zgazowanie. Uzyskane gazy palne mogą zostać spalone w komorze kotła pyłowego, a ciepło uzyskane z częściowego spalania pyłu węglowego wykorzystane do topienia popiołu lotnego. Dzięki takiej realizacji procesu możliwe jest znaczące obniżenie nakładów energetycznych na realizacje procesu wykorzystując dodatkowo węgiel oraz topniki zawarte w przetwarzanym popiele lotnym. Zastosowanie odpowiedniego sposobu chłodzenia płynnego żużla pozwala na otrzymanie kruszyw o różnych właściwościach od bardzo porowatych do kruszyw o bardzo zwartej strukturze.

***Podziękowania***
*BS/PB-404-301/11*

## Literatura

[1] Kołakowski J., Szymański E.: Popioły paleniskowe w budownictwie, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1961.

[2] Reiss H., Kiersztyn E.: Żużel i tworzywa żużlowe w budownictwie, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1960.

[3] Galos K., Uliasz-Bocheńczyk A.: Źródła i użytkowanie popiołów lotnych ze spalania węgli w Polsce, Gospodarka Surowcami Mineralnymi, tom 21, zeszyt 1, 2005, s. 23-42.

[4] Stefańczyk B. praca zbiorowa: Budownictwo ogólne Tom 1 Materiały i wyroby budowlane, Wydawnictwo Arkady, 2005.

[5] Zarzycki R., Warzecha P., Kobyłecki R., Bis Z., Modelowanie matematyczne i symulacje numeryczne tlenowego spalania węgla oraz zgazowania w przedpalenisku cyklonowym, Spalanie tlenowe dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytem CO2, seria Monografie nr 301, Częstochowa 2015, pp. 310 - 334.

[6] Kobyłecki R., Zarzycki R., Bis Z.: Przedpalenisko cyklonowe dla spalania i zgazowania pyłu węglowego, Wydawnictwo ITC, Energetyka Gazowa tom 2, 2016, s. 277-285.

[7] Zarzycki R., Bis Z.: Modelowanie procesu spalania i zgazowania pyłu węglowego w palenisku cyklonowym, Wydawnictwo ITC, Energetyka Gazowa tom 2, 2016, s. 361-376.

[8] Zarzycki R., Bis Z., Kobyłecki R.: The concept of coal burning in a cyclone furnace, IX ICCHME, 23-26 May 2016, Cracow, Poland, no. 492.

[9] Zarzycki R., Bis Z.: Modelling of the process of coal dust combustion in a cyclone furnace, IX ICCHME, 23-26 May 2016, Cracow, Poland, no. 493.

[10] Zarzycki R., Bis Z.: Modelling of coal dust gasification in a cyclone furnace under oxy-fuel combustion conditions, IX ICCHME, 23-26 May 2016, Cracow, Poland, no. 494.

[11] Zarzycki R., Kratofil M., Pawłowski D., Ścisłowska M., Kobyłecki R., Bis Z., Analiza spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym, Polityka Energetyczna, t. 16, zeszyt 3, 2013, s. 325-337.

[12] Zarzycki R., Kobyłecki R., Kratofil M., Ścisłowska M., Pawłowski D., Bis Z., Badania spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym, Polityka Energetyczna tom 17, z. 3. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, Kraków, s. 381 - 392.

[13] Kobyłecki R., Zarzycki R., Kratofil M., Pawłowski D., Bis Z., Badania spalania pyłu węglowego w przedpalenisku cyklonowym, Aktualne Zagadnienia Energetyki, TOM I, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2014.

[14] Bis Z., Kobyłecki R., Zarzycki R., Urządzenie do spalania i zgazowania paliw stałych, Zgłoszenie wynalazku P.411668, 2015.

[15] Zarzycki R., Kratofil M., Pawłowski D., Ścisłowska M., Kobyłecki R., Bis Z., Analiza wyników obliczeń numerycznych przepływu pyłu węglowego oraz gazu w palenisku cyklonowym, Polityka Energetyczna, t. 16, zeszyt 3, 2013, s. 301-312.

[16] Zarzycki R., Kratofil M., Pawłowski D., Ścisłowska M., Kobyłecki R., Bis Z., Układ podawania paliwa do przedpaleniska cyklonowego, Polityka Energetyczna, t. 16, zeszyt 3, 2013, s. 313-324.

[17] Zarzycki R., Kobyłecki R., Kratofil M., Bis Z., Kierunki rozwoju palenisk cyklonowych, Polityka Energetyczna tom 17, z. 4. 2014. Wyd. Instytutu GSMiE PAN, Kraków, s. 249 – 261.

[18] Nowak W., Pronobis M.: Nowe technologie spalania i oczyszczania spalin. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2010, Gliwice.

[19] Nowak W., Czakiert T.: Spalanie tlenowe dla kotłów pyłowych i fluidalnych zintegrowanych z wychwytywaniem CO2. Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, 2012, Częstochowa.

[20] Kordylewski W., Robak Ł.: Witryfikacja odpadów i popiołów, Gospodarka Paliwami i Energią, nr 7, 2002, s. 18-21.

[21] http://www.spalanie.pwr.wroc.pl/badania/publikacje/witryfikacja.PDF {dostęp 2016.05.16}.

[22] Huczko A., Lange H., Chojecki G., Dziadko D.: Plazmowa witryfikacja odpadów o charakterze pylistym, Przemysł Chemiczny, Wydawnictwo SIGMA-NOT, T. 79, nr 10, 2000, s. 333 - 335.

[23] http://www.spalanie.pwr.wroc.pl/badania/publikacje/modyfikacja%20popiolu.pdf {dostęp 2016.05.16}.

[24] Borowski G., Szulżyk-Cieplak J.: Zeszkliwienie jako sposób neutralizacji odpadów niebezpiecznych, Inżynieria bezpieczeństwa a zagrożenia cywilizacyjne: zmienność zagrożeń a innowacje w ratownictwie, Centralna Szkoła Państwowej Straży Pożarnej w Częstochowie, 2014, s. 19-34.

[25] Borowski G.: Ocena przydatności zeszkliwienia osadów ściekowych do ich zagospodarowania, Ochrona środowiska i zasobów naturalnych, nr 51, 2012, s. 78-84.

[26] Kasprzyk K., Zboromirska-Wnukiewicz B., Dyjakon A., Kogut K., Kasprzyk Z.: Thermal Transformation of Combustion Wastes from Coal-Fired Boilers, Archives of Metallurgy and Materials, vol. 54, iss. 4, 2009, pp. 1021-1027.

## APPLICATION PROCESS CYCLONE BURNER VITRIFICATION FLY ASH FOR THE PRODUCTION OF BUILDING MATERIALS

**S u m m a r y**

The article presents the possibilities of using cyclone furnace in the process of vitrification of fly ash for the production of construction materials-cast. The proposed solution in addition to the functions of melting of fly ash and prepare for their base materials with the required properties allows development in a steam boiler unit. As a result, it increases the flexibility of the cyclone furnace power boiler and therefore the entire block of steam. Through its development, it is possible during the "valley northern" off the elementary boiler burners of pulverized while maintaining it in a hot standby state by heating by combustion gases produced by combustion and gasification of coal dust in the cyclone. With this solution it is possible to significantly reduce the cost of maintaining the block steam in readiness for the production of electricity, while the processing of fly ash to economically useful materials. From the point of view of the vitrified fly ash preferred is the use of fly ash with a high loss on ignition. Produced during the vitrification of the product has a loss on ignition of less than 0.1%. Through the use of suitable cooling process of molten slag, it is possible to obtain a material of high porosity that can be used eg. the production of hollow wall.

**Keywords:** glazing, melting, artificial aggregates, oxy-combustion, pulverized coal-fired boiler

DOI:10.7862/rb.2016.239

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 563-570

**Agata ZDYB**[1]
**Piotr LICHOGRAJ**[2]

# ZNACZENIE WARUNKÓW WIATROWYCH W FUNKCJONOWANIU MODUŁÓW FOTOWOLTAICZNYCH

Wyznaczane w warunkach standardowych dane dotyczące parametrów pracy modułów fotowoltaicznych dostarczane przez producentów nie pokrywają się z faktycznymi rezultatami otrzymywanymi podczas działania modułów w realnych warunkach. Z tego względu istotne jest testowanie modułów w zewnętrznych instalacjach oraz symulowanie pracy modułów z uwzględnieniem wpływu czynników zewnętrznych takich jak: natężenie promieniowania słonecznego, temperatura i prędkość wiatru. Sprawność ogniw fotowoltaicznych, podobnie jak innych urządzeń półprzewodnikowych, zależy w znacznym stopniu od temperatury, w której ogniwo działa. Zwiększenie temperatury powoduje wzrost energii elektronów i zwężenie przerwy energetycznej półprzewodnika. W przebiegu charakterystyki *I-V* ogniwa jest to widoczne jako spadek wartości napięcia obwodu otwartego i niewielki wzrost wartości natężenia prądu zwarcia. W praktyce na temperaturę ogniwa wpływ ma zarówno moc padającego promieniowania słonecznego jak i temperatura zewnętrzna oraz siła wiatru. W wielu ośrodkach na świecie prowadzone są eksperymentalne obserwacje pracy modułów fotowoltaicznych wykonanych w różnych technologiach i zainstalowanych w różnych warunkach klimatycznych. Przedmiotem analiz przeprowadzonych w przedstawionej pracy jest znaczenie czynników zewnętrznych, w szczególności wiatru w działaniu cienkowarstwowych ogniw fotowoltaicznych wykonanych z amorficznego krzemu. Obliczenia oparte na teoretycznym modelu wskazują na chłodzącą rolę wiatru o prędkościach do ok. 10 m/s oraz związane z tym podwyższenie sprawności modułów. Dalszy wzrost prędkości wiatru nie ma istotnego wpływu na wartości sprawności. Moduły z krzemu amorficznego cechuje dobra odporność na wahania temperatury, mogą one więc być stosowane w klimacie o wyraźnie odróżniających się porach roku np. w Polsce.

