

JCEEA

---

Czasopismo  
Inżynierii Lądowej,  
Środowiska  
i Architektury

---

Journal of Civil  
Engineering,  
Environment  
and Architecture

---

Kwartalnik  
tom XXXI  
zeszyt 61 (nr 3/II/2014)  
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 Številová (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 Kvočák (Słowacja)  
prof. Zinoviy Blikharskyy (Ukraina), prof. Tomasz Winnicki (Polska)  
prof. Czesława Rosik-Dulewska (Polska), prof. Krzysztof Knapik (Polska)  
prof. Janusz A. Tomaszek (Polska), prof. Jerzy Ziółko (Polska)  
prof. Ryszard L. Kowalczyk (Polska), prof. Stanisław Kuś (Polska)

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

*redaktor naczelny*

dr hab. inż. Piotr KOSZELNIK, prof. PRz

*redaktorzy tematyczni (naukowi)*

prof. dr hab. inż. Aleksander KOZŁOWSKI, prof. dr hab. inż. Janusz RAK

*redaktor statystyczny*

dr hab. inż. Szczepan WOLIŃSKI, prof. PRz

*sekretarz redakcji*

dr inż. Katarzyna PIETRUCHA-URBANIK

*członkowie*

dr inż. Renata GRUCA-ROKOSZ, dr inż. arch. Anna SIKORA

dr inż. Zdzisław PISAREK, dr inż. Lucjan ŚLĘCZKA

**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 i Inżynierii Środowiska,  
al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, [www.oficyna.portal.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/](http://www.oficyna.portal.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/) (e-mail: [kpier@prz.edu.pl](mailto:kpier@prz.edu.pl))

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

Informacje dodatkowe i stopka – str. 565



## SPIS TREŚCI

Jolanta ADAMCZYK, Radosław KURZYP: Wykorzystanie odłogów w krajobrazie rolniczym w planowaniu architektury ekologicznej .....	9
Jerzy BAKALARCZYK: Przekształtniki energoelektroniczne w instalacjach fotowoltaicznych.....	19
Krzysztof BARAN, Marcin LEŚKO, Henryk WACHTA: Hybrydowe systemy oświetlenia drogowego.....	33
Małgorzata BASIŃSKA, Halina KOCZYK: Ocena energetyczna doświadczalnego budynku pasywnego.....	43
Michał BASZEŃ: Wykorzystanie nietypowych materiałów i technologii w budynkach i obiektach o konstrukcji drewnianej .....	55
Wojciech BIALIK, Stanisław GIL, Piotr MOCEK, Bogusław GRADOŃ, Bolesław MACHULEC, Józef OCHMAN: Ograniczenie skutków emisji ditlenku węgla przy wykorzystaniu naturalnej sekwestracji .....	65
Artur BOROWCZYŃSKI, Dariusz HEIM: Porównanie efektywności energetycznej budynków z wybranymi systemami sterowania instalacją ogrzewczą.....	73
Piotr CIERZNIEWSKI, Karolina KURTZ-ORECKA: Wybrane zagadnienia projektowania efektywnego energetycznie oświetlenia wbudowanego w pomieszczeniach biurowych .....	83
Krzysztof CZECH, Wojciech GOSK: Wpływ sposobu mocowania akcelerometrów na gruncie na wiarygodność oceny komfortu wibracyjnego .....	93
Aneta M. CZECHOWSKA-KOSACKA, Robert KOSACKI, Daniel BANCER, Jan M. OLCHOWIK: Zastosowanie osadów ściekowych jako komponentu paliwa alternatywnego .....	103

Bernardeta DEBSKA, Lech LICHOLAŁAI: Badania nad wykorzystaniem modyfikowanych żywic epoksydowych jako głównego składnika klejów stosowanych w budownictwie.....	113
Jolanta FIEDUCIK, Adam GAWROŃSKI, Ryszard MATUSZCZAK: Osady ściekowe i ich utylizacja w przedsiębiorstwie wodociągów i kanalizacji w Olsztynie.....	121
Jolanta FIEDUCIK, Jan GODLEWSKI: Analiza możliwości wykorzystania słonecznych kolektorów powietrznych do ogrzewania domów jednorodzinnych oraz podgrzewania wody .....	133
Diana FIJAŁKOWSKA, Leszek STYSZKO: Wpływ sezonowania wierzby pozyskanej różnymi technologiami na wartość opałową biomasy.....	143
Halina GARBALIŃSKA, Magdalena BOCHENEK: Popowodziowe wysychanie przegród wykonanych z betonu komórkowego i zachodzące zmiany przewodności cieplnej.....	155
Halina GARBALIŃSKA, Linda CEDERHOLM: Współczynnik sorpcji betonu komórkowego badany na próbkach suszonych i niesuszonych.....	163
Wojciech GORYL, Adam GUŁA: Analiza potencjału biomasy rolniczej na przykładzie typowej gminy w celu stworzenia lokalnego rynku biomasy .....	173
Marek GOSZTYŁA, Tomasz HUK: Rekonstrukcja czy imitacja domu Sokoła w Łąncucie .....	183
Tomasz GRUDNIEWSKI, Sławomir CZERNIK, Zofia LUBAŃSKA, Roman LICHOGRAJ, Piotr LICHOGRAJ: Próba modyfikacji własności warstw otrzymywanych w procesie sputteringu magnetronowego z wykorzystaniem elementów sterowanych zewnątrznie .....	195
Sławomir GUŁKOWSKI: Modelowanie charakterystyk I-V ogniw słonecznych w środowisku Matlab/Simulink.....	203

Marek HAJTO: Zasoby i możliwości zagospodarowania wód termalnych w rejonie Pogórza Środkowobeskidzkiego, Beskidu Środkowego oraz Beskidu Lesistego .....	209
Arkadiusz JAMROZIK, Adam GŁUSZEK, Arkadiusz OLEJNIK: Nowoczesne metody magazynowania energii.....	227
Marcin KACZMARZYK: Ocena efektywności izolacyjno-akumulacyjnej przegród zewnętrznych .....	237
Marek KAMIENIARZ: Unikatowa budowla kurhanu w kształcie kopuły....	251
Michał KOŁACZKOWSKI: Aktualne wymagania konstrukcyjne dotyczące podkładów w podłogach pływających w aspekcie błędów projektowych i wykonawczych .....	261
Janusz KONKOL, Grzegorz PROKOPSKI: Fraktalny opis powierzchni przełomu betonów cementowych.....	273
Janusz KONKOL, Marcin PYRA: Wybrane właściwości betonów modyfikowanych zmiennym udziałem dodatku metakaolinitu..	287
Joanna KRASOŃ: Możliwości zastosowania materiałów zmiennofazowych w pasywnych rozwiązaniach ściennych elementów murowych.	297
Joanna KRASOŃ, Lech LICHOŁAI: Określenie wpływu impulsów termicznych na wewnętrzne zmiany temperaturowe w elementach silikatowych zmodyfikowanych materiałem zmiennofazowym .....	307
Ewelina KRAWCZAK, Sławomir GUŁKOWSKI, Jan M. OLCHOWIK: Badanie efektywności pracy fotowoltaicznego systemu „off-grid” w warunkach zimowo - wiosennych dla Lubelszczyzny.....	317
Zofia LUBAŃSKA, Tomasz GRUDNIEWSKI: Analiza właściwości struktur otrzymanych w procesie nanoszenia warstw metodą sputteringu magnetronowego z wykorzystaniem targetów o modyfikowanym składzie.....	329
Michał MARCHACZ, Leszek DULAK: Badania akustyczne wnętrza zabytkowego kościoła pw. Wszystkich Świętych w Sierotach.....	339

Andrzej MARECKI: Problemy formalne, architektoniczne i konstrukcyjne remontów zabytkowych miejskich mostów drogowych .....	347
Adam MROZIŃSKI: Badanie efektywności energetycznej laboratoryjnej instalacji fotowoltaicznej .....	357
Michał MUSIAŁ: Rewaloryzacyjne możliwości zwiększenia kubatury mieszkalnej zabytkowego budynku mieszkalnego.....	367
Krzysztof NOWAK: Współspalanie biomasy z węglem w kotłach energetycznych .....	379
Katarzyna NOWAK-DZIESZKO, Małgorzata ROJEWSKA-WARCHAŁ, Jacek DĘBOWSKI: Mostki termiczne w budynkach wielkopłytowych przed i po dociepleniu.....	391
Sebastian PATER, Krzysztof NEUPAUER, Barbara LARWA: Efektywność energetyczna kolektorów słonecznych wykorzystujących wodę jako płyn solarny.....	401
Janusz PEŁCZYŃSKI, Bartłomiej TOMKOWICZ: Zagadnienia etapu wstępnego zmiany sposobu użytkowania strychów w strefie śródmiejskiej na cele mieszkalne na przykładzie wybranych kamienic w Rzeszowie .....	411
Marta PISAREK, Marta GARGAŁA: Rośliny energetyczne jako kreatorzy krajobrazu.....	423
Sławomir RABCZAK, Danuta PROSZAK-MIĄSIK, Krzysztof NOWAK: Wykorzystanie systemu free-cooling w klimatyzacji.....	433
Sławomir RABCZAK, Danuta PROSZAK-MIĄSIK, Krzysztof NOWAK: Koncepcja pompy ciepła ze skraplaczem dwuczłonowym .....	443
Henryk RÓŻAŃSKI, Krzysztof JABŁOŃSKI: Technologie pozyskiwania biomasy leśnej na cele energetyczne .....	453
Elżbieta RYBAK-WILUSZ, Vyacheslav PISAREV, Paulina SAWICKA: Urządzenia zintegrowanych systemów zaopatrzenia w energię budynku zamieszkania zbiorowego .....	459

Adam RYBKA, Michał KRUPA: Kierunki projektowania niewielkich obiektów o funkcji teatralnej na przykładzie nowej siedziby Teatru Lalek w Rabce-Zdroju .....	469
Agata SIWIŃSKA: Wpływ wilgotności względnej powietrza na sorpcyjne zawilgocenie materiałów budowlanych .....	479
Ryszard SKIBA, Teresa ZYCH: Nowoczesne materiały i technologie do wykonywania podłóg przemysłowych .....	489
Izabela SKRZYPCZAK, Lidia BUDA-OŻÓG, Marta SŁOWIK: Projektowanie elementów żelbetowych z założoną niezawodnością .....	503
Robert TOMASZEWSKI, Jan M. OLCHOWIK, Jerzy ADAMCZYK: Badania nad efektywnością konwersji fotowoltaicznej (PV) dla warunków Lubelszczyzny .....	511
Henryk WACHTA, Krzysztof BARAN, Marcin LEŚKO: Iluminacyjne, bezprzewodowe oświetlenie dynamiczne.....	521
Anna ZASTAWNA-RUMIN, Kinga ZĘBALA: Izolacyjność akustyczna ścian w salkach do prób w szkole muzycznej .....	531
Agata ZDYB, Piotr LICHOGRAJ: Analiza morfologii elektrod stosowanych w barwnikowych ogniwach słonecznych .....	541
Kinga ZĘBALA: Kompensacja mocy biernej sposobem na obniżenie rachunków za energię elektryczną.....	547
Agnieszka ŻELAZNA, Agata ZDYB, Artur PAWŁOWSKI: Porównanie wybranych paneli fotowoltaicznych na podstawie bilansu materiałowo-energetycznego w ich cyklu życia .....	557

Jolanta ADAMCZYK<sup>1</sup>  
Radosław KURZYP<sup>2</sup>

## WYKORZYSTANIE ODŁOGÓW W KRAJOBRAZIE ROLNICZYM W PLANOWANIU ARCHITEKTURY EKOLOGICZNEJ

Architektura ekologiczna powstała w wyniku zjawiska silnego niszczenia środowiska przyrodniczego. Taka architektura pod koniec 20. wieku, przede wszystkim kładła nacisk na ideę połączenia przestrzeni przekształconej przez człowieka z naturalną przestrzenią przyrodniczą. W Polsce, w wyniku przemian politycznych i gospodarczych, jakie nastąpiły w końcu lat 80. i 90. XX wieku, pojawiło się w krajobrazie rolniczym dużo powierzchni odłogów, które ulegają spontanicznej sukcesji wtórnej, prowadzącej do powstawania licznych zbiorowisk roślinnych. Rola ekologiczna odłogów nie jest jeszcze w pełni poznana. Celem niniejszej pracy było określenie znaczenia ekologicznego odłogów oraz ocena możliwości wykorzystywania ich w planowaniu architektury ekologicznej. Obserwacje odłogów były prowadzone w latach 2012-2013 w strefach otaczających wszystkie parki krajobrazowe w województwie łódzkim. Do analizy danych zastosowano hierarchiczną analizę skupień metodą War. Dla oceny preferencji gatunków roślin do wyodrębnionych klastrow (prezentujących określone warunki środowiska) zastosowano zaproponowany przez Dufrene i Legendre indeks IndVal. Badania roślinności odłogów wyodrębniły 3 główne grupy strukturalne zbiorowisk roślinnych. We florze odłogów nie zanotowano chronionych, zagrożonych lub rzadkich gatunków roślin. Obserwowane odłogi nie stanowią zatem ostoi dla takich gatunków. Mimo to, niektóre wyodrębnione grupy odłogów mogą pełnić ważną rolę w ochronie różnorodności biologicznej i przemieszczaniu się organizmów. Powinny one pozostać bez ingerencji człowieka. Pozostałe, a zwłaszcza te porośnięte roślinnością z obcego pochodzenia, inwazyjnymi gatunkami roślin mogą być wykorzystywane w budownictwie ekologicznym, bez znaczących strat dla przyrody.