**Słowa kluczowe:** fotowoltaika, ogniwa amorficzne, sprawność, temperatura ogniw

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Agata Zdyb, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel: (+081) 538 4747, a.zdyb@pollub.pl

[2] Piotr Lichograj, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Biała Podlaska 21-500, ul. Sidorska 95/97, p.lichograj@gmail.com

# 1. Wprowadzenie

Prace prowadzone od wielu lat w licznych ośrodkach naukowych doprowadziły do dużego zróżnicowania technologii fotowoltaicznych. Obecnie wyróżnić można więc cztery generacje ogniw słonecznych, które przedstawione są w Tabeli 1. Spośród wielu typów wytwarzanych ogniw słonecznych na rynku fotowoltaiki nadal dominują zaliczane do I generacji tradycyjne ogniwa wykonane z monokrystalicznego, polikrystalicznego lub multikrystalicznego krzemu, których udział w zastosowaniach wynosi ok. 80%. Drugie miejsce pod względem rozpowszechnienia na rynku fotowoltaiki, czyli ok. 20% rynku należy do ogniw cienkowarstwowych, stanowiących II generację.

Tabela 1. Cztery generacje ogniw słonecznych

Table 1. Four generations of solar cells

| Ogniwa słoneczne | Rodzaj materiału |
|---|---|
| I generacja | mono-Si, multi-Si (1mm do 10 cm),<br>poli-Si (1mm do 1mm) |
| II generacja | a-Si:H<br>CdS/CdTe<br>$CuInSe_2$, CuInS (CIS), $Cu(InGa)_3Se_2$ (CIGS)<br>GaAs, GaN, Ge, GaInPAs |
| III generacja | ogniwa barwnikowe (DSSC)<br>ogniwa organiczne (OPV) |
| IV generacja | ogniwa sensybilizowane nanocząstkami<br>(QDSSC) |

Rodzaj zastosowanej technologii fotowoltaicznej ma zasadniczy wpływ na ilość energii elektrycznej produkowanej przez dany moduł fotowotaiczny. Istotne znaczenie mają też warunki zewnętrzne, w których moduły pracują. Dla modułu wykonanego w konkretnej technologii znane z danych od producenta są takie parametry jak: natężenie prądu zwarcia, napięcie obwodu otwartego, maksymalna moc oraz sprawność. Wartości tych parametrów wyznaczane są w tzw. warunkach standardowych (STC – Standard Test Conditions), czyli przy oświetleniu 1000 W/m$^2$, AM 1,5G (AM – Air Mass) i temperaturze 25$^o$C. Takie warunki pracy rzadko występują podczas działania modułów zainstalowanych w realnych warunkach zewnętrznych. W rzeczywistych zastosowaniach moduły poddane są działaniu licznych zmiennych czynników pogodowych i sprawność ich również ulega zmianom. Najważniejszym i często jedynym branym pod uwagę czynnikiem zewnętrznym wpływającym na pracę modułów jest nasłonecznienie w danej lokalizacji. Parametr ten ma kluczowe znaczenie ponieważ wiąże się on z liczbą fotonów promieniowania słonecznego, które mogą zostać zaabsorbowane przez ogniwo i wziąć udział w fotowoltaicznej konwersji ener-

gii. W Polsce nasłonecznienie wynosi 950-1250 kWh/m$^2$ w ciągu roku w zależności od lokalizacji i różni się ok. 4 razy między półroczem zimowym i letnim. Wartości nasłonecznienia na kuli ziemskiej zależą głównie od szerokości geograficznej, ale znaczenie ma też ukształtowanie terenu, bliskość zbiorników wodnych i inne warunki charakterystyczne w danym położeniu geograficznym.

Kolejnym parametrem wpływającym na pracę instalacji fotowoltaicznych, podobnie jak innych urządzeń wykorzystujących półprzewodniki jest temperatura [1-3]. Najważniejsze własności półprzewodników zmieniające się ze wzrostem temperatury to przerwa energetyczna, której wartość maleje i czas życia nośników mniejszościowych który zwiększa się. Wzrost temperatury powoduje także osłabienie zdolności złącza p-n do separacji powstałych w zjawisku fotowoltaicznym nośników prądu poprzez obniżenie bariery potencjału na złączu. Procesy te mogą powodować obniżenie mocy krzemowych modułów do 23% potencjalnej mocy wyjściowej przy wzroście temperatury o 35$^o$C.

Oprócz nasłonecznienia i temperatury, do czynników wpływających na jakość pracy modułów fotowoltaicznych w warunkach zewnętrznych zaliczyć można prędkość wiatru, czystość powierzchni modułów i wilgotność. Prędkość wiatru, choć często jest pomijana w rozważaniach dotyczących modułów, odgrywa istotną rolę, jak wskazują analizy pracy instalacji w różnych warunkach klimatycznych [4].

Jednym z półprzewodników stosowanych w ogniwach słonecznych w postaci cienkich warstw jest krzem amorficzny. Stanowi on bardzo dobry materiał do zastosowań w ogniwach ze względu na wartość przerwy energetycznej, która wynosi 1,7 eV i pozwala na absorpcję szerokiego zakresu promieniowania słonecznego. Jednak z powodu występowania efektu Staeblera-Wronskiego, który powoduje spadek wydajności ogniw podczas ich początkowej ekspozycji na światło oraz dość słabej trwałości nie zdobyły one dużej popularności na rynku fotowoltaiki. Stosunkowo niska cena krzemu amorficznego zachęca mimo to do tworzenia ogniw, które mają zmodyfikowaną strukturę np. typu p-i-n, HIT (Heterojunction with Intrinsic Thin Layer) lub z warstwami ELO (Epitaxial Lateral Overgrowth) [5-7].

Ogniwa wykorzystujące krzem amorficzny stanowią ciekawy obiekt w rozważaniach na temat wpływu warunków zewnętrznych, w szczególności temperatury i wiatru na pracę ogniw ponieważ charakteryzuje je wartość współczynnika temperaturowego wynosząca 0.2%/$^o$C. Jest to wartość mniejsza niż dla krzemu krystalicznego i najniższa spośród innych materiałów stosowanych w ogniwach cienkowarstwowych.

Przedstawiona praca poświęcona jest badaniom symulacyjnym opartym na wykorzystaniu matematycznego modelu opisującego wpływ temperatury, natężenia promieniowania słonecznego i prędkości wiatru na sprawność amorficznych krzemowych ogniw słonecznych.

## 2. Opis metod badawczych

W prowadzonych pracach wykorzystany był model matematyczny opisujący zależność temperatury modułu fotowoltaicznego i jego sprawności od natężenia promieniowania słonecznego, prędkości wiatru i temperatury otoczenia. Dokładność zastosowanego modelu jest potwierdzona przez wyniki analiz eksperymentalnych. Przy użyciu tego modelu w odniesieniu do technologii a-Si pierwiastek średniego błędu kwadratowego (RMSE – Root Mean Squared Error) wynosi 1,7, a wartość współczynnika determinacji równa jest 0,98 [4]. Obliczenia wykonane zostały przy zastosowaniu oprogramowania MatLab.

## 3. Wyniki badań i ich analiza

Jednym z najważniejszych parametrów charakteryzujących ogniwa słoneczne jest ich sprawność. Wielkość ta podobnie jak natężenie prądu zwarcia ($I_{SC}$) i napięcie obwodu otwartego ($V_{OC}$) może być wyznaczona na podstawie charakterystyki prądowo napięciowej ogniwa, co przedstawia poniższy wzór [8]:

$$\eta = \frac{P_{MP}}{P_{in}} = \frac{FFV_{OC}I_{SC}}{P_{in}} \tag{1}$$

gdzie: $P_{in}$ – moc promieniowania padającego.

W powyższym wyrażeniu występuje także inny parametr cechujący ogniwa słoneczne – współczynnik wypełnienia ($FF$ – Fill Factor), który wyznaczyć można znając natężenie $I_{MP}$ oraz napięcie $V_{MP}$ w punkcie mocy maksymalnej $P_{MP}$ [8]:

$$FF = \frac{P_{MP}}{V_{OC}I_{SC}} = \frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{OC}I_{SC}} \tag{2}$$

W celu przeanalizowania wpływu wymienionych czynników na temperaturę, a następnie sprawność ogniwa wykorzystane zostały zależności teoretyczne. Spośród licznych formuł opisujących temperaturę ogniw fotowoltaicznych wybrany został model opisany poniższym wzorem [4]:

$$T_c = T_a + \frac{I}{U_0 + U_1 v_w} \tag{3}$$

gdzie: $T_a$ – temperatura zewnętrzna,
$I$ – natężenie promieniowania słonecznego,
$v_w$ – prędkość wiatru,
$U_0$, $U_1$ – współczynniki zależne od transportu ciepła na drodze konwekcji, promieniowania i przewodnictwa w module wykonanym w danej technologii.

Przestawiona zależność wykazuje w literaturze dobrą zgodność obliczeń z danymi eksperymentalnymi uzyskanymi dla ogniw wykonanych z amorficznego krzemu. Przyjęte do obliczeń wartości współczynników związanych z przekazem ciepła dla a-Si wynoszą: $U_0$=25,73 W/$^o$Cm$^2$ i $U_1$=10,67 Ws/$^o$Cm$^3$.

Sprawność ogniw a- Si przedstawiona na Rys. 1 i 2 wyznaczona została na podstawie następującej zależności, uwzględniającej temperaturę $Tc$ ogniwa, na którą wpływ ma prędkość wiatru [1]:

$$\eta = \eta_{STC}[1 - \beta_{STC}(T_c - T_{STC})], \tag{4}$$

gdzie: $\eta_{STC}$, $\beta_{STC}$, $T_{STC}$ – sprawność, współczynnik temperaturowy i temperatura pracy modułu w warunkach standardowych.

Pozostałe przyjęte do obliczeń parametry, występujące w równaniu 3 i 4 przedstawione są w Tabeli 2.