**Słowa kluczowe:** grunty porolne, sukcesja wtórna, krajobraz kulturowy, parki krajobrazowe, budownictwo ekologiczne

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Jolanta Adamczyk, Społeczna Akademia Nauk w Łodzi, ul. Sienkiewicza 9, 90-113 Łódź, tel. kom. 883 190 845, e-mail: adamta4@gmail.com

<sup>2</sup> Radosław Kurzyp, ul. Bajana 8a, 94-239 Łódź, e-mail: rk@plusart.pl, radek@kurzyp.com

## 1. Wstęp

Współczesna cywilizacja zagrażająca środowisku przyrodniczemu stawia przed architekturą nowe wyzwania. Architekci stanęli wobec nowego zjawiska – potrzeby działań nacechowanych wrażliwością ekologiczną [9]. Architektura ekologiczna powinna jak najmniej szkodzić środowisku, zarówno poprzez stosowanie przyjaznych dla środowiska surowców budowlanych, formę oraz wykorzystanie przestrzeni. Potrzeba czynnej ochrony przyrody często ogranicza możliwości architektury. Takie ograniczenie jest konieczne dla zachowania naturalnych lub półnaturalnych ekosystemów. Mimo to, w ekologii przyjmuje się, że środowisko naturalne człowieka to pełny zakres warunków zewnętrznych: fizycznych, biotycznych i kulturowych, do których zaadaptowany jest człowiek jako gatunek [19]. Architektura jest zatem nieodłącznym elementem środowiska człowieka. Problemem jest, jak planować współczesną architekturę w przestrzeni, aby nie szkodziła przyrodzie oraz była estetyczna i funkcjonalna.

Przemiany gospodarcze, jakie dokonały się w naszym kraju w ostatnich 20 latach, spowodowały, że duże obszary zajmowane poprzednio przez rolnictwo nie są już wykorzystywane pod uprawy i stanowią odłogi. Powierzchnie odłogów w Polsce wciąż się powiększają [7] w wyniku nieopłacalności upraw na glebach o niskiej żyzności, struktury własności gruntów oraz zmian w sferze wiekowej i zawodowej ludności wiejskiej. Nie ma przyjętego, jednolitego pojęcia odłogów. Na ogół, za odłogi uważa się grunty porolne pozostawione bez ingerencji człowieka przez wiele lat [5]. W tradycyjnym rozumieniu zakres znaczeniowy terminu „odłóg” odnosi się wyłącznie do nieużytkowanych gruntów ornych. Brakuje odpowiednich określeń dla łąk i pastwisk, które nie były koszone lub wypasane. Jednak długotrwały brak gospodarowania na takich siedliskach powoduje podobne następstwa – postępujący proces zarastania [14]. Odłogi nie poddane zalesieniu lub innej formie zagospodarowania narażone są na zarastanie chwastami, a także na zasiedlenie przez tzw. inwazyjne gatunki roślin. Stanowi to duże niebezpieczeństwo dla pobliskich, naturalnych ekosystemów, ponieważ gatunki inwazyjne, zwłaszcza obcego pochodzenia, jak np. nawłóć kanadyjska *Solidago canadensis*, niecierpek wielkokwiatowy *Impatiens glandulifera*, czeremcha amerykańska *Padus serotina* czy klon jesionolistny *Acer negundo* rosną nawet w złych warunkach siedliskowych i szybko rozprzestrzeniają się na duże odległości. Obecność gatunków inwazyjnych obserwuje się w Polsce i innych krajach Europy w różnych obiektach chronionych, co stanowi duży problem, ponieważ zaczynają one wypierać z naturalnych zbiorowisk roślinnych rodzime gatunki flory [8].

Celem niniejszej pracy było: 1) określenie ekologicznego znaczenia wybranych odłogów w strefach otaczających parki krajobrazowe w województwie łódzkim, 2) ocena możliwości wykorzystania odłogów w planowaniu budownictwa ekologicznego w krajobrazie rolniczym.

## 2. Materiał i metody

Obserwacje terenowe wykonano w latach 2012 i 2013. Odłogi wybrano w strefach otaczających wszystkie parki krajobrazowe na terenie woj. łódzkiego: Bolimowski PK, PK Międzyrzecza Warty i Widawki, Przedborski PK, Spalski PK, Sulejowski PK, Załęczański PK, PK Wzniesień Łódzkich. Na obszarach odłogów wyznaczono 7 transektów pasowych. Każdy transekt podzielono na 5-6 powierzchni (100 m × 100 m). Powierzchnie odłogów identyfikowane były początkowo w oparciu o ortofotomapy w skali 1:10 000 (nalot z 2009 r.), następnie weryfikowane i ostatecznie wyznaczone w terenie. Każda powierzchnia obserwacyjna została dokładnie oznaczona pod względem położenia przy pomocy GPS. Na powierzchniach wykonano profile glebowe oraz pobrano próby glebowe do analiz chemicznych. Wykonano dokumentację fotograficzną powierzchni. Każda powierzchnia została zinwentaryzowana pod względem aktualnie występującej na niej roślinności. Dane z obserwacji zostały opracowane z zastosowaniem hierarchicznej analizy zgrupowań metodą Warda [18] oraz zaproponowanego przez Dufrene i Legendre indeksu IndVal [3].

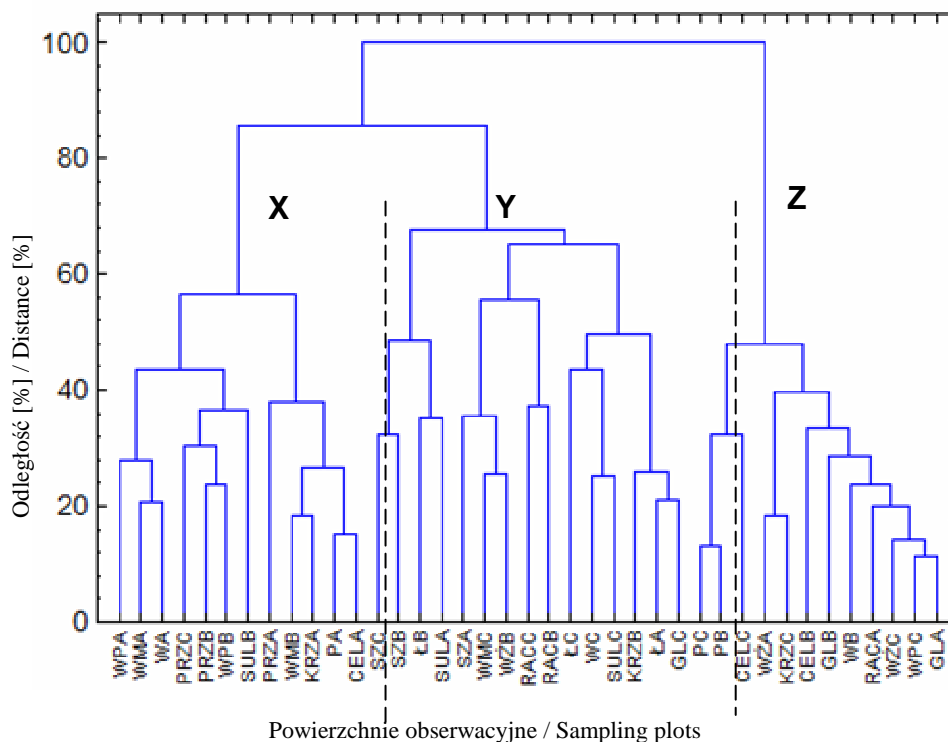
Nomenklaturę gatunków roślin podano za Mirkiem i in. [16].

## 3. Wyniki

### 3.1. Ocena ekologicznego znaczenia zbiorowisk roślinnych na odłogach

Na badanych odłogach, stosując hierarchiczną analizę zgrupowań metodą Warda, wyodrębniono 3 główne grupy strukturalne zbiorowisk roślinnych (Ryc.1). Dodatkowo zastosowanie indeksu IndVal pozwoliło na określenie preferencji gatunków roślin dla określonej grupy zbiorowisk (Tabela 1). Pierwszą grupę roślinności można określić jako zbiorowiska traw. Najwyższy IndVal osiągały w nich dwa gatunki: tomka oścista *Anthoxanthum aristatum* i szczotlika siwa *Corynephorus canescens* (klaster X). Kolejna grupa, to zbiorowiska o bogatszej florze. Preferowały je dość liczne gatunki roślin łąkowych, leśnych i murawowych. Istotny IndVal osiągnęło w tych zbiorowiskach 5 gatunków: szarota leśna *Gnaphalium sylvaticum*, ostrożeń łąkowy *Cirsium arvense*, przytulia pospolita *Galium mollugo*, trzcinnik piaskowy *Calamagrostis epigeois* oraz brzoza brodawkowata *Betula pendula* (klaster Y). Ostatnia wyodrębniona grupa zbiorowisk to fitocenozy raczej ubogie florystycznie, w których gatunkami o istotnym IndVal były: jastrzębiec kosmaczek *Hieracium pilosella*, miętlica pospolita *Agrostis capillaris* oraz krwawnik pospolity *Achillea millefolium* (klaster Z). W analizie statystycznej nie wydzieliła się wyraźnie, ze względu na małą liczbę powierzchni obserwacyjnych grupa odłogów pozbawionych roślin, pokrytych zwartą warstwą porostów z rodzaju chrobotek *Cladonia*.





Rys.1. Klasyfikacja powierzchni obserwacyjnych (hierarchiczna analiza zgrupowań, odległość Euklidesowa, metoda Warda)

Ryc.1. Classification of sampling plots (hierarchical cluster analysis, Euclidean distance, Ward method)

Oceniając znaczenie ekologiczne badanych odłogów, trzeba brać pod uwagę typ roślinności, jak i obecność chronionych prawnie, zagrożonych i rzadkich w skali kraju lub regionu gatunków roślin. Na odłogach, na których zanotowano łącznie 140 roślin naczyniowych, nie stwierdzono cennych z tego punktu widzenia gatunków roślin, poza podlegającymi częściowej ochronie kocankami piaszkowymi *Chelichrysum arenaria*.

Wśród roślinności odłogów, znaczenie dla zachowania różnorodności biologicznej mogą mieć zbiorowiska grupy drugiej (klaster Y). Są to fitocenozy z dość dobrze wykształconą warstwą młodych drzew, o bogatej florze. Mogą stanowić ostoje licznych gatunków roślin oraz tworzyć naturalne korytarze ekologiczne, co jest istotne przyrodniczo, w krajobrazie rolniczym o znacznej fragmentacji siedlisk. Także odłogi porośnięte porostami mają znaczącą wartość ekologiczną, ponieważ stanowią refugium dla tych zagrożonych organizmów. Grupa siedlisk opanowanych przez dwa gatunki traw: szczerbikę siewną *Corynephorus canescens* i tomkę ościstą *Anthoxanthum aristatum* (klaster X) może

hamować zasiedlanie odłogów innymi gatunkami roślin. Gatunki te wykazują duże przywiązanie do mogą do tego typu siedlisk (Tabela 1.). Trudna do zinterpretowania jest rola odłogów grupy trzeciej (klaster Z). Występujące tam zbiorowiska są raczej ubogie florystycznie, ale zarastają młodymi sosnami, co sugeruje prawidłowy kierunek ich sukcesji w stronę zbiorowisk leśnych. Należy je uznać raczej za potencjalnie cenne przyrodniczo.

Tabela 1. Względne pokrycie (P), względna częstość (F) i wartość IndVal (I) (wszystkie w %) w poszczególnych klasternach (dla gatunków związanych z którymkolwiek klastrem na poziomie  $p < 0,1$ ). Istotnie ( $p \leq 0,05$ ) najwyższa wartość IndVal dla danego gatunku została pogrubiona i podkreślona

Table 1. Relative cover (P), relative frequency (F) and indicator value IndVal (I) (all in %) in particular cluster (for species associated with any cluster at  $p < 0,1$ ). The significantly (at  $p \leq 0,05$ ) highest IndVals are bolded and underlined

Klaster / Cluster	<i>Ahtoxantium odoratumari</i>	<i>Corynephorus canescens</i>	<i>Bryum sp.</i>	<i>Gnaphalium sylvaticum</i>	<i>Cirsium arvense</i>	<i>Galium mollugo</i>	<i>Carex leporina</i>	<i>Betula pendula</i>	<i>Poa pratensis</i>	<i>Senecio jacobea</i>	<i>Solidago canadensis</i>	<i>Hieracium pilosella</i>	<i>Agrostis capillaris</i>	<i>Achillea millefolium</i>	<i>Festuca rubra</i>	<i>Jasione montana</i>	
p	0.0028	0.0055	0.0482	0.0008	0.0094	0.0104	0.0166	0.0334	0.0896	0.0945	0.0964	0.0011	0.0046	0.0268	0.0869	0.0982	
X	P	100	87	100	0	0	0	0	0	0	1	31	0	7	4	20	
	F	42	58	25	0	0	0	0	0	0	8	75	17	25	8	50	
	I	<b><u>42</u></b>	<b><u>51</u></b>	<b><u>25</u></b>	0	0	0	0	0	0	0	23	0	2	0	10	
Y	P	0	0	0	100	100	85	100	94	85	77	96	7	42	44	28	29
	F	0	0	0	33	40	40	40	47	47	47	33	60	60	40	20	20
	I	0	0	0	<b><u>33</u></b>	<b><u>40</u></b>	<b><u>34</u></b>	<b><u>40</u></b>	<b><u>44</u></b>	40	36	32	4	25	17	6	6
Z	P	0	13	0	0	0	15	0	6	15	23	3	61	57	49	68	50
	F	0	42	0	0	0	8	8	25	42	50	17	100	100	92	42	83
	I	0	5	0	0	0	1	0	2	6	11	0	<b><u>61</u></b>	<b><u>57</u></b>	<b><u>45</u></b>	28	42

### 3.2. Możliwość wykorzystanie odłogów w architekturze ekologicznej

Z wyodrębnionych grup roślinności odłogów, do wykorzystania w celach architektonicznych można zaproponować odłogi porośnięte jedynie dwoma gatunkami traw (klaster X), ponieważ reprezentują one niskie walory przyrodnicze. Silne preferowanie tych siedlisk przez trawy może zahamować naturalne procesy sukcesji. Podobne siedliska, zdominowane przez jeden gatunek trawy-trzcinnika piaskowego *Calamagrostis epigeois* występowały też, choć w niewielkiej ilości w grupie drugiej (klaster Y). Trzcinnik piaskowy rozwija silne rozłogi i utrudnia osiedlanie się innych gatunków roślin. Takie siedliska można także traktować jako mało wartościowe i przeznaczać na cele budownictwa ekologicznego. Najmniej wartościową przyrodniczo grupę stanowią odłogi porośnięte głównie przez nawłóć kanadyjską *Solidago canadensis*. Gatunek ten na odłogach, gdzie występował osiągał także istotny IndVal (Tabela 1), co wskazuje, że jest on silnie przywiązany do tych siedlisk i będzie konkurencyjny dla gatunków rodzimego pochodzenia. Tego typu odłogi powinny być szybko wykorzystywane gospodarczo, aby zahamować rozprzestrzenianie się gatunków inwazyjnych. Wprowadzenie architektury ekologicznej jest w tym przypadku korzystniejszym rozwiązaniem, niż pozostawienie odłogów bez ingerencji człowieka. Budownictwo ekologiczne na takich siedliskach spowoduje pewne straty dla środowiska tylko na etapie inwestycji. Nowoczesne, energooszczędne i niskoemisyjne technologie stosowane w architekturze ekologicznej pozwolą na wkomponowanie jej harmonijnie w krajobraz rolniczy, bez niebezpieczeństwa dla sąsiednich obszarów o znacznych walorach przyrodniczych.

## 4. Dyskusja

Przyrodniczo krajobraz rolniczy charakteryzuje się przeważnie z użyciem modelu płatów i korytarzy (*matrix-patch-network model*) [15]. Obszary korzystne dla organizmów są określane jako płaty (np. wyspy leśne, nieużytki, oczka wodne). Otaczają je niekorzystne pola uprawne (tło). Natomiast miedze, drogi, marginesy pól stanowią sieć korytarzy (*networks*) [13]. Pełnią one rolę refugium wielu grup organizmów [2]. Stąd też, siedliska marginalne w krajobrazie rolniczym, takie jak: odłogi, drogi polne, miedze, budzą duże zainteresowanie przyrodników. Porzucone przez człowieka stają się obszarami „roślinności wyzwolonej”, gdyż mogą odzyskać pokrywą roślinną wskutek autonomicznego działania procesów ekologicznych [4]. Obserwacje botaniczne wskazują, że spontanicznie powstałe na odłogach zalesienia są bogatsze w gatunki, niż nasadzone monokultury drzew iglastych [17]. Siedliska takie uważa się za cenne z punktu widzenia ochrony przyrody, ponieważ zwiększają różnorodność biologiczną w krajobrazie rolniczym, powodują wzrost mozaikowości tego krajobrazu, przyczyniają się do powstawania naturalnych korytarzy ekologicz-

nych [11]. Płaty w krajobrazie rolniczym są często refugiami rzadkich i zagrożonych gatunków roślin [2]. Analizując zjawisko powstawania odłogów z punktu widzenia rolnictwa uzyskuje się inny obraz. Występowanie odłogów w sąsiedztwie pól uprawnych jest zjawiskiem niekorzystnym, ze względu na łatwość przechodzenia do upraw traw i chwastów, które dominują w pierwszych latach odłogowania [6]. Chwasty, oprócz konkurencji dla upraw sprzyjają rozprzestrzenianiu szkodników roślin uprawnych i mogą roznosić choroby wirusowe [10]. Ponadto, na odłogach zachodzą niekorzystne zmiany właściwości fizycznych gleb, wymywanie azotu, degradacja próchnicy oraz wzrost podatności na erozję wietrzną i wodną [1]. Współcześnie, jednym z problemów architektury ekologicznej jest wybór terenu do zabudowy. Presja ochrony przyrody powoduje, że na terenach sąsiadujących z obszarami chronionymi trudno jest zrealizować tego typu budownictwo. Tymczasem zasięg terenów najcenniejszych przyrodniczo (parków narodowych, rezerwatów) wynosi niespełna 2% obszaru Polski. Uzupełniając je o parki krajobrazowe, których walory są bardziej zróżnicowane, wynosi on łącznie 10% [12].

W niniejszej pracy wyznaczono obszary odłogów w bliskim sąsiedztwie parków krajobrazowych, które są siedliskami życia wielu prawnie chronionych, rzadkich, zagrożonych w skali kraju, bądź regionu gatunków roślin. Obserwacje flory odłogów miały dać odpowiedź, czy tereny te są „wyspami” dla takich gatunków roślin. Wśród zanotowanych gatunków roślin naczyniowych tylko jeden gatunek jest częściowo chroniony. Pozostałe gatunki to rośliny różnych siedlisk, ale pospolite. Na 15 powierzchniach odłogów stwierdzono występowanie gatunków roślin, które w Polsce i Europie uznawane są za inwazyjne. Były to: czeremcha amerykańska *Padus serotina* oraz nawłoc kanadyjska *Solidago canadensis*. Można przypuszczać, że obserwowane odłogi w Polsce środkowej tylko w niektórych przypadkach mogą pełnić istotną rolę ekologiczną. Daje to możliwość planowania na pozostałych typach odłogów budownictwa ekologicznego.

## Literatura

- [1] Biskupski A.: Agrotechniczne sposoby przywracania zdolności produkcyjnej glebom odłogowanym, *Studia i raporty IUNG-PIB*, 2007, z. 8, s. 193-206.
- [2] Czarnańska J.: Miedze Wołynia zachodniego jako siedliska rzadkich nawapiennych gatunków roślin, *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 2011, t. 11, nr. 2,34, s. 43-52.
- [3] Dufrene M., Legendre, P.: Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs*, 1997, nr 67, s. 345-356.
- [4] Faliński J.B.: Interpretacja współczesnych przemian roślinności na podstawie teorii synantropizacji i teorii syndynamiki, *Prace Geograficzne*, 2001, nr. 179, s. 31-52.
- [5] Flis J.: *Szkolny słownik geograficzny*. 1985.

- [6] Hamre L.N., Harvolson R., Edwardsen A., Rydgren K.: Planta species richness, composition and habitat specificity in a Norwegian agricultural landscape, *Agriculture Ecosystem and Environment*, 2010, 138, 3-4, s. 189-196.
- [7] Harkot W., Lipińska H., Wyłupek T.: Kierunki zmian użytkowania ziemi na tle naturalnych warunków rolniczych przestrzeni produkcyjnej Lubelszczyzny, *Acta Sci. Pol. Administratio Locorum*, 2011, nr 10,1, s. 5-16.
- [8] Hejda M., Pyšek P.: What is the impact of *Impatiens glandulifera* on species diversity of invaded riparian vegetation? *Biological Conservation*, 2006, s. 143-152.
- [9] Iwanek M.: w poszukiwaniu znaczenia architektury ekologicznej – ciągłość historyczna architektury współczesnej, *Teka Kom. Arch. Urb. Stu. Krajobr. – OL PAN*, 2009, s. 43-49.
- [10] Jaros S., Woch F.: Analiza przyczyn odłogowania gruntów rolnych w województwie świętokrzyskim na przykładzie gminy Kije, *Studia i Raporty IUNG-PIB*, 2010, z. 24, s. 25-49.
- [11] Jermaczek D.: Analiza rozmieszczenia i struktury zadrzewień powstałych na odłogowanych gruntach porolnych w okolicach Łagowa w latach 1990-2007, *Przegląd Przyrodniczy*, 2007, nr 18, s. 29-53.
- [12] Kistowski M.: Kolizje i konflikty środowiskowe w planowaniu przestrzennym na obszarach przyrodniczo cennych, *Czasopismo Techniczne Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej*, 2007, nr 7, s. 249-255.
- [13] Kleijn D., Verbeek M.: Factors affecting the species composition of arable field boundary vegetation, *Journal of Applied Ecology*, 2000, t. 32, nr. 2, s. 256-266.
- [14] Krysiak S.: Odłogi w krajobrazach Polski środkowej – aspekty przestrzenne, typologiczne i ekologiczne, *Problemy Ekologii Krajobrazu*, 2011, t.31, s. 89-96.
- [15] Marshall E.J.P.: Introducing fields margin ecology in Europe, *Agriculture Ecosystem and Environment*, 2002, 89, 1/2, s. 1-4.
- [16] Mirek Z., Piękoś-Mirkowa H., Zając A., Zając M.: Flowering plants and pteridophytes. A checklist, *Kraków, Inst. Bot. PAN*, 2002, s. 442.
- [17] Ratyńska H.: Wyspy środowiskowe jako element krajobrazu, próba typologii i różnicowanie szaty roślinnej [w:] *Wyspy środowiskowe . Bioróżnorodność i próby typologii*. J. Banaszak (red.), Bydgoszcz, 2002, s. 239-260.
- [18] Ward J., H.: Hierarchical Grouping to optimize an objective function, *Journal of American Statistical Association*, 1963, nr 58,301, s. 236-244.
- [19] Weiner J.: *Życie i ewolucja biosfery*, PWN, 2003, s. 608.

## OF FALLOWS IN AGRICULTURAL LANDSCAPE IN PLANNING OF ECOLOGICAL ARCHITECTURE

### Summary

Ecological architecture has emerged as a result of phenomena associated with deteriorating health of our environment. This architecture at the end of 20<sup>th</sup> century are set in the context of idea of integration of a man-made space with natural space. In Poland, the period of political transformation from eighties and nineties of last century contributed to the creation of large areas of fallows in agricultural landscape. The processes of secondary succession makes these areas the

site of spontaneous development of many plant communities. Ecological role of the fallows is not learned completely. The aim of this study was to recognize the plant communities formed on fallows, characterizing their ecological role and possibility using in planning of ecological architecture. Observations were carried out in 2012 and 2013 in the buffer zones of all the landscape parks in Łódzkie province. In this study, a using hierarchical cluster Ward method was applied for ordering data. To show which cluster (and their environmental conditions) was most preferred by the species, the indicator value (IndVal) by Dufrene and Legendre was used. The research of vegetation revealed fallows representing 3 structural groups of plant communities. The observed fallows play not a role of refuges for rare and protected plant species. In spite of it, some type of researched fallows are important for protection of biodiversity and its should be protected. Other fallows, especially these with invasive plant species can be utilize in planning of ecological architecture.

**Keywords:** fallows, secondary succession, agricultural landscape, landscape parks, ecological architecture

W artykule wykorzystano materiały uzyskane w trakcie realizacji projektu badawczego 1760/B/PO1/2011/40 realizowanego ze środków Narodowego Centrum Nauki w Krakowie.

DOI:10.7862/rb.2014.69

*Przesłano do redakcji: 02.06.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 16.12.2014 r.*



Jerzy BAKALARCZYK<sup>1</sup>

## PRZEKSZTAŁTNIKI ENERGOELEKTRONICZNE W INSTALACJACH FOTOWOLTAICZNYCH

W artykule opisano główne energoelektroniczne części składowe instalacji fotowoltaicznej przeznaczonej do wytwarzania i dystrybucji energii elektrycznej. Dokonano przeglądu przekształtników energoelektronicznych stosowanych w nowoczesnych instalacjach fotowoltaicznych. Przedstawiono podział na przekształtniki prądu stałego na prąd stały oraz - prądu stałego na prąd przemienny. Podano podstawowe układy pracy tych przekształtników w instalacjach fotowoltaicznych oraz ich topologie. Dokonano podziału instalacji ze względu na współpracę z siecią elektroenergetyczną na instalacje fotowoltaiczne z transformatorem i bez transformatora sieciowego. Poruszono zagadnienie śledzenia punktu mocy maksymalnej MPPT w układach przekształtników prądu stałego na prąd stały. Zwrócono uwagę na problem narzuconego reżimu związanego z zachowaniem parametrów sinusoidalnej fali napięcia wyjściowego falowników w instalacjach fotowoltaicznych. Dokonano zestawienia światowych producentów urządzeń fotowoltaicznych oraz poruszono problem trwałości tych urządzeń i innych wymagań stawianych tym urządzeniom. Zaprezentowano układ falownika oraz sieciowego filtru wygładzającego zaprojektowanego oraz przebadanego przez autora. Przedstawiono zarówno wyniki badań symulacyjnych jak i laboratoryjnych. Wyniki badań potwierdziły przydatność tej konstrukcji w układzie generowania napięcia sinusoidalnego do systemu sieci elektrycznej. W podsumowaniu stwierdzono przydatność zaprojektowanej konstrukcji ze względu na niski poziom zawartości wyższych harmonicznych w przebiegu napięcia wyjściowego oraz potrzebę rozbudowy zaprojektowanego układu falownika o człon przekształtnika prądu stałego na prąd stały wraz z układem sterowania zarówno do ładowania baterii akumulatorów i dopasowania mocy paneli ogniw fotowoltaicznych do układu wejściowego falownika. Na koniec stwierdzono, że dynamiczny rozwój techniki fotowoltaicznej – ze względu na stawiane im wymagania - pociągnie za sobą opracowania urządzeń energoelektronicznych o coraz wyższym stopniu niezawodności i trwałości.

**Słowa kluczowe:** mikroinstalacje, falowniki, sieć elektroenergetyczną, panele fotowoltaiczne, bateria akumulatorów, punktu mocy maksymalnej MPPT, kontrolery MPPT, przekształtniki prądu stałego na prąd stały.

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Jerzy Bakalarczyk, Wyższa Szkoła Techniczna we Włocławku, Łęska 20, 87-800 Włocławek, +48 503363281, jbakal1@wp.pl.