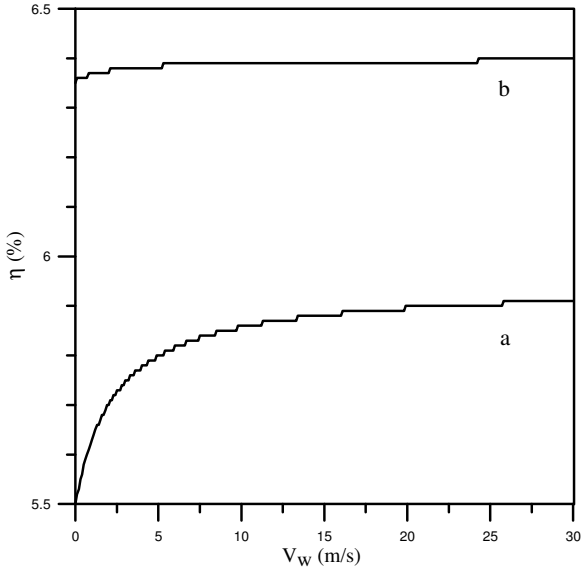
Tabela 2. Wartości parametrów przyjętych w modelu

Table 2. The values of model parameters

| **Parametr** | **Półrocze letnie** | **Półrocze zimowe** | **Wartość maks.** | **Wartość min.** |
|---|---|---|---|---|
| $T_a$ ($^o$C) | 14,4 | 1,15 | 30 | -10 |
| $I$ (W/m$^2$) | 600 | 300 | 1000 | 100 |
| $\eta_{STC}$ (%) | 6,0 | | | |
| $\beta_{STC}$ (%/$^o$C) | 0,19 | | | |
| $T_{STC}$ ($^o$C) | 25 | | | |

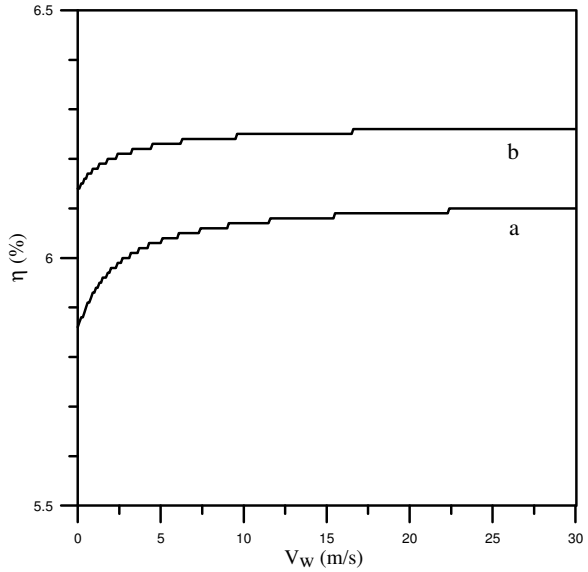
Rys. 1 przedstawia zmiany sprawności ogniw a-Si związane z obniżaniem ich temperatury przez wiatr. Widoczny wpływ wiatru jest znacząco większy w przypadku skrajnie wysokiej wartości temperatury otoczenia i natężenia promieniowania słonecznego.

Rezultaty obliczeń przeprowadzonych dla średnich wartości temperatury zewnętrznej i natężenia promieniowania słonecznego wskazują na większą rolę wiatru w półroczu letnim.




Rys. 1. Zależność sprawności ogniw słonecznych z amorficznego krzemu od prędkości wiatru w warunkach skrajnych; a – maksymalne wartości $T_a$ oraz $I$, b – wartości minimalne $T_a$ oraz $I$

Fig. 1. The dependency of a-Si solar cells efficiency on the wind speed in extreme conditions; a – maximum values of $T_a$ and $I$, b – minimum values of $T_a$ and $I$




Rys. 2. Zależność sprawności ogniw słonecznych z amorficznego krzemu od prędkości wiatru w przeciętnych warunkach; a – półrocze letnie, b – półrocze zimowe

Fig. 2. The dependency of a-Si solar cells efficiency on the wind speed in average conditions; a – warm part of the year, b – cold part of the year

## 4. Wnioski

Analizy symulacyjne przeprowadzone w pracy wykazują dużą odporność modułów wykorzystujących krzem amorficzny na zmiany temperatury. Materiał ten ma dwukrotnie mniejszy współczynnik temperaturowy niż krzem monokrystaliczny lub polikrystaliczny. Z tego względu, zgodnie z przeprowadzonymi obliczeniami, chłodząca rola wiatru skutkuje niewielką poprawą wydajności.

Z punktu widzenia inwestora zakupującego moduły należy kierować się nie tylko ich ceną, ale także zwrócić uwagę na to w jakiej technologii są one wykonane i w jakich warunkach klimatycznych będą one zainstalowane. Cienkowarstwowe moduły a-Si, ze względu na stosunkowo dużą odporność na zmiany temperatury mogą być z powodzeniem stosowane w klimacie charakteryzującym się znacznymi wahaniami temperatury i prędkości wiatru, np. w Polsce. Projektowanie instalacji fotowoltaicznej powinno być poprzedzone teoretyczną analizą pracy danego typu modułów w wybranej lokalizacji.

## Literatura

[1] Skoplaki E., Palyvos J.A.: On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations, Solar Energy, 83, 2009, pp. 614-624.

[2] Olchowik J.M., Jóźwik I., Szymczuk D., Zabielski K., Mucha J., Tomaszewski R., Banaś J., Olchowik S., Adamczyk J., Cieplak T., Zdyb A: Analysis of solar cells efficiency in hybrid solar system under conditions of south-easterly Poland: Proc. of 19th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 7-11 June 2004, Paris, France, pp. 3294-3296.

[3] Olchowik J.M., Gułkowski S., Cieslak K., Jóźwik I., Banaś J., Olchowik S., Zdyb A., Szymczuk D., Adamczyk J., Tomaszewski R., Zabielski K., Mucha J., Cieplak T.: Comparative study of the solar modules performance in the hybrid system in south-easterly Poland during first two years of exploitation, Proc. of 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 4-8 September 2006, Dresden, Germany, pp. 3049-3050.

[4] Schwingshackl C., Petitta M., Wagner J.E., Belluardo G., Moser D., Castelli M., Zebisch M., Tetzlaff A.: Wind effect on PV module temperature: Analysis of different techniques for an accurate estimation, Energy Procedia, 40, 2013, pp. 77-86.

[5] Luque A., Hegedus S.: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Wiley, 2003, pp. 528-541.

[6] Sharmaa V., Sastryb O.S., Kumarb A., Borab B., Chandela S.S: Degradation analysis of a-Si, (HIT) hetro-junction intrinsic thin layer silicon and m-C-Si solar photovoltaic technologies under outdoor conditions, Energy, 72, 2014, pp. 536-546.

[7] Cieślak K., Gułkowski S., Olchowik J.M.: Influence of dielectric coverage on photovoltaic conversion of silicon solar cells obtained by epitaxial lateral overgrowth, Materials Science-Poland, 30, 2012, 274-277.

[8] Luque A., Hegedus S.: Handbook of Photovoltaic Science and Engineering, Wiley 2003.

# THE ROLE OF WIND CONDITIONS IN SOLAR CELLS PERFORMANCE

**S u m m a r y**

Solar modules performance data obtained in STC conditions provided by manufacturers differ from the results obtained from photovoltaic installations working in real external conditions. That is why examination of solar modules performance in different environmental variables such as solar irradiance, temperature and wind speed as well as simulation of their parameters in external conditions is a very significant issue.

The efficiency of solar cells, analogously to other semiconductor devices, depends significantly on the cell operating temperature. Temperature growth causes the increase of electrons energy and narrowing of the semiconductor bandgap. These phenomena result in the changes of *I-V* characteristic shape where one can observe drop of open circuit voltage and slight increase of short circuit current. Since in real applications of solar cells their efficiency is influenced by environmental variables, experimental observations of the performance of different photovoltaic technologies working in various climate conditions are carried in many scientific centers in the world.

This work focuses on the influence of different ambient conditions, especially wind speed, on the performance of thin film amorphous silicon photovoltaic cells. The analysis based on the theoretical model indicate wind cooling effect at wind speed up to about 10 m/s. Further increase of wind speed value does not have significant influence on the efficiency of the cells. The characteristic feature of a-Si modules is their good resistivity for temperature changes. This kind of modules can be thus applied in different locations where the weather conditions drastically change from season to season.

**Keywords:** photovoltaics, amorphous silicon cells, cell efficiency, cell temperature

DOI:10.7862/rb.2016.240

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 571-578

**Kinga ZĘBALA**[1]

# POMIARY IZOLACYJNOŚCI AKUSTYCZNEJ WYBRANYCH ŚCIAN ZEWNĘTRZNYCH W BUDYNKU WIELKOPŁYTOWYM PRZED I PO DOCIEPLENIU

W artykule zawarto wyniki badań izolacyjności akustycznej przegród zewnętrznych budynku z tzw. wielkiej płyty. Badania wykonano zgodnie z obowiązującymi normami. O wpływie docieplenia na izolacyjność akustyczną przegrody jednowarstwowej pisano już wielokrotnie. Analizy dokonywano wówczas na podstawie badań laboratoryjnych. Jednak aby sprawdzić, jaki wpływ na izolacyjność akustyczną ścian zewnętrznych z „wielkiej płyty" ma ich docieplenie, dokonano pomiarów w przykładowym mieszkaniu. Badania wykonano w budynku mieszkalnym wielorodzinnym zbudowanym w technologii WUFT (ściana trójwarstwowa). Pomiary wykonano w dwóch wariantach: przed i po dociepleniu ścian styropianem grubości 8 cm. Badano ściany z oknami oraz ścianę pełną pokoju, sąsiadującą ze ścianą z oknem. W celu zminimalizowania wpływu okien, wykonano również pomiary po zaizolowaniu ich płytami z wełny mineralnej, które układano warstwami naprzemiennie. Następnie przedstawiono wyniki i dokonano ich analizy. Docieplenie ma wpływ na izolacyjność akustyczną przegrody. Drugim elementem analizy w aspekcie izolacyjności akustycznej było określenie wpływu okien.