## 1. Wprowadzenie

Ostatnio fotowoltaika szczególnie cieszy się dużym zainteresowaniem naukowców i konstruktorów na całym świecie. Wkracza ona powoli we wszystkie dziedziny życia. Choć nie jest nauką młodą, przyciąga swą uwagę ze względu na ogólny popyt na ekologicznie czyste wytwarzanie energii elektrycznej. Można przyjąć, że jej rozwój datuje się od 1954 r., kiedy to opracowano pierwsze komercyjne ogniwo fotowoltaiczne w firmie Bell Telephone. Szybko potem znalazło ono swe miejsce w technice kosmicznej w panelach satelit do przetwarzania energii słonecznej w elektryczną. Jednak jeszcze wtedy było to rozwiązanie kosztowne. W miarę upływu czasu koszty produkcji ogniwi spadały. Obecne ceny spowodowały, że fotowoltaiczne wytwarzanie energii elektrycznej stało się powszechne i uważane za coś zupełnie oczywistego. Ogniwa fotowoltaiczne weszły na dobre do instalacji generowania energii elektrycznej m.in. w gospodarstwach domowych, zakładach przemysłowych i farmach słonecznych.

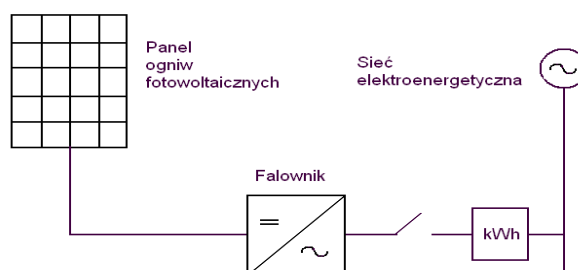
Produkcji energii elektrycznej towarzyszy, jak zwykle, energoelektronika wraz ze swoimi urządzeniami. Urządzenia energoelektroniczne znajdują zastosowanie w instalacjach fotowoltaicznych głównie jako falowniki czyli przekształtniki prądu stałego, pochodzącego z ogniwi fotowoltaicznych, na prąd przemienny wykorzystywany do zasilania odbiorów oraz przesyłania go do sieci elektroenergetycznej. Jednak urządzeń energoelektronicznych w wymienionych instalacjach fotowoltaicznych jest więcej i spełniają one równie ważne i skomplikowane zadanie. Z uwagi na to zasługują one na poświęcenie im więcej miejsca.

## 2. Instalacje fotowoltaiczne

Podziału instalacji fotowoltaicznych można dokonać ze względu na różne kryteria. Można spotkać systemy nie współpracujące z siecią elektroenergetyczną tzw. wyspowe (ang. off-grid) lub podłączone do sieci elektroenergetycznej (ang. on grid). Wyspowe - przeznaczone są głównie dla obszarów niezelektryfikowanych wykorzystujące baterie akumulatorów do gromadzenia energii.

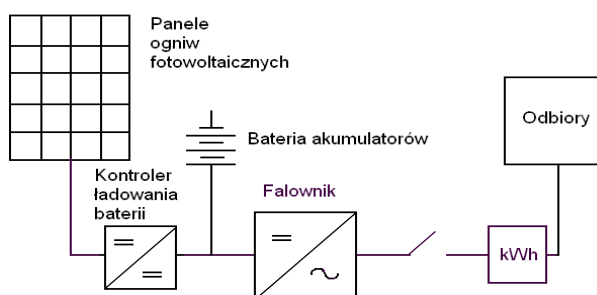
Na Rys. 1 przedstawiono podstawowy układ instalacji fotowoltaicznej przesyłający energię do sieci. Falownik przekształca prąd stały z ogniwi fotowoltaicznych na prąd przemienny sinusoidalny przesyłany do sieci. Spotyka się również wykonania mieszane (hybrydowe) wyżej wymienionych rozwiązań. Do zasilania domów jednorodzinnych służą tzw. mikroinstalacje o mocy do 40 kW. Zakłady przemysłowe wykorzystują zazwyczaj małe instalacje o mocy od 40 do 100kW, a farmy słoneczne uzyskują moc powyżej 100 kW. Na Rys. 2. przedstawiono autonomiczny (wyspowy) układ instalacji fotowoltaicznej zasilający odbiory prądu przemiennego. W skład instalacji fotowoltaicznej wchodzi panele fotowoltaiczne, przekształtniki DC/DC prądu stałego na prąd stały

z kontrolerami śledzenia punktu mocy maksymalnej MPPT oraz falowniki. Te dwa ostatnie stanowią przełączniki energoelektroniczne. Na rys. 3 pokazano system mieszany scalający sieć elektroenergetyczną z układem bateryjnym.



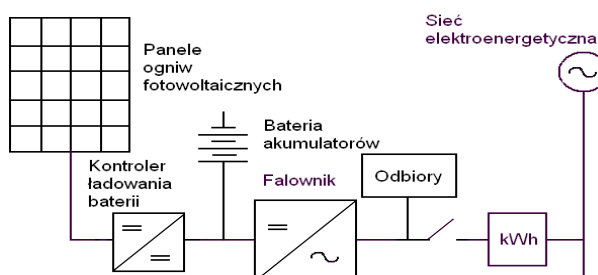
Rys. 1. Podstawowy układ instalacji fotowoltaicznej połączonej z siecią elektroenergetyczną

Fig. 1. Basic grid tied PV installation system



Rys. 2. Układ autonomiczny bez dostępu do sieci elektroenergetycznej

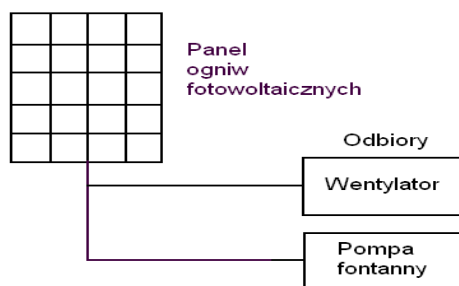
Fig. 2. PV off-grid system



Rys. 3. Fotowoltaiczny system mieszany

Fig. 3. PV grid-tie with battery backup system

W praktyce spotyka się również fotowoltaiczne układy bezpośrednio zasilające przykładowo wentylatory, czy pompy fontanny ogrodowych itp. W tym przypadku panele fotowoltaiczne bezpośrednio połączone są z tymi odbiorami, co przedstawiono na Rys. 4.



Rys. 4. Fotowoltaiczny bezpośredni system zasilania

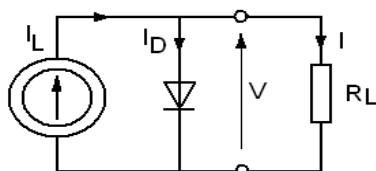
Fig. 4. PV direct system

Instalacje fotowoltaiczne mogą zawierać transformator mocy łączący filtr wyjściowy z siecią jednak układ taki stosowany jest przy największych mocach. Na ogół unika się tych transformatorów z uwagi na to, że zabierają dużo miejsca i są kosztownym rozwiązaniem. W takim przypadku jednak należy się liczyć z możliwościami pojawienia się prądów upływnościowych.

### 3. Panele fotowoltaiczne

Panele fotowoltaiczne składają się z połączonych modułów zawierających ogniwa fotowoltaiczne. Najbardziej popularne to panele z ogniw polikrystalicznych o sprawności ok. 12-14%, później – z ogniw monokrystalicznych o sprawności 14-16%, - z ogniw z krzemu amorficznego o sprawności 6-8%, - z ogniw z tellurku kadmu o sprawności ok. 11%, z ogniw z arsenku galu o sprawności ok. 30%.

Na Rys. 5 przedstawiono schemat zastępczy idealnego ogniwa fotowoltaicznego. Składa się on ze źródła prądowego i podłączonej do niego równolegle diody złączonej.



Rys. 5. Schemat zastępczy idealnego ogniwa fotowoltaicznego

Fig. 5. Ideal PV cell equivalent circuit

Zależności związane z Rys. 5 podano poniżej.

$$I = I_L - I_D \quad (1)$$

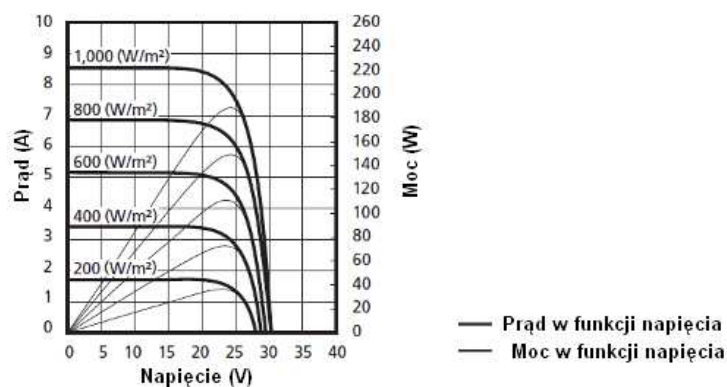
gdzie: I - prąd wyjściowy  
 V - napięcie wyjściowe  
 $R_L$  - rezystancja wyjściowa  
 $I_L$  - prąd wytwarzany przez strumień świetlny  
 $I_D$  - prąd diody lub złącza

Panele fotowoltaiczne mogą być łączone między sobą w różny sposób w zależności od wartości wymaganego napięcia wyjściowego oraz rodzaju systemu instalacji.

Główni producenci paneli fotowoltaicznych:

1. Yingli Green, Chiny (1450 MW)
2. Trina Solar, Chiny (1040 MW)
3. First Solar, USA (900 MW)
4. Sharp, Japonia (800 MW)
5. Canadian Solar, Kanada, (790 MW)
6. Jinko Solar, Chiny (660 MW)
7. Kyocera, Japonia (650 MW)
8. ReneSola, Chiny (570 MW)
9. SunPower, USA (490 MW)
10. Suntech, Chiny (480 MW).

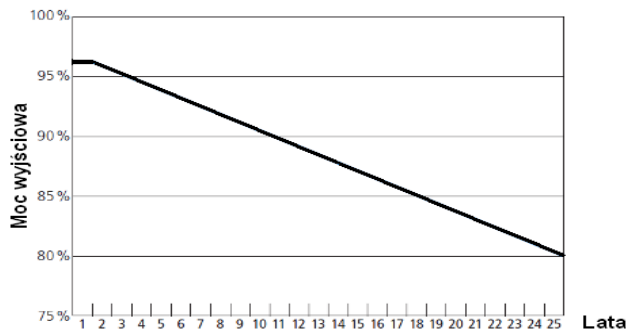
Żywotność takich paneli przyjmuje się na okres min. ok 25 lat. Przykładowe charakterystyki panelu fotowoltaicznego przedstawiono na Rys. 6.



Rys. 6. Przykładowe charakterystyki panelu fotowoltaicznego: prąd i moc w funkcji napięcia przy temperaturze 25°C

Fig. 6. Exemplary panel characteristics: current and power vs. voltage at temperature 25°C

Na Rys. 7 przedstawiono przykładową zależność mocy wyjściowej panelu fotowoltaicznego od lat eksploatacji. Jak widać spadek mocy z upływem czasu eksploatacji stanowi zależność liniową. Po ok. 25 latach moc panelu maleje do 80% mocy wyjściowej. Stanowi to pewną informację co do trwałości układu instalacji fotowoltaicznej. Inne urządzenia wchodzące w skład tej instalacji by nie ograniczać czasu żywotności całego systemu też powinny stanowić elementy o dużym stopniu trwałości i niezawodności. Przekształtniki napięcia stałego na napięcie stałe oraz falowniki powinny być niezawodne i o dużym stopniu trwałości. Jest to podstawowe wymaganie dla tych urządzeń.

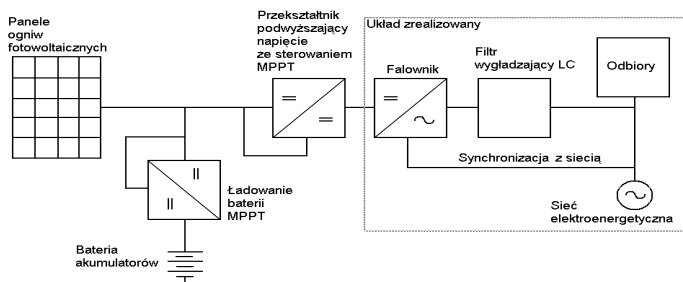


Rys. 7. Przykładowa zależność mocy wyjściowej panelu fotowoltaicznego od lat eksploatacji

Fig. 7. Exemplary dependency between output power and exploiting years of PV panel

#### 4. Przekształtniki energoelektroniczne

Przekształtniki energoelektroniczne znajdują swoje miejsce w instalacji fotowoltaicznej jak to przedstawiono na Rys. 8. Można tu wyróżnić przekształtniki napięcia stałego na napięcie stałe oraz falowniki PWM. Przekształtniki napięcia stałego na napięcie stałe pracują ze sterowaniem MPPT. Na Rys. 8 cienką linią zaznaczono część zrealizowaną i badaną przez autora.



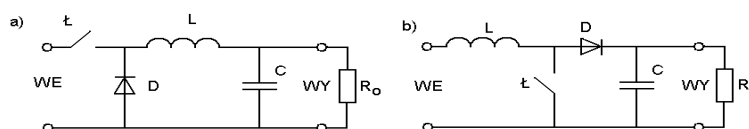
Rys. 8. Ogólny schemat blokowy system fotowoltaicznego

Rys. 8. Overall block scheme of PV system

#### 4.1. Przełączniki prądu stałego na prąd stały

Mają tu zastosowanie przełączniki prądu stałego na prąd stały DC/DC służą one do dopasowania źródła napięcia w postaci panelu fotowoltaicznego do odbioru. Odbiorem w tym przypadku może być albo falownik zasilający odbiory prądu przemiennego albo bateria akumulatorów służąca do gromadzenia energii pochodzącej z ogniw fotowoltaicznych. Ma tu zastosowanie szeroka gama przełączników DC/DC. Szczegółową klasyfikację i ocenę tych urządzeń energoelektronicznych podaje literatura [7]. Sterowanie ich w celu osiągnięcia punktu maksymalnej mocy MPPT może odbywać się różnymi metodami, które wymienia i porównuje literatura [9]. Tych metod jest już powyżej dziesięciu. Najpopularniejsze metody: Perturb and Observe (P&O), Incremental Conductivity (IC), oraz metoda wykorzystująca logikę rozmytą Fuzzy Logic - zostały wymienione i opisane w literaturze [13].

Na Rys. 9 Przedstawione zostały najczęściej wykorzystywane w systemach fotowoltaicznych przełączniki napięcia stałego na napięcie stałe. Jeden z nich to przełącznik obniżający napięcie a drugi – podwyższający napięcie. Obydwa z nich pracują zgodnie z zasadą modulacji szerokości impulsów PWM.



Rys. 9. Przełącznik obniżający napięcie a) i przełącznik podwyższający napięcie b)

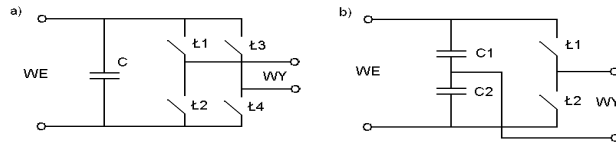
Fig. 9. DC/DC Buck converter a) and DC/DC Boost converter b)

#### 4.2. Falowniki

Falowniki są to urządzenia energoelektroniczne służące do przekształcania napięcia lub prądu stałego na napięcie lub prąd przemienny sinusoidalny. Pracują one zazwyczaj zgodnie z zasadą modulacji szerokości impulsów PWM przy dużej częstotliwości kluczowania rzędu kilkudziesięciu kiloherców. Generują one falę sinusoidalną o stałej częstotliwości 50Hz. W przypadku instalacji fotowoltaicznej będą one służyły do zasilania odbiorów i przesyłania energii do sieci. Trzeba się jednak liczyć z wymaganiami norm co do zawartości wyższych harmonicznych w przebiegu prądu i napięcia i z tego względu wyposażane są w filtry wygładzające LC jak to przedstawiono na Rys. 8. Aby falownik mógł oddawać energię do sieci musi istnieć warunek zgodności faz i równości amplitud napięć sieci i falownika oraz brak przesunięcia fazowego między obydwoma przebiegami napięć. Do kontroli przesunięcia fazowego służy układ synchronizacji fazowej jak to przedstawiono na Rys. 8.

Istnieje duża różnorodność topologii falowników i powstają wciąż nowe umożliwiające doskonalszą pracę przy mniejszych stratach i większej sprawno-

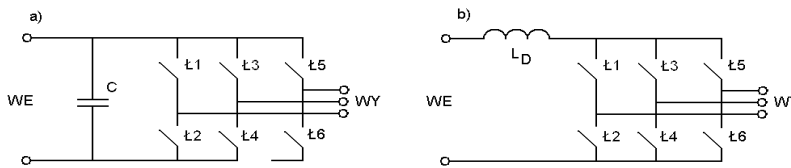
ści a także ograniczające przepływ prądów upływnościowych w przypadku braku transformatora sieciowego. Ogólnie można dokonać podziału falowników na falowniki jednofazowe i trójfazowe. Na Rys. 10 przedstawiono topologie najczęściej stosowanych falowników jednofazowych – w układzie mostkowym H oraz 1/2 H.



Rys. 10. Topologie jednofazowych falowników napięcia: mostka H a) oraz 1/2 mostka H b)

Fig. 10. Topologies of 1-phase voltage inverters: H- bridge a) and 1/2 H-bridge b)

Na Rys. 11. Zaprezentowano topologie falowników trójfazowych w układzie mostkowym przy czym jeden z nich stanowi falownik prądu, a drugi falownik napięcia.



Rys. 11. Topologie falowników trójfazowych: mostkowy falownik napięcia a) oraz mostkowy falownik prądu

Fig. 11. Topologies of three-phase inverters: voltage source bridge inverter a) and current source bridge inverter

Niektóre pozostałe rodzaje falowników jednofazowych przedstawiono w tabeli 1.

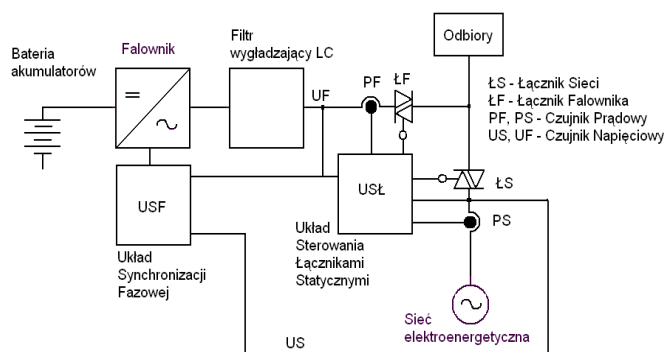
Tabela 1. Topologie niektórych falowników jednofazowych

Table 1. Topologies of some 1-phase inverters

Falowniki 1- fazowe z modulacją PWM
Topologia H4 z jednobiegunową modulacją PWM
Topologia H5 z dwubiegunową modulacją
Topologia H6
Topologia NPC
Falownik w konfiguracji pełnego mostka typu H
Przekształtnik półmostkowy 1/2 H
Przekształtnik o topologii HERIC

## 5. Zrealizowana konstrukcja przekształtnika

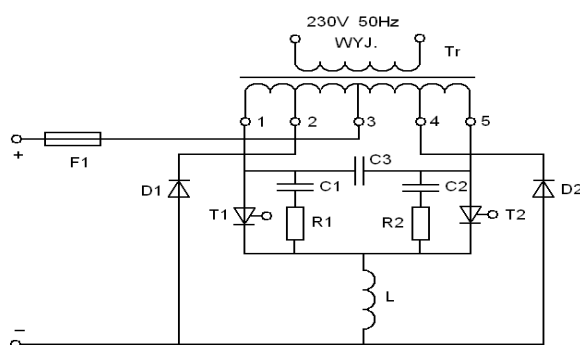
Ogólny schemat blokowy zrealizowanego układu przedstawiono na Rys. 12. Zawiera on falownik, filtr wygładzający LC przedstawiony na Rys. 14. Ponadto urządzenie to zawiera układ synchronizacji fazowej USF, oraz układ sterowania łącznikami statycznymi ŁS i ŁF. Układ ten zawiera również czujniki pomiarowe prądu PS i PF i czujniki pomiarowe napięcia UF i PS. Na podstawie dostarczanych informacji układ sterowania w oparciu o pętlę fazową dokonuje zsynchronizowania przebiegu napięcia falownika z przebiegiem napięcia sieci. Zrealizowano projekt przekształtnika energoelektronicznego w formie falownika o komutacji impulsowej jednostopniowej co przedstawiono na Rys. 13.



Rys. 12. Ogólny schemat blokowy zrealizowanego układu

Fig. 12. Overall block scheme of realized system

Jest to układ tyrystorowy pracujący z częstotliwością 50 Hz. Podczas badań został on zasilony napięciem z akumulatorów.

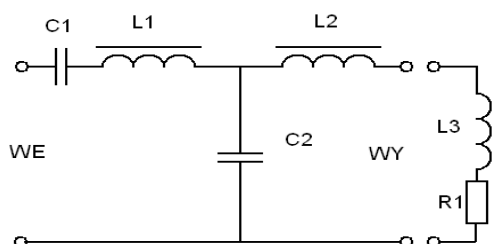


Rys. 13. Topologia zrealizowanego falownika napięcia

Fig. 13. Topology of realized inverter



Rys. 14 Przedstawia zaprojektowany filtr wygładzający falownika. Składa się on z indukcyjności i pojemności i zapewnia idealnie sinusoidalny kształt fali napięcia wyjściowego przy częstotliwości 50 Hz. Elementy L3 i R1 stanowią obciążenie wyjścia filtra.

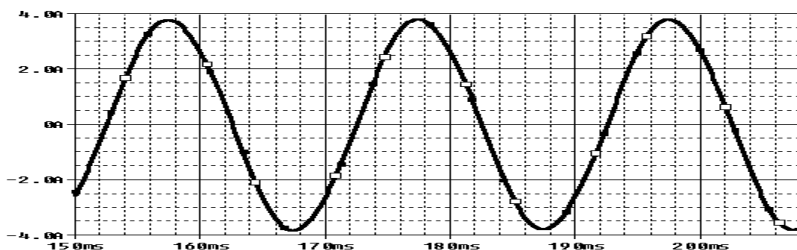


Rys. 14. Zaprojektowany filtr wygładzający falownika

Fig. 14 . Designed smoothing filter of the inverter

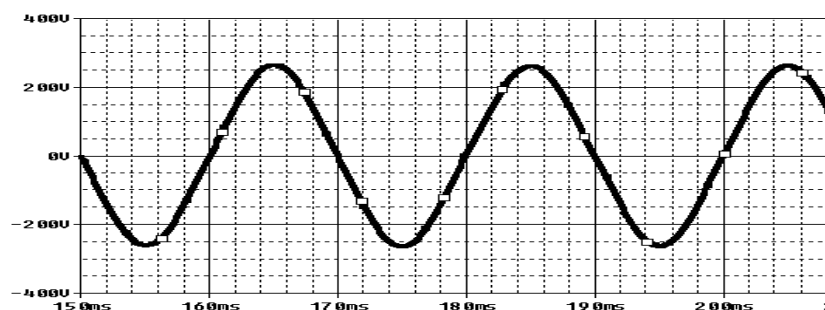
## 6. Badania symulacyjne

Badania symulacyjne wykonano przy wykorzystaniu programu Pspice. Wyniki symulacji przedstawiono na Rys. 15 i Rys. 16. Na rysunkach tych przedstawiono przebiegi prądu i napięcia wyjściowego falownika za filtrem wygładzającym.



Rys. 15. Przebieg prądu wyjściowego zasymulowanego falownika

Fig. 15. Output current waveform of simulated inverter

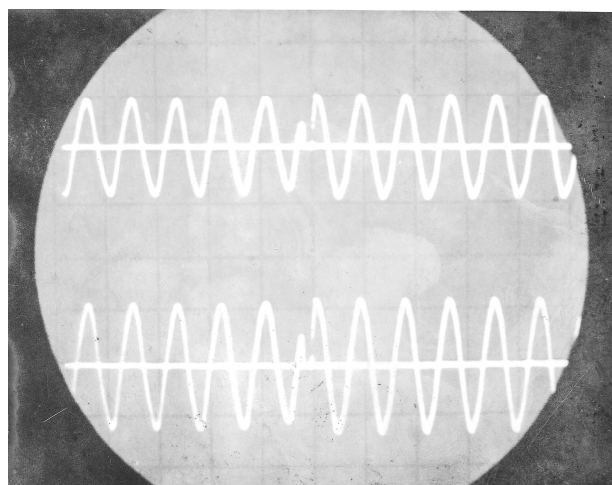


Rys. 16. Przebieg napięcia wyjściowego zasymulowanego falownika

Rys. 16. Output voltage waveform of simulated inverter

## 7. Badania laboratoryjne

Podczas prób laboratoryjnych wykonano oscylogramy napięć wyjściowych falownika za filtrem wygładzającym oraz pomierzono częstotliwość wyjściową falownika. Dokonano również pomiaru zawartości wyższych harmonicznych w przebiegu wyjściowym za falownikiem. Stwierdzono niską zawartość wyższych harmonicznych w przebiegu wyjściowym.



Rys. 17. Przebieg prądu (u góry) i napięcia (na dole) wyjściowego X=20ms/dz, Y=200V/dz

Fig. 17. Output waveforms of current (upper) and voltage (bottom) X=20ms/div, Y=200V/div

Częstotliwość fali napięcia wyjściowego falownika podczas normalnej pracy oraz podczas synchronizacji z siecią zasilającą wahała się w granicach 49,5 – 50,5 Hz co jest zgodne z normą PN-EN-50160. Całkowity współczynnik

odkształcenia harmonicznymi THD  $\ll 8\%$  co jest zgodne również wyżej wymienioną normą. Na Rys. 17 przedstawiono oscylogram przebiegów wyjściowych napięcia i prądu za dławikiem wygładzającym. Na zdjęciu widać moment przełączania zasilania odbiornika z sieci na falownik.

Kształt napięcia wyjściowego falownika za filtrem falownika nie ulegało zmianie ani przy zmianie charakteru obciążenia ani zmianie częstotliwości w zakresie  $\pm 10$  Hz. Badania przeprowadzono przy następujących wartościach elementów falownika i filtru wygładzającego:

Filtr wygładzający:		Falownik
C1 = 15,6 $\mu$ F	L3 = 154 mH	C3 = 2 $\mu$ F
C2 = 31,2 $\mu$ F	R1 = 47,4 $\Omega$	C1=C2=1k
L1= 486 mH		R1=R2=1k
L2= 108 mH		

## 8. Uwagi końcowe i wnioski

Wyniki badań symulacyjnych potwierdziły przydatność przedstawionej przez autora konstrukcji do pracy w układzie generowania napięcia sinusoidalnego do systemu sieci elektrycznej. Zaprojektowana konstrukcja ze względu na niski poziom zawartości wyższych harmonicznymi w przebiegu napięcia wyjściowego spełnia wymagania stawiane przez normy energetyczne. Dalsze prace będą zmierzały do rozbudowy zaprojektowanego układu falownika o człon przekształtnika prądu stałego na prąd stały wraz z układem sterowania zarówno do ładowania baterii akumulatorów i dopasowania mocy paneli ogniw fotowoltaicznych do układu wejściowego falownika. Najprawdopodobniej dynamiczny rozwój techniki fotowoltaicznej – ze względu na stawiane im wymagania - pociągnie za sobą opracowania urządzeń energoelektronicznych o coraz wyższym stopniu niezawodności i trwałości.