**Słowa kluczowe:** izolacyjność akustyczna, ciśnienie akustyczne, decybel, wielka płyta, WUFT

## 1. Wstęp

Zmieniające się wciąż, a ponadto coraz ostrzejsze wymagania europejskie skierowane ku oszczędności energii powodują istotne zmiany w różnych działaniach i przepisach obejmujących sektor budownictwa. Odniesieniem tych działań, w tym tzw. idei energooszczędności, są nowe technologie wznoszenia budynków jak również podejmowanie zabiegów termoizolacyjnych w budynkach już istniejących. Odzwierciedleniem tych idei są również kolejne nowelizacje przepisów w tym: „Prawo Budowlanego" [7], „Warunki Techniczne, jakim po-

[1] Kinga Zębala, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Zakład Budownictwa i Fizyki Budowli, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków; tel. 12 628-20-25 w.2384; kzebala@pk.edu.pl

winny odpowiadać budynki i ich usytuowanie" [8], jak również uznawanie przez Polskę różnego rodzaju przepisów dotyczących energooszczędności. W aspekcie powyższego powszechnie porusza się kwestię budowy przegród zewnętrznych budynku w kontekście energooszczędności, a wręcz do rzadkości należy dobór i analiza przegród pod względem wymagań i właściwości akustycznych [5].

W ramach prowadzonych badań własnych w latach 2009-2015 obejmujących korelację pomiędzy izolacyjnością termiczną a akustyczną i przedstawionych w pracy [1] oraz [2] wykazano wyraźnie nieliniową zależność pomiędzy grubością izolacji a parametrami akustycznymi. Ponadto na podstawie wyników analityczno-badawczych w ww. pracach stwierdzono, że w odniesieniu do zastosowanego materiału w przegrodzie występuje ujemna korelacja pomiędzy oporem cieplnym, a wskaźnikami izolacyjności akustycznej $R_W$ i $R_{A,2}$. Poziom tej korelacji w znacznej mierze zależny jest od grupy materiałowej – silniejsza występuje dla materiałów porowatych, słabsza dla materiałów zwięzłych. Silna zależność występuje również w ścianach, w których stosuje się materiał izolacyjny. Wykazany w pracach [1,2] wpływ ocieplenia zależny jest nie tylko od rodzaju materiału, z którego wykonana jest termoizolacja i od sposobu jego mocowania (rodzaju systemu), ale także od jakości (dokładności) wykonawczej. W przeprowadzonych badaniach dla samego systemu ETICS, zwanego wcześniej metodą „lekką mokrą" (w różnych wariantach materiałowych) stwierdzono spadek izolacyjności akustycznej $R_W$ o 2÷5 dB i $R_{A,2}$ o 2÷4 dB.

W kontekście przeprowadzonych analiz jak również uzyskanych wyników podjęto próbę określenia parametrów akustycznych przegrody w warunkach „in situ". Do badań wybrano obiekt istniejący, wykonany w tzw. technologii wielkopłytowej, który poddawany był zabiegom docieplenio wym. Do badań przyjęto ścianę pełną oraz ścianę otworową (okienną). Badania przeprowadzono w dwóch wariantach budowy przegrody – w warunkach naturalnych oraz po zabiegu termomodernizacyjnym. Wyniki oraz wnioski z prowadzanych badań przedstawiono w dalszej części artykułu.

## 2. Izolacyjność akustyczna – informacje podstawowe

Izolacyjność akustyczna jest miarą określającą jak dobrze konstrukcja budowlana (przegroda) izoluje pomieszczenie od dźwięków pochodzących z innych pomieszczeń lub z otoczenia. Wyróżnia się izolacyjność akustyczną od dźwięków powietrznych (przechodzących przez ściany, stropy i instalacje) oraz od dźwięków uderzeniowych (przenoszonych przez stropy i instalacje), w których stosuje się odpowiednio:

– do oceny izolacyjności akustycznej od dźwięków uderzeniowych parametr $L'_{nT}$ ,
– do oceny izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych, w przypadku ścian zewnętrznych, stosuje się parametr $R'_{A,2}$, który uwzględnia widmo typowego hałasu zewnętrznego.

Pomocnym jest również tzw. wskaźnik ważony $R_w$, który odnosi się do hałasu o równym poziomie w poszczególnych częstotliwościach. Jest wyrażany w dB (decybel). Zgodnie z ISO 717-1 [7] można w uproszczeniu przyjąć, że wykorzystujemy wskaźnik oceny izolacyjności akustycznej właściwej $R'_{A,1}$ dla oceny ścian wewnętrznych i $R'_{A,2}$ dla oceny ścian zewnętrznych [6]. Zależności pomiędzy tymi wielkościami kształtują się następująco:

$$R_{A,1} = R_W + C \text{ [dB]} \quad (1)$$

$$R_{A,2} = R_W + C_{tr} \text{ [dB]} \quad (2)$$

$$R_W (C, C_{tr}) \text{ [dB]} \quad (3)$$

gdzie:

C - widmowy wskaźnik adaptacyjny - dotyczący hałasów użytkowych (rozmowa, muzyka, zabawa dzieci),

$C_{tr}$ - widmowy wskaźnik adaptacyjny - dotyczący transportu (ruch uliczny i kolejowy, samoloty itp.).

Wskaźniki C i $C_{tr}$ przybierają wartości ujemne (a jedynie w nielicznych przypadkach wynoszą 0).

## 3. Pomiary oraz analiza izolacyjności akustycznej przegrody przyjętej do badań

### 3.1. Charakterystyka budynku

Badania terenowe wykonano w budynku mieszkalnym wielorodzinnym pięciokondygnacyjnym wykonanym w technologii WUFT -87 GT na terenie miasta Kraków. Do badań przyjęto lokal znajdujący się na parterze, ze względu na swobodę dostępu do przegrody od strony zewnętrznej, w którym analizie poddano dwie ściany zewnętrzne – pełną oraz z otworami (rys.1). System WUFT-87 GT należy do grupy budynków tzw. wielkoformatowych, w którym ściany zewnętrzne były przygotowywane jako elementy trójwarstwowe, w pełni wykończone. Występujące w nim ściany o wysokości kondygnacji występowały najczęściej w sześćdziesięciocentymetrowych wymiarach modułowych np. szerokości 300, 480 i 600 cm. Ostatni wymiar (600) dotyczył zazwyczaj ścian obejmujących dwa przylegające pomieszczenia – pokój i kuchnię. Wszystkie elementy ścienne maja grubość 25 cm i pozwalają na oparcie stropu na każdej z nich (w przeciwieństwie do systemu W-70 gdzie ściana zewnętrzna z otworami stanowi jedynie element osłonowy). W ścianie badanego budynku przyjęto (na podstawie dokumentacji technicznej) następujący układ warstw:

1. przed dociepleniem:

– 14 cm wewnętrzna warstwa konstrukcyjna z betonu,

– 5 cm warstwa izolacji cieplnej ze styropianu,

– 6 cm zewnętrzna warstwa fakturowa z betonu;

2. po docieplenіu:

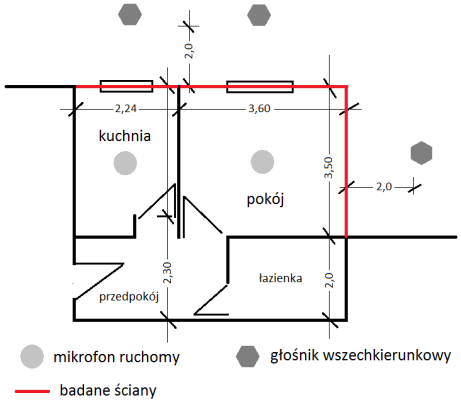
– 14 cm wewnętrzna warstwa konstrukcyjna z betonu,
– 5 cm warstwa izolacji cieplnej ze styropianu,
– 6 cm zewnętrzna warstwa fakturowa z betonu,
– 8 cm warstwa izolacji cieplnej ze styropianu,
– 0,5 cm warstwa klejowo- zbrojąca.

Dodatkowo w ścianie otworowej w otworach okiennych zastosowano w trakcie badań obudowę z wełny mineralnej oraz płyty GK, gdy jednym z celów badań było wskazanie wpływu otworów okiennych na izolacyjność akustyczną przegrody.

### 3.2. Opis przeprowadzonych badań i pomiarów

Wykonane pomiary i badania oparto o wytyczne zawarte w normie PN-EN ISO 140-5 z 1999 r. [3] oraz PN-EN ISO 16283-1:2014-05 [4], w których wskazana jest wprost m.in.: pozycja mikrofonu, pozycja głośnika, liczba pomiarów oraz czas trwania pomiaru (np. dla mikrofonu ruchomego min.15 s). W związku z powyższym do badań wybrano lokal znajdujący się na parterze do którego przegród (szczególnie okien) była możliwa swoboda dostępu. Do pomiarów wykorzystano wszechkierunkowe źródło dźwięku oraz mikrofon ruchomy. Czas prowadzenia pojedynczego pomiaru wynosił 30 s.

Prowadzone badania i pomiary miały na celu sprawdzenie, jaki wpływ na izolacyjność akustyczną ściany zewnętrznej maja zabiegi docіepleniowe. Dlatego pomiary wykonano w dwóch wariantach: przed (rys.3) i po docіepleniu budynku (rys.4) warstwą izolacyjną ze styropianu gr. 8 cm. Każdorazowo podczas pomiarów badano ścianę pełną oraz ścianę okienną (por. rys.1 i 2) w pomieszczeniu pokoju i kuchni. W trakcie badań w celu zminimalizowania wpływu otworów okiennych wprowadzono tymczasowe zabezpieczanie – zasłonięcie okien od strony źródeł dźwięku. Zabieg ten wykonano za pomocą wełny szklanej ISOVER Aku Płyta gr. 75 mm w dwóch warstwach układanych tak, aby łączenia płyt nie pokrywały się ze sobą, a po docіepleniu budynku w trzech warstwach układanych j.w.. W obu przypadkach jako wierzchnią warstwę zabezpieczającą wełnę zastosowano płytę GK mocowaną do elewacji pianką.