## Literatura

- [1] Alonso-Martinez, J., Eloy-Garcia J., Arnaltes S.: Control of a three-phase grid-connected inverter for photovoltaic applications with a fuzzy MPPT under unbalanced conditions, Power Electronics and Applications, 2009, EPE '09, 13th European Conference on, 8-10 Sept. 2009, pp.1-7.
- [2] Franke W.T.; Oestreich N.; Fuchs F.W.: Comparison of transformerless converter topologies for photovoltaic application concerning efficiency and mechanical volume, Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on, 4-7 July 2010, pp.724-729.
- [3] Esram T., Chapman P.L.: Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques, Energy Conversion, IEEE Transactions on, Vol.22, no.2, June 2007, pp.439-449.
- [4] George M., Prakash P., George S., Eldo S., Raina A.: Cascaded boost converter for

- PV applications, *International Journal of Innovative Research in Electrical, Electronics, Instrumentation and Control Engineering*, Vol. 2, issue 4, April 2014, pp.1401-1406.
- [5] Guerrero-Rodríguez N. F., Rey-Boué A.B., de Pablo-Gómez S., Guerrero -Rodríguez N. F., Rey-Boué A.B., de Pablo-Gómez S.: Design of the Control Algorithms for Photovoltaic Grid-Connected Renewable Agents using the Hardware in the loop Simulation Technique, *International Conference on Power Systems Transients (IPST2013)* in Vancouver, Canada, July 18-20, 2013.
- [6] Hyosung K., Kyoung-Hwan K.: Filter design for grid connected PV inverters, *Sustainable Energy Technologies, ICSET 2008, IEEE International Conference on*, 24-27 Nov. 2008, pp.1070-1075.
- [7] Kasper M., Bortis D., Kolar J. W.: Classification and Comparative Evaluation of PV Panel-Integrated DC-DC Converter Concepts, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 29, No. 5, May 2014, pp. 2511-2526.
- [8] Lin Ma, Xinmin Jin, Kerekes, T., Liserre, M., Teodorescu, R., Rodriguez, P.: The PWM strategies of grid-connected distributed generation active NPC inverters, *Energy Conversion Congress and Exposition, 2009. ECCE 2009, IEEE*, Sept. 20 -24, 2009, pp.920-927.
- [9] Pradeep Kumar Yadav A., Thirumaliah S., Haritha G.: Comparison of MPPT Algorithms for DC-DC Converters Based PV Systems, *International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering*, Vol. 1, Issue 1, July 2012, pp. 18-23.
- [10] Saridakis S.; Koutroulis E.; Blaabjerg F., Optimal Design of Modern Transformerless PV Inverter Topologies, *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, Vol.28, no.2, June 2013, pp.394-404.
- [11] Surma P.: Porównanie metod MPPT paneli fotowoltaicznych (P&O, IC, Fuzzy Logic) w środowisku Matlab Simulink, *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 90 Nr 1/2014, str. 66-69.
- [12] Vazquez, G.; Kerekes, T.; Rocabert, J.; Rodriguez, P.; Teodorescu, R.; Aguilar, D.: A photovoltaic three-phase topology to reduce Common Mode Voltage, *Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on*, 4-7 July 2010, pp.2885-2890.
- [13] Zaremba A., Rodziejewicz T., Waclawek M.: Algorytmy śledzenia punktu mocy maksymalnej (mppt) w systemach fotowoltaicznych, *Proceedings of ECOpole*, 2012, str.805-810.
- [14] Surya Kumari J., Sai Babu Ch.: Mathematical Modeling and Simulation of Photovoltaic Cell using Matlab-Simulink Environment *International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE)* Vol. 2, No. 1, February 2012, pp. 26-34.

## POWER ELECTRONICS CONVERTERS IN PHOTOVOLTAIC INSTALLATIONS

### Summary

This article describes the main power electronics components of the photovoltaic installation intended for generation and distribution of electrical energy. The review of power electronics converters used in modern solar photovoltaic installations one has done. The split of the power electronics units has been done on the DC/DC and DC/AC converters. One has given basic work systems of these converters in photovoltaic installations and their topologies. Taking into account a kind of the work with main grid, an installation classification of photovoltaic installation on with and without power transformers one has done. The problem of Maximum Power Point Tracking MPPT in DC/DC converters has been risen. It is noted on the problem of enforcing the regime associated with the parameters of the sine output voltage wave of the inverters in photovoltaic systems. An overview of world manufacturers of photovoltaic units was done and one has broached the problem of the durability and other requirements for these equipment. In this paper it is shown the inverter and mains filter smoothing system designed and tested by the author. In this paper are presented both simulation and laboratory test results of this equipment. The test results confirmed the usefulness of this construction to generation of sinusoidal voltage into electrical grid system. In summary it was found the usefulness of the designed structure considering the low level of higher harmonics in the output voltage waveform and the need for expansion of the inverter system of DC/DC MPPT converter with the control system both to recharge the batteries and to power matching of photovoltaic panels to the inverter input. At the end of this paper, it was alleged that the dynamic development of photovoltaic technology – because of the requirements for them - will entail the development of power electronics units to get their higher and higher degree of reliability and durability.

**Keywords:** micro PV installations, inverters, electric grid, Solar panels, rechargeable batteries, maximum power point MPP, MPPT controllers, DC/DC converters.

DOI:10.7862/rb.2014.70

*Przesłano do redakcji: 06.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 16.12.2014 r.*

Krzysztof BARAN<sup>1</sup>  
Marcin LEŚKO<sup>2</sup>  
Henryk WACHTA<sup>3</sup>

## **HYBRYDOWE SYSTEMY OŚWIETLENIA DROGOWEGO**

Oświetlenie drogowe jest jednym z ważniejszych czynników bezpieczeństwa ruchu i bezpieczeństwa publicznego. Obecnie zdecydowaną większością oświetlenia drogowego stanowią oprawy z wyładowczymi źródłami światła. Gwałtowny rozwój energooszczędnej technologii LED, jak również dyrektywy unijne o wymianie mało wydajnych źródeł na źródła energooszczędne, spowodowały, że coraz częściej oprawy w technologii LED stosowane są również do oświetlenia drogowego. Oprawy LED posiadają wiele zalet m.in. wysoka skuteczność świetlna, długa żywotność często przekraczająca 50 000 godzin, odporność na wstrząsy mechaniczne czy duża energooszczędność, pozwalająca na uzyskanie do 80% oszczędności w zużyciu energii elektrycznej, w porównaniu do tradycyjnych źródeł światła wytwarzających przybliżoną wartość strumienia świetlnego. Dodatkowo diody LED są źródłami niskonapięciowymi, dzięki czemu do ich zasilania mogą być użyte źródła, które pozyskują energię z odnawialnych źródeł. Połączenie energii uzyskanej z turbiny wiatrowej i panelu fotowoltaicznego do zasilania opraw drogowych nosi nazwę hybrydowego systemu oświetlenia. Systemy takie, zasilane z energii wiatru i energii słonecznej, mogą być autonomicznymi systemami oświetlenia drogowego. Rozwiązania takie są szczególnie przydatne w miejscach, gdzie nie ma infrastruktury elektroenergetycznej i nie ma możliwości zasilania z sieci elektrycznej. W artykule przedstawiono budowę oraz zasadę działania hybrydowego systemu oświetlenia drogowego. Szczegółowo omówiono wraz z przykładowymi parametrami, elementy wchodzące w skład takiego systemu. Przedstawiono możliwość wykorzystania wymienionych systemów w warunkach klimatycznych Polski, jak również opisano aspekt optymalnego doboru poszczególnych elementów, gwarantujących prawidłowe działanie systemu hybrydowego. Szacuje się, że w ciągu następnych kilkunastu lat, wraz z sukcesywnym rozwojem technologii LED oraz systemów odnawialnych źródeł energii, systemy hybrydowe staną się w jeszcze większym stopniu konkurencyjnym i alternatywnym rozwiązaniem dla tradycyjnych opraw drogowych.

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Krzysztof Baran, mgr inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. Wincentego Pola 2 35-959 Rzeszów, kbaran@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Marcin Leško, mgr inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. Wincentego Pola 2 35-959 Rzeszów, mlesko@prz.edu.pl

<sup>3</sup> Henryk Wachta, dr, Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. Wincentego Pola 2 35-959 Rzeszów, hwachta@prz.edu.pl

**Słowa kluczowe:** oprawa drogowa, odnawialne źródła energii, panel fotowoltaiczny, turbina wiatrowa, źródła światła LED

## 1. Wprowadzenie

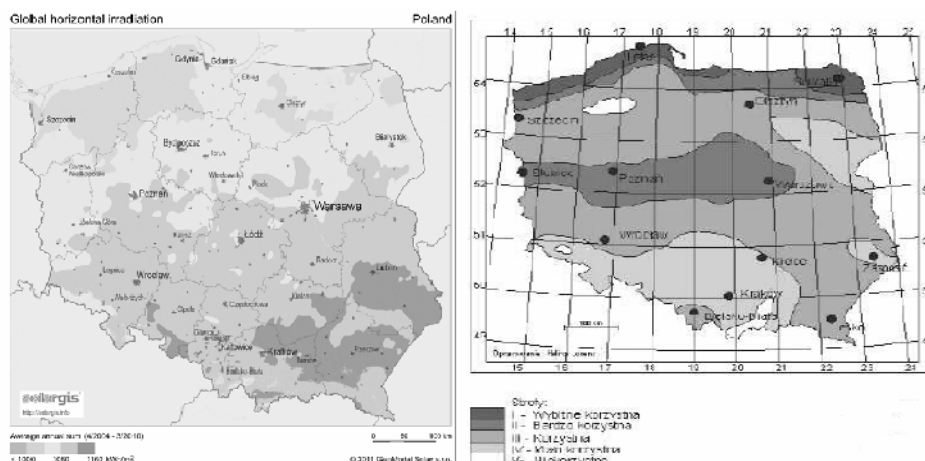
Energia elektryczna pozyskiwana z odnawialnych źródeł energii, w coraz większym stopniu, staje się alternatywnym sposobem zasilania wielu urządzeń elektrycznych. Otrzymana w ten sposób energia może być dopełnieniem istniejącego już, tradycyjnego sposobu zasilania, jak również może stać się jedynym i niezależnym źródłem energii. Możliwość takiego rodzaju zasilania znalazła zastosowanie m.in. w technice świetlnej do oświetlenia zewnętrznego. Rozwój nowych, efektywnych źródeł światła w technologii LED i zastosowanie ich do oświetlenia drogowego, pozwoliło na wykorzystanie odnawialnych źródeł energii do autonomicznego zasilania opraw drogowych. Poprawna praca takiej oprawy drogowej, możliwa jest dzięki wykorzystaniu energii uzyskanej z panelu fotowoltaicznego, jak również z turbiny wiatrowej. Połączenie tych dwóch źródeł odnawialnej energii do zasilania opraw drogowych, nosi nazwę tzw. hybrydowego systemu oświetlenia drogowego.

W artykule przedstawiono ideę działania takiego systemu, jak również omówiono przykładowe komponenty wchodzące w skład hybrydowego systemu oświetlenia drogowego.

## 2. Idea wykorzystania odnawialnych źródeł energii do oświetlenia drogowego

Wykorzystanie energii odnawialnej pochodzącej z hybrydowych, czyli słoneczno-wiatrowych systemów zasilania, stało się możliwe dzięki przeanalizowaniu wyników badań meteorologicznych. Warunki klimatyczne Polski pod względem możliwości wykorzystania energii wiatru i Słońca są relatywnie korzystne. Charakteryzują się jednak znaczną zmiennością w cyklu rocznym, jak i nierównomiernym rozkładem dla różnych rejonów Polski.

Wielkość energii słonecznej, która dociera do dowolnego odbiornika jest bardzo zróżnicowana w zależności od lokalizacji. Częste zachmurzenia oraz duże opady jesienią i wiosną, a także niskie temperatury powietrza zimą, wpływają na bardzo nierównomierny rozkład napromieniowania w cyklu rocznym. Około 80 % całkowitego rocznego napromieniowania przypada na siedem miesięcy okresu wiosenno-letniego ( od kwietnia do października), przy czym czas operacji słonecznej w okresie letnim wydłuża się do 16 godzin dziennie, natomiast w zimie skraca się do 8 godzin dziennie [2,4,5].



Rys. 1. Średnie nasłonecznienie oraz strefy wiatrowe dla Polski [7]

Fig. 1. Average solar radiation energy and wind zones for Poland [7]

Również rozkład energii wiatru w Polsce charakteryzują się znaczną zmiennością, zarówno w cyklu rocznym, gdzie średnia prędkość wiatru w okresie jesienno-zimowym jest większa niż w okresie letnim, jak również zmiennym rozkładem dla różnych rejonów Polski [1].

Roczna analiza pod względem dni wietrznych i dni słonecznych wykazuje pewne niedostatki, jednego jak i drugiego źródła energii. Kilka dni bezwietrznych zatrzymuje działanie turbiny wiatrowej, podobnie, jak kilka dni pochmurnych nie generuje odpowiedniej ilości energii z paneli fotowoltaicznych. Dopiero połączenie tych dwóch systemów, które wzajemnie się dopełniają, daje możliwość autonomicznego zasilenia oprawy drogowej pracującej przez cały rok.

Znaczącym czynnikiem rozwojowym hybrydowych systemów oświetlenia drogowego, było zastosowanie źródeł światła w najnowszej technologii LED. Duża energooszczędność, pozwalająca na uzyskanie do 80% oszczędności w zużyciu energii elektrycznej, w porównaniu do tradycyjnych źródeł światła wytwarzających przybliżoną wartość strumienia świetlnego [6], jest kluczowym elementem poprawnego działania takiego systemu.

Pierwsze rozwiązania hybrydowego oświetlenia drogowego zastosowane w Polsce, nie zawsze gwarantowały pewność świecenia: elementy były często dobierane przypadkowo bez dokładnej analizy. Zdarzało się, że oświetlenie takie działało krótko w porze letniej a zimą nie działało wcale. Niestety, rozwiązania takie spotkać można jeszcze w obecnym czasie, dlatego bardzo ważny jest optymalny dobór podzespołów systemu hybrydowego, gwarantujący poprawne działanie dla danych warunków klimatycznych. Przy obecnym poziomie technologicznym i prawidłowym doborze elementów systemu hybrydowego, można praktycznie zagwarantować 100-procentową pewność świecenia opraw [3].





Rys. 2. Widok dzienny oraz nocny poprawnie działającego hybrydowego systemu oświetlenia [7]

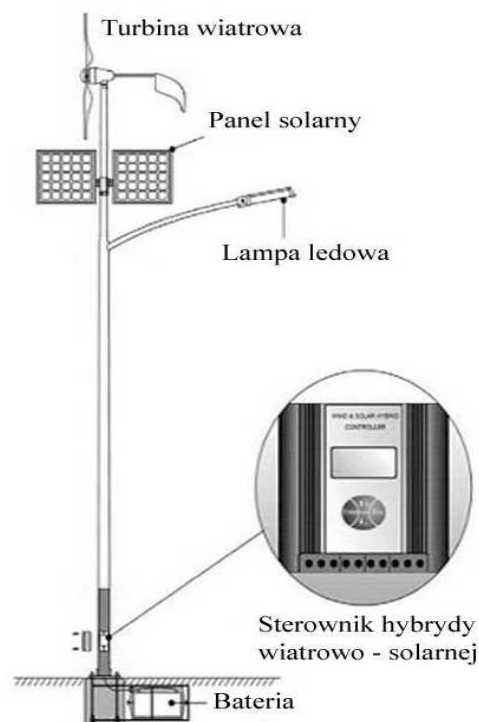
Fig. 2. Day and night view of the properly functioning hybrid lighting system [7]

W chwili obecnej hybrydowe systemy oświetlenia, wykorzystujące energię Słońca i wiatru, stają się dużą konkurencją dla systemów tradycyjnego oświetlenia z wyładowczymi źródłami światła. Systemy takie są również niezwykle użyteczne w miejscach, gdzie nie ma infrastruktury elektroenergetycznej i nie ma możliwości zasilania z sieci energetycznej. Gminy oraz samorzady coraz chętniej decydują się na wykorzystanie tego typu systemów do oświetlenia drogowego. Duża efektywność oraz znaczna długość życia takich systemów w szybkim tempie zwraca nakład finansowy na tego typu systemy. Dodatkowo, zastosowanie energooszczędnych i ekologicznych rozwiązań powoduje, że samorzady starając się o tego typu inwestycje, mogą liczyć na różnego rodzaju dopłaty i finansowe wsparcie.

### 3. Budowa hybrydowego systemu oświetlenia

Zaproponowany system oświetlenia hybrydowego składa się z następujących elementów:

- panele fotowoltaiczne (PV) wykonane w technologii krzemu monokrystalicznego lub polikrystalicznego, jako źródło energii elektrycznej otrzymywanej z energii słonecznej,
- turbina wiatrowa jako źródło energii elektrycznej otrzymywanej z energii wiatrowej,
- oprawa oświetleniowa typu LED,
- akumulator do gromadzenia energii Słońca i wiatru, jak również do zasilania oprawy LED,
- sterownik do sterowania pracą wszystkich komponentów systemu hybrydowego,
- słup jako konstrukcja nośna dla elementów systemu.



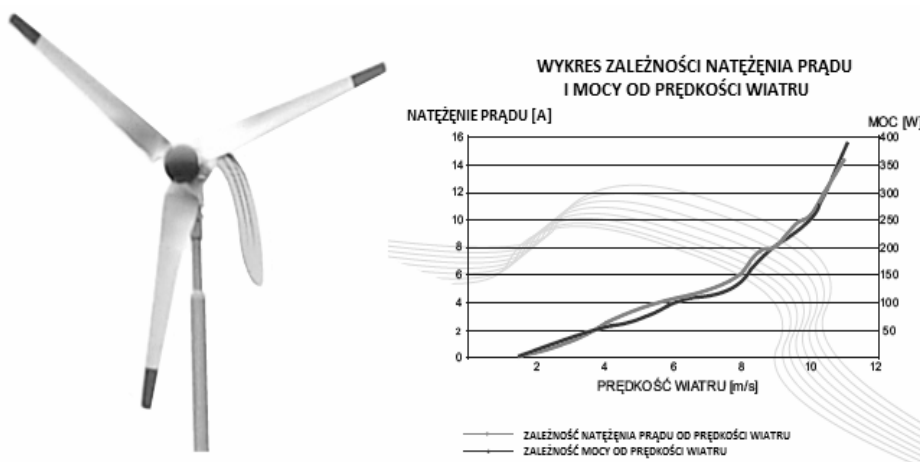
Rys. 3. Schemat strukturalny hybrydowego systemu oświetlenia [7]

Fig. 3. Structural scheme of the hybrid lighting system [7]

Na rysunku 3. przedstawiony został schemat strukturalny hybrydowego systemu oświetlenia. Energia uzyskana z panelu fotowoltaicznego oraz turbiny wiatrowej przekazywana jest do akumulatora. Kontrolę nad poprawnym działaniem całego układu sprawuje sterownik, który kieruje również pracą odbiorników energii elektrycznej. W przypadku występowania energii wiatru oprawa zasilana jest bezpośrednio z generatora wiatrowego, natomiast, gdy mamy do czynienia z bezwietrznym dniem, oprawa zasilana jest z akumulatora, który następnie jest doładowywany z panelu fotowoltaicznego. System hybrydowy zazwyczaj wyposażony jest w akumulatory żelowe, które pozwalają na nieprzerwane działanie systemu w zaprojektowanym przedziale czasowym, wynoszącym przeważnie od trzech do pięciu dni. W praktyce oznacza to, że jeśli zdarzy się pięć dni pochmurnych i zarazem bezwietrznych, to światła uliczne w tym przedziale czasu nie przestaną działać.

### 3.1. Turbina wiatrowa

Zadaniem turbiny wiatrowej jest przekształcanie energii mechanicznej generowanej przez wiatr na energię elektryczną. W systemach hybrydowych stosowane są turbiny o mocach rzędu kilkuset watów. Głównym wymaganiem stawianym generatorom wiatrowym jest zapewnienie produkcji energii przy jak najmniejszej prędkości wiatru.



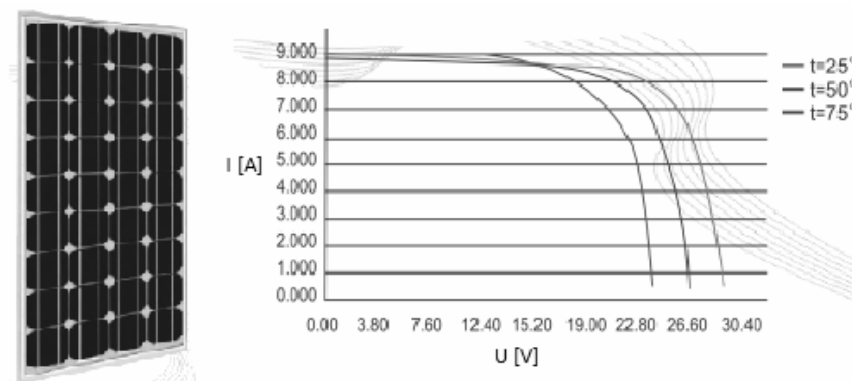
Rys. 4. Przykładowa turbina wiatrowa i jej podstawowa charakterystyka [7]

Fig. 4. Example of a wind turbine with the basic characteristic [7]

Na rysunku 4. pokazana została przykładowa turbina wiatrowa wykorzystywana w hybrydowych systemach oświetleniowych. Nominalna moc turbiny wynosi 400 W i uzyskiwana jest przy prędkości wiatru 9,5 m/s. Turbina posiada 3 specjalnie wyprofilowane łopaty, dzięki czemu jej prędkość startowa wynosi tylko 1,5 m/s. Wyposażona jest również w funkcję hamowania elektromagnetycznego i aerodynamicznego. Nominalne napięcie turbiny wynosi 24 V.

### 3.2. Panele fotowoltaiczne

Panele fotowoltaiczne przekształcają energię promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Najczęściej używanym materiałem do produkcji ogniw fotowoltaicznych jest krzem polikrystaliczny lub monokrystaliczny. Moc nominalna paneli fotowoltaicznych zawiera się w zakresie od 5 do 310 W, przy czym, panele wykorzystywane w hybrydowych systemach oświetlenia, przeważnie posiadają moc równą lub wyższą rzędu 200 W. Panele fotowoltaiczne generują napięcia stałoprądowe od 12 do 60 V, w celu uzyskania żądanych parametrów, mogą być łączone szeregowo lub równoległe w większe jednostki [3].



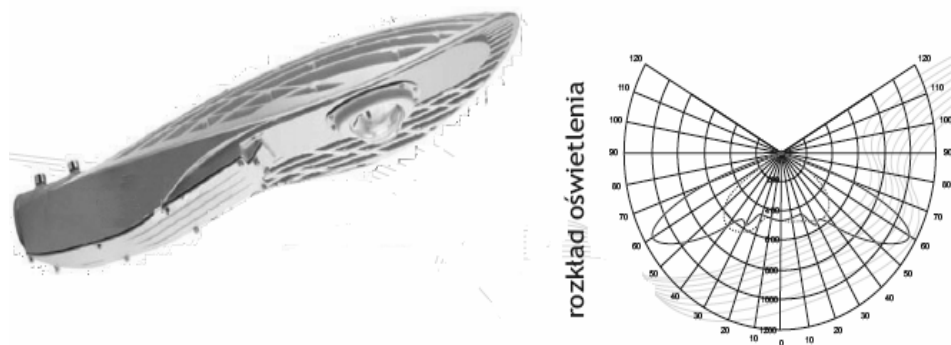
Rys. 5. Widok typowego panelu fotowoltaicznego i jego charakterystyka prądowo-napięciowa [7]

Fig. 5. View of a typical photovoltaic panel and its current-voltage characteristics [7]

Sprawność paneli monokrystalicznych jest wyższa niż paneli polikrystalicznych i wynosi ok. 14 – 16 %.

### 3.3. Oprawa drogowa

W hybrydowych systemach oświetlenia drogowego jako źródło światła najczęściej stosowane są źródła LED. Oprawy takie charakteryzują się znacznie mniejszym poborem mocy w stosunku do wyładowczych źródeł światła, przy wytworzeniu przybliżonej wartości strumienia świetlnego.



Rys. 6. Widok przykładowej oprawy drogowej LED i jej krzywa rozsyłu światłości [7]

Fig. 6. View of the example of the LED road framing and its light distribution curve [7]

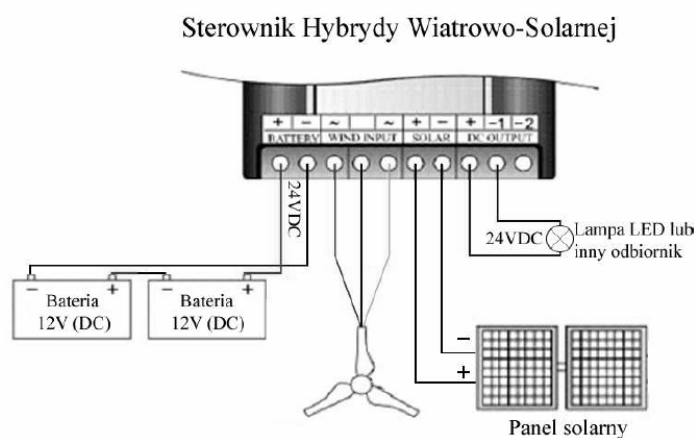
Oprawy LED oprócz wymienionej energooszczędności posiadają wiele innych zalet m.in. łatwość sterowania kolorem jak i strumieniem świetlnym, długą żywotność, często przekraczającą 50 000 godzin czy niewrażliwość na

wstrząsy. W oprawach tego typu łatwo można również kształtować charakterystykę fotometryczną i sposób świecenia oprawy, bez konieczności stosowania odbłyśników. Głównym natomiast ograniczeniem źródeł LED jest wysoka temperatura złącza wpływająca na podstawowe parametry świetlne, dlatego bardzo ważne jest odpowiednie chłodzenie źródła LED, poprzez optymalny dobór radiatora.

### 3.4. Sterownik

Istotnym elementem hybrydowego systemu oświetlenia jest sterownik, który nadzoruje poprawną pracę wszystkich komponentów. Głównym zadaniem sterownika jest nadzorowanie poprawności ładowania akumulatorów oraz kontrola poziomu rozładowania w celu przedłużenia ich trwałości.

Sterownik zabezpiecza również akumulatory przed nadmiernym poborem prądu przez oprawę oświetleniową, celem ochrony przed nadmiernym rozładowaniem. Większość kontrolerów posiada również funkcję Maximum Power Point Tracking, która służy do śledzenia maksymalnego punktu pracy panelu fotowoltaicznego, dzięki czemu, akumulator ładowany jest najbardziej efektywnie w danych warunkach pracy panelu.



Rys. 7. Przykładowy sposób dołączenia elementów systemu hybrydowego do sterownika [7]

Fig. 7. The example of how to attach elements of the hybrid system to the controller [7]

## 4. Podsumowanie

Hybrydowe systemy oświetlenia drogowego stają się na coraz szerszą skalę alternatywnym rozwiązaniem dla tradycyjnych systemów z lampami wyładowczymi. Prawidłowe działanie systemu poprzedzone powinno być analizą poprawności doboru komponentów dla wybranej lokalizacji. Przewiduje się, że w ciągu następnych kilkunastu lat, wraz z sukcesywnym rozwojem technologii LED oraz systemów odnawialnych źródeł energii, systemy hybrydowe staną się w jeszcze większym stopniu konkurencyjnym i alternatywnym rozwiązaniem dla tradycyjnych opraw drogowych.