Rys. 1. Rzut lokalu poddanego badaniu

Fig. 1. Arrangement of single Flat




Rys. 2. Widok pokoju w mieszkaniu

Fig. 2. View of internal space




Rys. 3. Źródło dźwięku przy badanej ścianie pełnej przed docieplenieniem

Fig. 3. Before thermal insulation




Rys. 4. Źródło dźwięku przy badanej ścianie pełnej po dociepleniu

Fig. 4. After thermal insulation

Badany lokal to mieszkanie typu M4 w skład którego wchodziły 3 pokoje, kuchnia łazienka z WC oraz przedpokój. Analizom poddano przegrody występujące od strony północnej i należące do pokoju i kuchni. Parametry przegród przedstawiały się następująco: pokój pow. 30,87 $m^2$ (okno 170x120 cm), kuchnia pow. 5,49 $m^2$ (okno 140x120cm), wysokość pomieszczeń 2,45 m, ściany zewnętrzne zgodnie z technologią systemu (por. pkt. 3.1), okna DRUTEX Thermofloat 4x16WESX4 ARGON (rok prod. 2006). Stosunek powierzchni okien do powierzchni ściany wynosi odpowiednio: w pokoju 35%, w kuchni 40%.

### 3.3. Zakres oraz wyniki przeprowadzonych pomiarów

W takcie powadzonych badań założono i wykonano dwa warianty pomiarów:
- stan istniejący (z nieosłoniętymi i osłoniętymi otworami okiennymi)
- stan po docieplenіu (z nieosłoniętymi i osłoniętymi otworami okiennymi).

Ponadto dla celów porównawczych wykonano pomiar obudowy okiennej. Wyniki z poszczególnych wariantów przedstawiono w tabeli 1.

W kolejnym kroku za pomocą programu dBBati opracowano wyniki pomiarów izolacyjności akustycznej dla poszczególnych ścian i ich wariantów budowy.

Tabela 1. Wyniki izolacyjności akustycznej ścian zewnętrznych

Table 1. The results of acoustic insulation of external walls

| pom. | ściana | zabudowa okna | R'45°/R'45°w [dB] | | $R'_{A2}$ [dB] | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | przed dociepleniem | po dociepleniu | przed dociepleniem | po dociepleniu |
| pokój 30,87 $m^3$ | pełna 8,82 $m^2$ | wełna ISOVER Aku Płyta gr. 75 mm przed dociepleniem: 2 warstwy + płyta g-k po dociepleniu: 3 warstwy + płyta g-k | 54(-1;-4) | 50(-2;-3) | 50 | 47 |
| | | brak | 49(-1;-4) | 48(-1;-4) | 45 | 44 |
| | ściana z oknem 8,575 $m^2$ | wełna mineralna j.w. | 50(-1;-3) | 49(-1;-3) | 47 | 46 |
| | | brak | 36(-2;-5) | 37(-2;-4) | 31 | 33 |
| kuchnia 17,56 $m^3$ | ściana z oknem 5,49 $m^2$ | wełna mineralna j.w. | 54(-1;-4) | brak badania | 50 | brak badania |
| | | brak | 40(-2;-5) | 38(-1;-2) | 35 | 36 |

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że wskaźnik oceny izolacyjności akustycznej właściwej $R'_{A2}$ ściany zewnętrznej pełnej (sąsiadującej ze ścianą z oknem) po docieplenіu jej styropianem gr. 8 cm zmniejszył się o 1 dB (z 45dB na 44dB). Natomiast po zaizolowaniu okna w ścianie sąsiedniej wełną mineralną oraz płytami GK, wskaźnik $R'_{A2}$ zmniejszył się o 3 dB (z 50dB na 47dB). W przypadku ścian z oknami zarówno w pokoju jak i w kuchni, wskaźnik $R_{A,2}$ po docieplenіu ściany zwiększył się o 1÷2 dB (w pokoju z 31dB

na 33dB; w kuchni z 35dB na 36dB). Natomiast po zaizolowaniu okna wełną mineralną oraz płytami GK wskaźnik $R'_{A,2}$ zmniejszył się o 1 dB (z 47dB na 46dB).

## 4. Wnioski z prowadzonych badań

Na podstawie dokonanych pomiarów „in situ" można stwierdzić, że izolacyjność akustyczna ścian zewnętrznych pełnych wykonanych w technologii WUFT-87GT po docieplenіu jej styropianem gr. 8 cm wyraźnie maleje (por. tab. 1 wiersz 1 i 2), zarówno w przypadku próby zminimalizowania wpływu okien w ścianie sąsiadującej przez zastosowanie wełny mineralnej, jak i bez jego izolacji.

Natomiast w przypadku ścian z otworami prowadzone zabiegi docieplenіowe w nieznacznym stopniu poprawiają izolacyjność akustyczną przegrody zewnętrznej. Po przeprowadzeniu zabiegów docieplenіowych ściany, bez wymiany okna, izolacyjność akustyczna całej przegrody wzrosła (por. tab. 1 wiersz 4 i 6). Ponadto na podstawie prowadzonych badań zauważono zależność pomiędzy powierzchnią okna i przegrody, że w przypadku, gdy stosunek powierzchni okna do powierzchni ściany waha się między 30% a 45%, izolacyjność całej przegrody wzrasta po jej docieplenіu. Wyjaśnienie tego zjawiska nie jest możliwe na tym etapie badań. Nie ma pewności, czy taki wzrost izolacyjności wystąpi w innych, zbliżonych do tej, sytuacjach, czy jest to przypadek jednostkowy.

Otrzymane wyniki należy traktować jako terenowe badania pilotażowe i wstęp do kolejnych badań w tym kierunku. Niestety ich wykonalność może okazać się dość trudna, gdyż wymaga ona pełnej akceptacji ze strony użytkowników lokali jak również prowadzenia badań w trakcie prac docieplenіowych.

## Literatura

[1] Kłosak A. „Relacje pomiędzy izolacyjnością akustyczną a właściwościami cieplnymi ścian zewnętrznych - wstępne rozpoznanie zagadnienia", Międzynarodowe seminarium Energodom 2006, Kraków, październik 2006, Czasopismo Techniczne - Budownictwo, z. 5-B/2006, tom II, s. 359-372.

[2] Zębala K., Zastawna-Rumin A., Kłosak A., Dulak L. „Relacje pomiędzy izolacyjnością akustyczną a izolacyjnością termiczną ścian jedno i wielowarstwowych" Międzynarodowa konferencja Energodom 2012, Kraków, wrzesień 2012, Czasopismo Techniczne - Budownictwo, 2-B/2012, s. 471-481.

[3] PN-EN ISO 140-5 z 1999 r. - Pomiar izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych - Pomiary terenowe izolacyjności akustycznej od dźwięków powietrznych ściany zewnętrznej i jej elementów.

[4] PN-EN ISO 16283-1:2014-05 - Pomiary terenowe izolacyjności akustycznej w budynkach i izolacyjności akustycznej elementów budowlanych - od dźwięków powietrznych.

[5] Szudrowicz B. „Budownictwo ogólne" tom 2, Fizyka budowli, rozdz. 8, Arkady.

[6] ISO 717-1 z 2013 r. Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation.
[7] Ustawa z dnia 7.07.1994 r. Prawo Budowlane, z późniejszymi zmianami.
[8] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 12.04.2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie, z późniejszymi zmianami.

## MEASUREMENTS OF ACOUSTIC INSULATION IN THE SELECTED EXTERNAL WALLS OF LARGE PANEL BUILDING BEFORE AND AFTER THERMAL MODERNIZATION

**S u m m a r y**

The article presents the results of tests of acoustic insulation of the envelope of the large panel building. The tests were conducted in accordance with applicable standards. The influence of thermal insulation on the acoustic insulation of a single-layer component has been described in many articles. Analyses were performed on the basis of laboratory tests. However, to analyze the impact on the thermal insulation of large panel building external walls on their acoustic insulation, the measurements in the sample apartment were conducted. The study was performed in multi-family residential building built in technology WUFT (cavity wall). Measurements were made in two options: before and after the thermal insulation of walls with 8 cm thick styrofoam layer. The wall with window framing and the solid wall next to the wall with windows were analyzed. To minimize the impact of windows, measurements were also performed on the insulation of the mineral wool plates arranged in layers alternately. Next the results were presented and analysis made. Thermal insulation affects the sound insulation of the partition. The second part of the analysis in terms of sound insulation was to determine the influence of the windows.

**Keywords:** acoustic insulation, acoustic pressure, large panels, decibel, WUFT

DOI:10.7862/rb.2016.241

*Przesłano do redakcji: 30.06.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

CZASOPISMO INŻYNIERII LĄDOWEJ, ŚRODOWISKA I ARCHITEKTURY
JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING, ENVIRONMENT AND ARCHITECTURE
JCEEA, t. XXXIII, z. 63 (3/16), lipiec-wrzesień 2016, s. 579-588

**Dominika ZIAJA**[1]
**Bartosz MILLER**[2]

# DETEKCJA USZKODZEŃ NA PRZYKŁADZIE DWUKONDYGNACYJNEJ RAMY PORTALOWEJ Z WYKORZYSTANIEM SZTUCZNYCH SIECI NEURONOWYCH

Detekcja uszkodzeń konstrukcji jest jednym z elementów monitorowania stanu konstrukcji, prężnie rozwijającej się dziedziny mającej na celu zwiększenie bezpieczeństwa użytkowania obiektu i minimalizację kosztów jego eksploatacji. W artykule przedstawiono wyniki detekcji uszkodzeń stalowej, dwukondygnacyjnej ramy portalowej z wykorzystaniem analizy parametrów dynamicznych układu (częstotliwości i form drgań). Podstawę rozważań stanowiły dane pomiarowe uzyskane dla różnego rodzaju uszkodzeń węzłów. Dla badanej ramy dokonano analizy zmienności parametrów dynamicznych w zależności od tego, czy uszkodzenie węzła wystąpiło czy nie. Jako narzędzie umożliwiające klasyfikację wzorców zastosowano jednowarstwowe, jednokierunkowe sieci neuronowe. W opracowaniu zaprezentowano wyniki dla sieci neuronowych o różnej architekturze oraz przy zróżnicowanym podziale na zbiory uczące i testujące.

**Słowa kluczowe:** monitorowanie stanu konstrukcji (SHM), sztuczne sieci neuronowe

## 1. Wprowadzenie

Monitorowanie stanu konstrukcji znajduje obecnie coraz szersze zastosowanie nie tylko w przemyśle lotniczym, motoryzacyjnym ale również w budownictwie. Nie trzeba z pewnością nikogo przekonywać o korzyściach płynących z wczesnej detekcji uszkodzeń, a co za tym idzie możliwości zapobiegania poważnym awariom i katastrofom budowlanym.

Wciąż rosnące możliwości techniczne powodują rozwój różnorodnych technik pomiarowych wykorzystywanych w monitorowaniu stanu konstrukcji.

[1] Autor do korespondencji / corresponding author: Dominika Ziaja, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. (0-17)8651618, dziaja@prz.edu.pl

[2] Bartosz Miller, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, tel. (0-17)8651532, bartosz.miller@prz.edu.pl

Szczególnie popularne stają się techniki nieniszczące, gdyż umożliwiają nieprzerwaną eksploatację obiektu zarówno w trakcie badań, jak i po ich zakończeniu. Jedną z nieniszczących technik pomiarowych, wykorzystaną w prezentowanych badaniach, jest pomiar przyspieszeń będących odpowiedzią na wymuszenie dynamiczne w wybranych punktach układu. Zgromadzone w ten sposób dane wykorzystywane są do wykonania analizy modalnej w celu określenia parametrów dynamicznych konstrukcji takich jak: częstotliwości i postaci drgań oraz współczynniki tłumienia [1]. Porównanie parametrów dynamicznych konstrukcji w chwili przeprowadzenia pomiaru z parametrami odpowiadającymi konstrukcji w stanie nieuszkodzonym pozwala ocenić, czy w układzie nastąpiły zmiany i czy są one dla obiektu niebezpieczne [2].

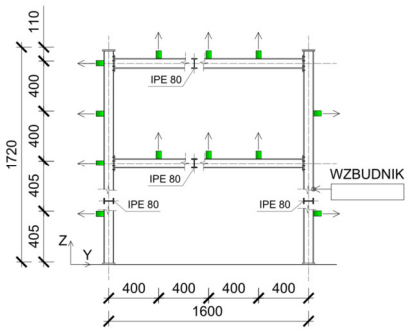
W artykule przedstawiono wyniki badań mających na celu określenie stanu konstrukcji i zaklasyfikowanie jej jako uszkodzona bądź nieuszkodzona, na przykładzie dwukondygnacyjnej, stalowej ramy portalowej. Prezentowane wyniki bazują na danych doświadczalnych, a analizę zmian parametrów dynamicznych wykonano przy użyciu sztucznych sieci neuronowych [3-4].

## 2. Opis modelu

Rys. 1 przedstawia schemat modelu laboratoryjnego dwukondygnacyjnej ramy portalowej. Zarówno słupy jak i rygle wykonano z kształtownika IPE80. Połączenia rygiel–słup wykonano jako doczołowe, posiadające zgodnie z Rys. 2. cztery rzędy śrub M8 klasy 8.8.

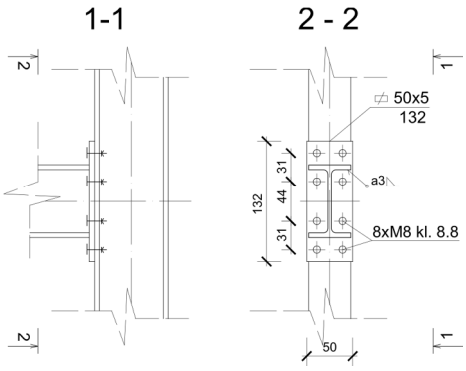
W trakcie badań drgania modelu wymuszano używając zamocowanego na dodatkowej konstrukcji wsporczej wzbudnika firmy The Modal Shop, Inc. Model 2100E11, a biały szum w zakresie 0-256Hz wygenerowany został przez pakiet LMS TestLab. Zarówno kierunek wymuszenia, jak i kierunki pomiaru przyspieszeń znajdowały się w płaszczyźnie ramy. Przyspieszenia mierzono przy użyciu 12 jednoosiowych czujników PCB Piezotronics, Inc. Model 352C03, z których każdy zamocowano w innym punkcie pomiarowym. Siłę wymuszającą rejestrowano za pomocą czujnika PCB Piezotronics, Inc. Model 208C03. Rozmieszczenie czujników pokazano na Rys. 1. W trakcie pomiarów wykorzystano analizator LMS SCADAS Mobile. Parametry pomiaru dobrano tak, aby pomierzony sygnał po transformacji do dziedziny częstotliwości miał zakres 0-256Hz i rozdzielczość 0.125Hz, a analizę modalną przeprowadzono przy użyciu procedury Polymax dostępnej w komercyjnym pakiecie LMS Testlab Spectral Testing [5].

Plan badań zakładał wykonanie pomiarów zarówno układu nieuszkodzonego, jak i układów z uszkodzeniami połączenia rygiel – słup. Uszkodzenie polegało na rozkręceniu jednego, dwóch lub trzech rzędów śrub w różnej konfiguracji, dla każdego połączenia tego typu. W trakcie pojedynczego pomiaru uszkodzony był tylko jeden węzeł. Podczas pomiarów przeprowadzano kilkukrotnie kontrolne badania ramy bez uszkodzeń. W ten sposób zgromadzono 88 wzorców w tym 65 dla ramy z uszkodzeniem i 23 dla ramy bez uszkodzenia.




Rys. 1. Schemat modelu fizycznego wraz z rozmieszczeniem czujników i kierunkami pomiarowymi, wymiary w mm

Fig. 1. Physical model and localization of accelerometers, dimensions in mm




Rys. 2. Połączenie rygiel-słup, wymiary w mm

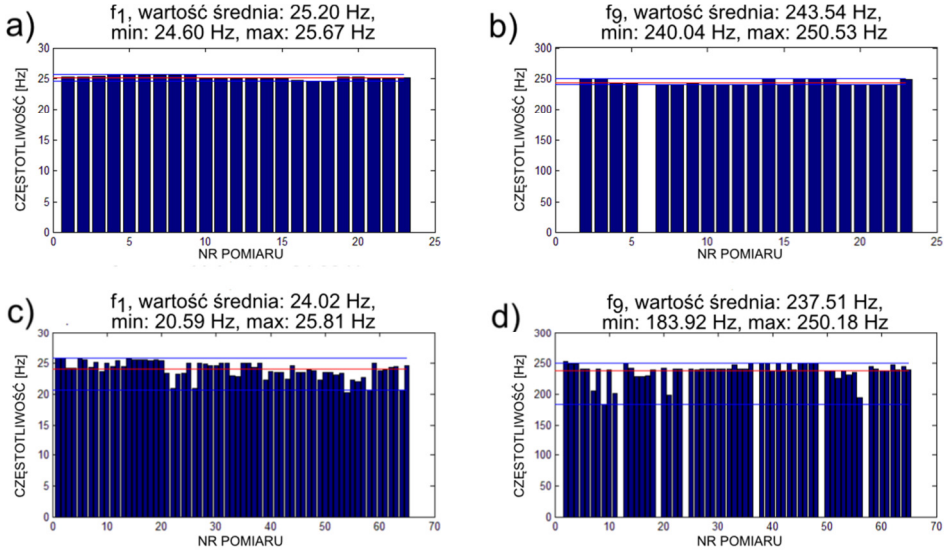
Fig. 2. Beam-to-column connection, dimensions in mm

## 3. Detekcja uszkodzeń

### 3.1. Analiza danych pomiarowych

Pierwszym etapem była analiza wartości częstotliwości drgań otrzymanych z pomiarów. Dla wzorców uszkodzonych i nieuszkodzonych wyznaczono oddzielnie średnie wartości częstotliwości, przy czym, jeśli w danym pomiarze nie zaobserwowano odpowiedniej częstotliwości modalnej pomiar nie był brany pod uwagę podczas wyznaczania wartości średniej. Odrzucono również maksymalną i minimalną wartość pomiaru dla odpowiedniej częstotliwości. Przykładowo pierwsze i dziewiąte częstotliwości drgań oraz wyznaczone wartości średnie przedstawiono na Rys. 3.

Tabela 1 pokazuje wartości średnie uzyskane podczas pomiarów dla wszystkich analizowanych częstotliwości, zarówno dla wzorców uszkodzonych jak i nieuszkodzonych, a także zakresy zmienności wykorzystane do zaszumiania danych w późniejszym etapie. Średnie wartości częstotliwości dla ramy uszkodzonej i nieuszkodzonej wyraźnie się różnią. Niestety odchylenia poszczególnych pomiarów od wartości średniej są duże (patrz Rys. 3), co utrudnia odpowiednią klasyfikację wzorców. Dlatego też do przeprowadzenia klasyfikacji wzorców wykorzystano sztuczne sieci neuronowe.




Rys. 3. Porównanie wyników pomiarów oraz wartości średnie dla pierwszej i dziewiątej częstotliwości drgań dla a) i b) ramy bez uszkodzenia, c) i d) ramy uszkodzonej

Fig. 3. Comparison of the measurement results and the average values for the first and ninth modal frequency for a) and b) the frame without damage, c) and d) the frame corrupted

Tabela 1. Analiza zmian częstotliwości

Table 1. Analysis of changes in frequency

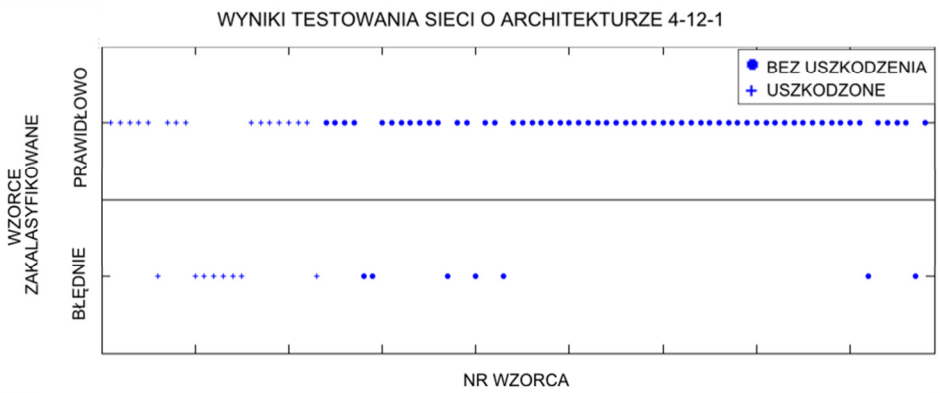
| nr Częst. | Rama bez uszkodzenia | | Rama z uszkodzeniem | |
|---|---|---|---|---|
| | $f_{srednia}$ [Hz] | zakres do zaszumiania [Hz] | $f_{srednia}$ [Hz] | zakres do zaszumiania [Hz] |
| 1 | 25.20 | 25.20 ± 0.47 | 24.02 | 24.02 ± 1.79 |
| 2 | 110.01 | 110.01 ± 2.97 | 107.90 | 107.90 ± 5.11 |
| 3 | 116.68 | 116.68 ± 12.43 | 120.93 | 120.93 ± 11.38 |
| 4 | 133.46 | 133.46 ± 9.93 | 136.91 | 136.91 ± 10.27 |
| 5 | 147.35 | 147.35 ± 7.74 | 147.67 | 147.67 ± 12.93 |
| 6 | 156.16 | 156.16 ± 4.56 | 164.71 | 164.71 ± 21.90 |
| 7 | 176.11 | 176.11 ± 28.62 | 187.04 | 187.04 ± 38.83 |
| 8 | 216.58 | 216.58 ± 24.64 | 216.58 | 216.58 ± 33.97 |
| 9 | 243.54 | 243.54 ± 7.00 | 237.51 | 237.51 ± 12.67 |
| 10 | 249.94 | 249.94 ± 0.99 | 245.08 | 245.08 ± 6.54 |

## 3.2. Detekcja uszkodzeń z wykorzystaniem sztucznych sieci neuronowych w oparciu o częstotliwości drgań

W celu określenia czy dany wzorzec odpowiada ramie uszkodzonej czy nie zastosowano jednowarstwowe, jednokierunkowe sztuczne sieci neuronowe. Do uczenia sieci wykorzystano algorytm Levenberga-Marquardta [6]. Początkowo uczono sieci o różnej liczbie neuronów wejściowych i różnej liczbie neuronów

w warstwie ukrytej. Danymi wejściowymi każdorazowo były kolejne częstotliwości drgań (od pierwszych czterech do dziesięciu), a liczba neuronów w warstwie ukrytej zmieniała się od 1 do 14 tak, aby liczba parametrów sieci nie przekraczała liczby wzorców uczących. We wszystkich sieciach występował tylko jeden neuron wyjściowy, określający czy rama została uszkodzona czy nie.

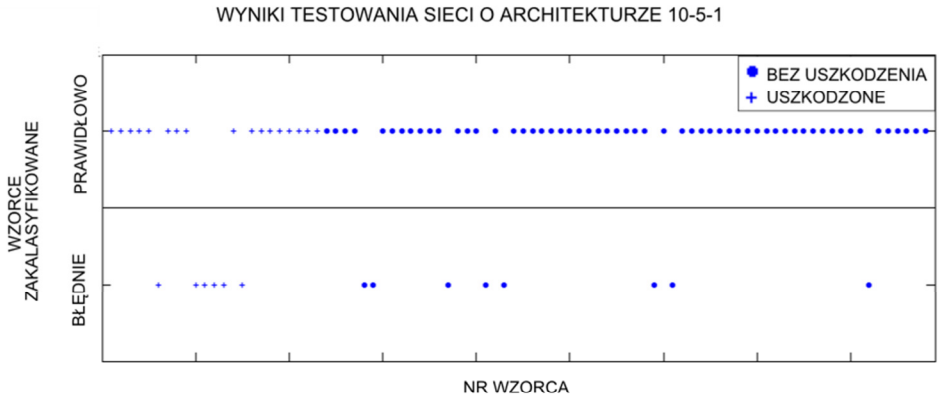
W pierwszym kroku uczono i testowano działanie sieci na wszystkich dostępnych wzorcach. Rys. 4 i 5. przedstawiają najlepsze wyniki otrzymane dla sieci bazującej na czterech pierwszych częstościach (o architekturze 4-12-1) i wszystkich dziesięciu częstotliwościach (architektura 10-5-1). W każdym z prezentowanych przypadków wzorce błędnie zakwalifikowane stanowiły odpowiednio 17% i 16%.




Rys. 4. Wyniki testowania sieci o architekturze 4-12-1, uczenie i testowanie na pełnym zbiorze wzorców

Fig. 4. Testing results of artificial neural network with architecture 4-12-1, learning and testing with using full set of patterns

Niezadowalające rezultaty otrzymane z pierwszej próby mogły być wynikiem zbyt małej liczby wzorców otrzymanych z pomiarów, dlatego też postanowiono wygenerować dodatkowe wzorce służące wyłącznie uczeniu sieci. Na podstawie pomierzonych częstotliwości wygenerowano dziesięciokrotnie więcej wzorców zaszumionych dla ramy bez uszkodzenia (230 wzorców) i pięciokrotnie więcej wzorców dla ramy uszkodzonej (325 wzorców) (dla zwiększenia udziału wzorców bez uszkodzenia w ogólnej puli wzorców uczących). Analiza zmian wartości częstotliwości pozwoliła na określenie przedziałów przedstawionych w Tabeli 1. Zaszumienie danych wykonano poprzez losowy wybór wartości częstotliwości z odpowiedniego przedziału zmienności. Oryginalne wzorce nie były używane do uczenia. Testowanie sieci odbywało się nadal na pełnym zbiorze 88 wzorców z pomiarów. Rys. 6. przedstawia wyniki testowania dla sieci uczonej na wzorcach zaszumionych. Niestety proces sztucznego zwiększenia liczby wzorców nie poprawił rezultatów otrzymanych poprzednio, gdyż udział

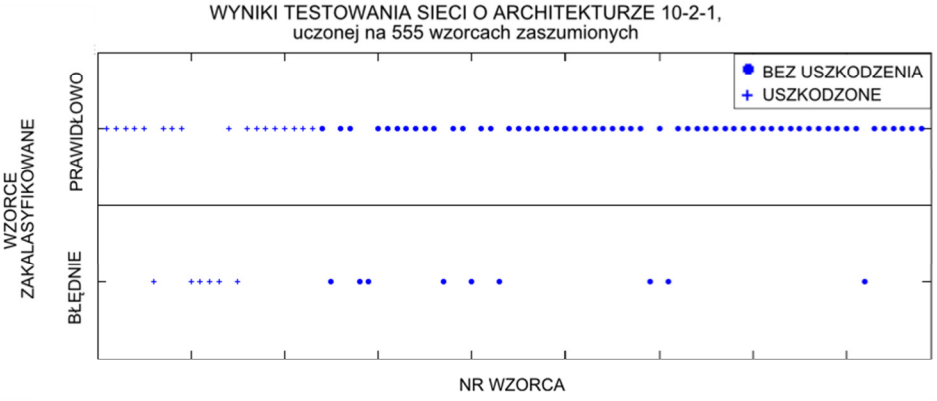



Rys. 5. Wyniki testowania sieci o architekturze 10-5-1, uczenie i testowanie na pełnym zbiorze wzorców

Fig. 5. Testing results of artificial neural network with architecture 10-5-1, learning and testing with using full set of patterns

wzorców błędnie zaklasyfikowanych nadal pozostał na poziomie 17%. Jedyna korzyść takiego postępowania polega na bardziej obiektywnym testowaniu sieci, ponieważ wzorce użyte do testowania nie były uprzednio wykorzystane do uczenia.

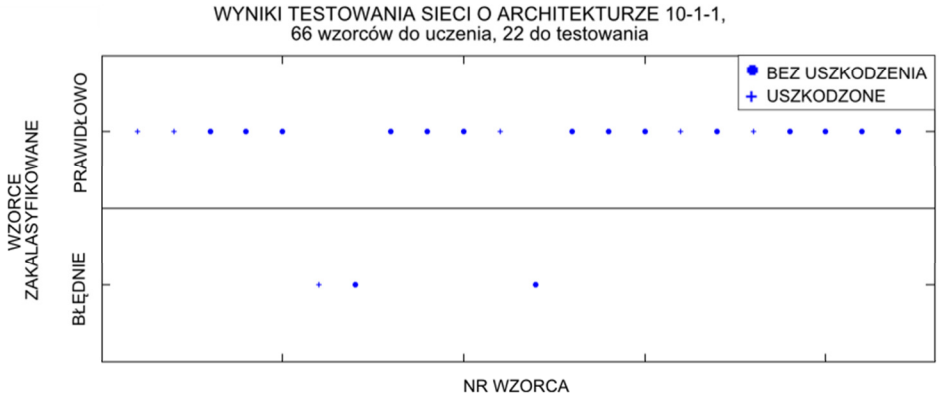
Ponieważ zaszumianie danych nie poprawiło znacząco wyników testowania sieci powrócono do wzorców bez zaszumienia. Zbiór podzielono w stosunku 3:1 na zbiór uczący (66 wzorców) oraz testujący (22 wzorce). Wzorce wybierano




Rys. 6. Wyniki testowania sieci o architekturze 10-2-1, uczenie na wzorcach zaszumionych, testowanie na wzorcach z pomiarów

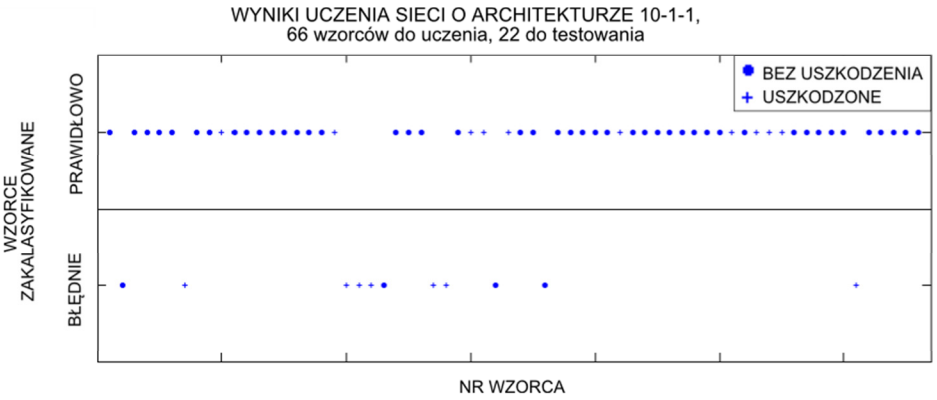
Fig. 6. Testing results of artificial neural network with architecture 10-2-1, learning with set of noisy patterns, testing with using full set of measurement patterns

w sposób losowy. Uczono i testowano sieci o 10 neuronach wejściowych (odpowiadających 10 częstotliwościom drgań) oraz zmiennej liczbie neuronów w warstwie ukrytej. Najlepsze wyniki dla jednego z podziałów przedstawiono na Rys. 7 i 8. Błędnie zaklasyfikowane wzorce stanowiły 14% wzorców testujących i 16% wszystkich wzorców.




Rys. 7. Wyniki testowania sieci o architekturze 10-1-1, 75%wzorców uczących i 25% wzorców testujących

Fig. 7. Testing results of artificial neural network with architecture 10-1-1, learning: 75% of patterns, testing: 25% of patterns

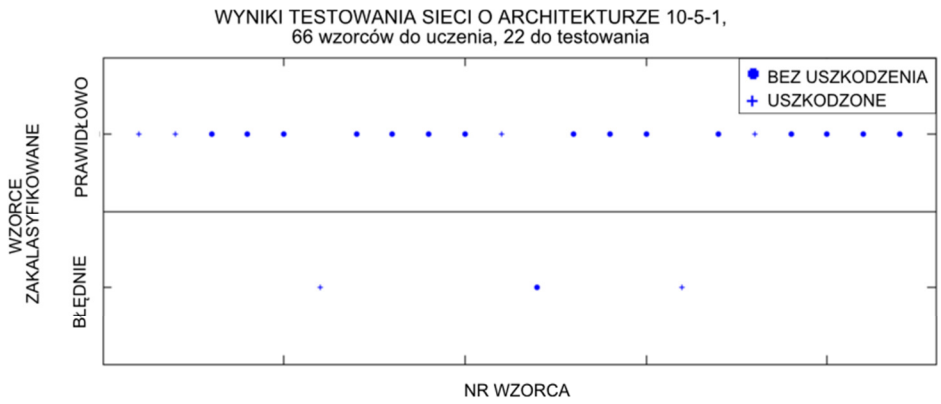



Rys. 8. Wyniki uczenia sieci o architekturze 10-1-1, 75%wzorców uczących i 25% wzorców testujących

Fig. 8. Learning results of artificial neural network with architecture 10-1-1, learning: 75% of patterns, testing: 25% of patterns

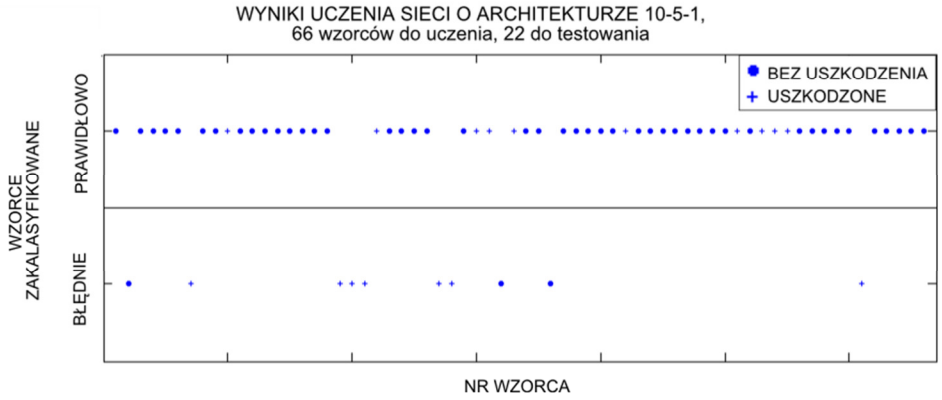
### 3.3. Detekcja uszkodzeń na podstawie częstotliwości i form

Kolejną próbą poprawienia wyników działania sieci było wykorzystanie informacji o postaci drgań. W trakcie pomiarów wyznaczono formy drgań odpowiadające każdej częstotliwości. Każdą formę opisywał wektor składający się z 12 wartości przemieszczeń w punktach pomiarowych. Formy znormalizowano, jednak ze względu na dużą ilość danych (dla każdej sytuacji pomiarowej informacja o dziesięciu postaciach drgań składała się ze 120 wartości) zastosowano analizę składników głównych (Principal Component Analysis, PCA), a następnie otrzymane w jej wyniku składniki główne w ilości pierwszych dwóch do pięciu stanowiły dodatkową informację dla sieci neuronowych. Uczenie i testowanie odbywało się na wzorcach oryginalnych (bez zaszumienia), które podzielono w sposób losowy w stosunku 3:1 (75% wzorców do uczenia i 25% do testowania). Analizowano sieci o różnej architekturze, przy zmiennej liczbie parametrów wejściowych, z których pierwsze pięć do dziesięciu odpowiadało kolejnym częstotliwościom, a następne dwa do pięciu składnikom głównym z form. Liczbę neuronów w warstwie ukrytej ograniczono tak, aby liczba wzorców uczących nie była mniejsza od liczby parametrów sieci. Najlepszy wynik dla podziału na zbiory jak w punkcie 3.1 otrzymano dla 5 częstotliwości i 5 składników głównych, gdzie wzorce błędnie zaklasyfikowane stanowiły 14% wzorców testujących (Rys. 9) oraz 15% wszystkich wzorców (łącznie, w tym: dla uczenia (Rys. 10) i testowania (Rys. 9)).




Rys. 9. Wyniki testowania sieci o architekturze 10-5-1, na wejściu 5 częstotliwości i 5 składników głównych z form

Fig. 9. Testing results of artificial neural network with architecture 10-5-1, input: 5 modal frequencies and 5 principal components




Rys. 10. Wyniki uczenia sieci o architekturze 10-5-1, na wejściu 5 częstotliwości i 5 składników głównych z form

Fig. 10. Learning results of artificial neural network with architecture 10-5-1, input: 5 modal frequencies and 5 principal components

## 4. Wnioski

Sztuczne sieci neuronowe mogą być wykorzystane do klasyfikacji wzorców. Otrzymane rezultaty pozwalają na poziomie 83% - 85% poprawnie określić, czy dana konstrukcja została uszkodzona czy nie i stanowią punkt wyjścia dla poszukiwania lepszych rozwiązań. Trwają prace nad oceną możliwości poprawy wyników dzięki zastosowaniu sieci innego rodzaju niż prezentowane w artykule. Jednocześnie, ze względu na znaczne rozbieżności wyników pomiarów, sprawdzenia wymagają również dane pomiarowe. Planowane jest ponowne wykonanie badań modelu fizycznego.

## Podziękowania

Program MATLAB wykorzystany do przeprowadzenia badań został zakupiony w wyniku realizacji Projektu nr UDA-RPPK.01.03.00-18-003/10-00 „Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej" współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Programu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013, Priorytet I. Konkurencyjna i Innowacyjna Gospodarka, Działanie 1.3 Regionalny system innowacji.

Do badań wykorzystano aparaturę zakupioną w projekcie nr POPW.01.03.00-18-012/09 z Funduszy Strukturalnych w ramach Programu Operacyjnego Rozwój Polski Wschodniej współfinansowanego przez Unię Europejską ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego.

## Literatura

[1] Lewandowski R.:, Dynamika konstrukcji budowlanych, Politechnika Poznańska, Poznań 2006.

[2] Wilde K.: Modal Diagnostics Of Civil Engineering Structures, Gdańsk University Of Technology Publishers, Gdańsk 2008.

[3] Waszczyszyn Z.: Artificial neural networks in civil engineering: another five years of research in Poland, Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, nr 18, 2011, s. 131-146.

[4] Nazarko P., Ziemiański L.: Application of artificial neural networks in the damage identification of structural elements, Computer Assisted Mechanics and Engineering Sciences, nr 18, 2011, s. 175-189.

[5] LMS Test.Lab, The LMS Test.Lab Spectral Testing manual, LMS International 2009.

[6] Haykin S.: Neural Networks: a Comprehensive Foundation, Prentice Hall International, Inc., 2nd ed., 1999.

## DAMAGE DETECTION ON THE EXAMPLE OF TWO-STOREY PORTAL FRAME WITH USING ARTIFICIAL NEURAL NETWORK

**S u m m a r y**

Detection of structural damage is one of the elements of structural health monitoring, a rapidly developing area aimed at improving the reliability and minimize the construction maintenance costs. The article presents the results of damage detection of a steel, two-storey portal frame using dynamic parameters analysis (modal frequencies and forms). Considerations, based on the measurement data, were obtained for various kinds of beam-to-column connection failure. As a tool for classification feed-forward backpropagation neural networks with one hidden layer were used. The paper presents the results obtained from neural networks of various architectures and with varying division into learning and testing data sets.

**Keywords:** structural health monitoring (SHM), artificial neural networks

DOI:10.7862/rb.2016.242

*Przesłano do redakcji: 17.08.2016 r.*
*Przyjęto do druku: 30.11.2016 r.*

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*: 63(4/16) 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/

Zasady recenzowania, informacje dla autorów, formularz recenzji, instrukcja dla autorów i dane kontaktowe do redakcji czasopisma i wydawcy będą również opublikowane w czwartym numerze *Czasopisma Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, z. 63 (4/2016).

Nakład 120 egz. Ark. wyd. 40,46. Ark. druk. 36,75. Papier offset. 80g B1.
Oddano do druku w grudniu 2016 r. Wydrukowano w lutym 2017 r.
Drukarnia Oficyny Wydawniczej, al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów
Zam. nr 128/16