### Literatura

- [1] Bandzul W. : *Wpływ elektrowni wiatrowych na niezawodność pracy systemu elektroenergetycznego*. Elektroenergetyka Nr 3/2005
- [2] Baran K., Leśko M., Wachta H.: *Badania pozycjonowania paneli fotowoltaicznych na terytorium Polski*, Pomiary Automatyka Kontrola 10/2013
- [3] Pabjańczyk W. : *Hybrydowe systemy oświetlenia w technologii LED*. Spektrum, lipiec-sierpień 2012
- [4] Rodziewicz T., Waclawek M.: *Ogniwa słoneczne - wpływ środowiska naturalnego na ich pracę*. Warszawa, WNT 2011
- [5] Rodziewicz T., Ząbkowska-Waclawek M., Żdanowicz T.: *Wykorzystanie modułów fotowoltaicznych w obszarach o większych szerokościach geograficznych*, Chem. Dydak. Ekol. Metrol. 1998
- [6] Wiśniewski A., *Lampy LED – ocena podstawowych parametrów*, Przegląd elektrotechniczny 2012, nr 5a
- [7] [www.solls.pl/pl/z-energii-odnawialnej/zestaw\\_hybrydowy\\_Y2M400W.pdf](http://www.solls.pl/pl/z-energii-odnawialnej/zestaw_hybrydowy_Y2M400W.pdf) - zestaw hybrydowy Y2M400W [dostęp 10 maja 2014 r].

## HYBRID SYSTEMS FOR ROAD LIGHTING

### Summary

Road lighting is one of the most important factors of traffic safety and public safety. Currently, the vast majority of road lighting are the framings with discharge light sources. The rapid development of energy-efficient LED technology, as well as EU directives on the replacement of inefficient sources with energy-efficient sources that more and more often the framings in LED technology are also used for the road lighting. LED framings have many advantages, among others, the high luminous efficiency, long life often exceeding 50 000 hours, resistance to mechanical vibration or high energy efficiency, which allows to obtain up to 80% of savings in electricity consumption, compared to traditional light sources producing the approximate value of the luminous flux. In addition, LEDs are low-voltage sources, so to power them we can use sources, which obtain energy from renewable sources. The combination of energy obtained from

a wind turbine and photovoltaic panel to power road framings is called the hybrid lighting system. Such system, powered by wind energy and solar energy, can be the autonomous systems of road lighting. Such solutions are especially useful in places, where there is no electricity infrastructure and there is no possibility of powering from the mains. The article presents the construction and principle of operation of the hybrid system of road lighting. There are in detail discussed the elements comprising such system, with the examples of parameters. There is presented the possibility of using the mentioned systems in climatic conditions of Poland, as well as there is described the aspect of the optimal selection of particular elements, guaranteeing the proper operation of the hybrid system. It is estimated that over several next years, with the gradual development of LED technology and systems of renewable energy sources, hybrid systems will become an even more competitive and alternative solution for traditional road framings.

**Keywords:** luminaire road, renewable sources of energy, PV panel, wind turbine, LED lighting source

DOI:10.7862/rb.2014.71

*Przesłano do redakcji: 19.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 02.06.2014 r.*

Małgorzata BASIŃSKA<sup>1</sup>  
Halina KOCZYK<sup>2</sup>

## OCENA ENERGETYCZNA DOŚWIADCZALNEGO BUDYNKU PASYWNEGO

W artykule zaprezentowano doświadczalny budynek pasywny Instytutu Inżynierii Środowiska Politechniki Poznańskiej – DoPas. Dom o szkielecie drewnianym wybudowany w 1991 roku, został przebudowany w 2007 roku do standardu pasywnego z zastosowaniem materiałów i elementów dopuszczonych do stosowania w budownictwie energooszczędnym i pasywnym. W pracy przeanalizowano występujące w budynku mostki cieplne oraz wyznaczono ich wartości. Do oceny energetycznej wykorzystano metodę pakietu do projektowania budynków efektywnych energetycznie oraz analizę porównawczą rzeczywistego oraz teoretycznego zużycia ciepła dla dwóch wybranych miesięcy okresu grzewczego. Przedstawiono szczegółowe godzinowe bilanse energii dostarczonej przez urządzenie grzewcze – chłodzące w obręb osłony termicznej parterowej części budynku doświadczalnego, które porównano z wynikami teoretycznymi energii końcowej wyznaczonymi zgodnie z algorytmem charakterystyki energetycznej budynku. Przeprowadzone analizy teoretyczne potwierdziły spełnienie przez budynek doświadczalny wymagań budowlanych i instalacyjnych stawianych przez Passivhaus Institut w Darmstadt. W budynku uzyskano bardzo niski wskaźnik zużycia energii pierwotnej  $70 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$  – aż o 40% poniżej maksymalnej wymaganej wartości. Na podstawie analiz realizowanych w budynku doświadczalnym zauważono rozbieżność między ilością energii dostarczonej (z pomiarów) i wymaganej (obliczenia teoretyczne), przy zachowaniu temperatur wewnętrznych na poziomie komfortu cieplnego. Niezgodność wynika z problemów z regulacją urządzenia grzewczo – chłodniczego, ze stratami ciepła związanymi z dystrybucją przewodami powietrznymi znajdującymi się poza osłoną bilansową budynku oraz z uwzględnienia w obliczeniach teoretycznych stałego strumienia powietrza dostarczanego do budynku. Maksymalne niezamknięcie bilansu można oszacować na poziomie 30%.

**Słowa kluczowe:** budynek pasywny, budynek doświadczalny, mostki cieplne, charakterystyka energetyczna, pomiary, projektowanie

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Małgorzata Basińska, Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Środowiska, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, 61 6652 428, malgorzata.basinska@put.poznan.pl

<sup>2</sup> Halina Koczyk, Politechnika Poznańska, Instytut Inżynierii Środowiska, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, 61 6652 532, halina.koczyk@put.poznan.pl



## 1. Wprowadzenie

Budynek doświadczalny Politechniki Poznańskiej jest jednym z pierwszych w Polsce biurowych budynków pasywnych. Wyposażony jest on w centralę grzewczą – chłodzącą z pompą ciepła współpracującą z gruntowym wymiennikiem ciepła GWC oraz z kolektorem słonecznym.

Modernizacja do standardu pasywnego istniejącego na Politechnice Poznańskiej od 1991 roku budynku realizowana była ze środków własnych Instytutu Inżynierii Środowiska i możliwa była dzięki współpracy z wieloma firmami na zasadzie działań sponsorowanych. Analizy działania instalacji źródła ciepła w budynku wykonywano w ramach projektu badawczego Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego [1].

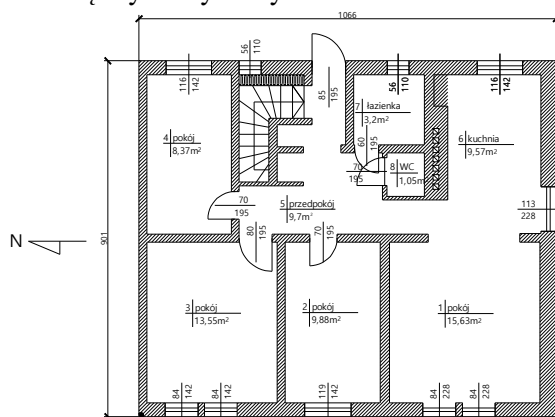
Dom o szkieletcie drewnianym, został przebudowany z zastosowaniem materiałów i elementów dopuszczonych do stosowania w budownictwie energooszczędnym i pasywnym.

## 2. Charakterystyka budynku

### 2.1. Charakterystyka budowlana

Ze względu na doświadczalny charakter obiektu przyjęto funkcję użytkową budynku biurowego. Rzut budynku (Rys. 1) został rozplanowany w taki sposób, aby utworzyć zgrupowanie instalacji wodno – kanalizacyjnych oraz wentylacji wywiewnej w jednym miejscu (łazienka i wc obok siebie). Na parterze zlokalizowano pomieszczenia: strefa wejścia, pokoje pracy biurowej, kuchnia, łazienka, wc. W piwnicy budynku znajdują się pomieszczenia techniczne pełniące również funkcję laboratoryjną. Budynek charakteryzuje prosta budowa ścian, bez zbędnych wykuszy oraz elementów architektonicznych, które dodatkowo

mogłyby zwiększać powierzchnię obudowy budynku.



Rys. 1. Rzut parteru budynku doświadczalnego Politechniki Poznańskiej

Fig. 1. A plan of the ground floor experimental building of Poznan University of Technology

## 2.2. Lokalizacja budynku

Budynek doświadczalny znajduje się na terenie Politechniki Poznańskiej. Powierzchnia terenu jest płaska. Do budynku są doprowadzone przyłącza: wodociągowe, kanalizacyjne, energetyczne, gazowe. Teren jest zadrzewiony, trawiasty, działki sąsiednie są zainwestowane: tereny kampusu Politechniki Poznańskiej. Nawierzchnie utwardzone dojazdu do budynku są pokryte kostką betonową. Działka jest ogrodzona.

## 2.3. Opis konstrukcji budynku

Budynek wykonany jest w konstrukcji drewnianej. Strop nad piwnicą wykonany jest w technologii DZ-3. Konstrukcja dachu jest drewniana z poszyciem z blachodachówki. Elementami konstrukcyjnymi ścian jest ruszt z belek drewnianych o wymiarach 100 x 60 mm, przestrzenie między belkami wypełniono wełną mineralną. Ze względu na charakter obiektu doświadczalnego zdecydowano o wariantowaniu konstrukcji przegród pionowych. Dodatkowe elementy izolacyjne to: styropian, izolacja próżniowa (o 10-krotnie niższej wartości współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$  [W/m/K] niż dla styropianu), elementy systemu Steico. W budynku zamontowano okna oraz drzwi balkonowe pasywne w ramach z PCV z potrójnymi szybami. W przypadku montażu stolarki okiennej i drzwiowej, w celu uniknięcia mostków termicznych, zamontowano okna na zewnątrz elementu konstrukcyjnego, który stanowiła konstrukcja szkieletowa z wypełnieniem wełną mineralną oraz płyta OSB o grubości 12 mm.

Tablica 1. Zestawienie współczynników przenikania ciepła U [W/m<sup>2</sup>/K] dla ścian w budynku doświadczalnym – DoPas

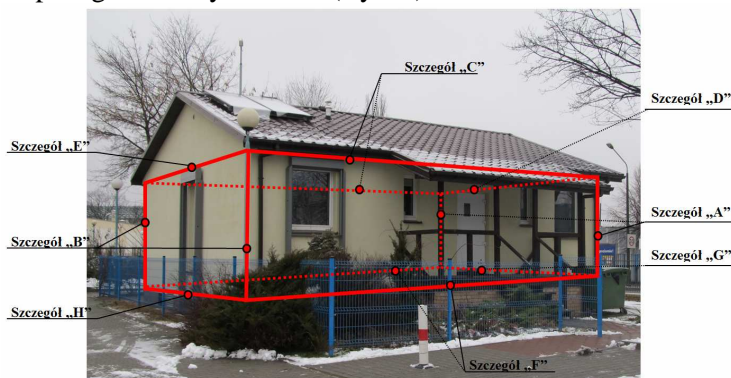
Table 1. Summary of heat transfer coefficients U [W/m<sup>2</sup>/K] for the walls in the experimental building – DoPas

Komponent budowlany	U [W/m <sup>2</sup> /K]	Komponent budowlany	U [W/m <sup>2</sup> /K]
Ściana południowa	0,118	Okna	profile
Ściana północna	0,126		szyba
Ściany wschodnia i zachodnia	0,114	Stropy wewnętrzne	0,115 – 0,140
Ściany podziemia	0,595	Drzwi wejściowe	0,77

Obliczenia współczynników przenikania ciepła przegród budowlanych wykonano zgodnie z algorytmem obliczeń normy [6]. W tablicy 1 przedstawiono zestawienie współczynników przenikania ciepła dla poszczególnych komponentów budowlanych budynku doświadczalnego.

## 2.4. Mostki cieplne

Dla wszystkich połączeń ścian zewnętrznych ze stropem nad piwnicą, stropodachem oraz ościeżnicami okien wyznaczono dwuwymiarowe strumienie ciepła zgodnie z rysunkiem (Rys.2.).



Rys. 2. Lokalizacja miejsc, dla których obliczono liniowy współczynnik przenikania ciepła

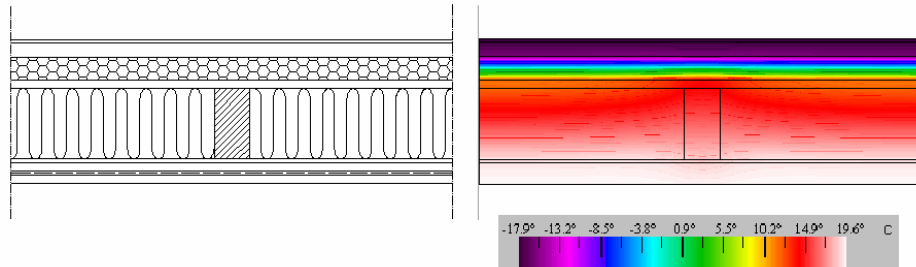
Fig. 2. Location of places for which the calculated linear coefficient of heat transfer

### 2.4.1. Metoda obliczeń

Symulacje komputerowe przebiegu izoterm, możliwość kondensacji pary wodnej oraz wartość liniowego współczynnika przenikania ciepła obliczono w programie i katalogu liniowych mostków cieplnych Eurokobra [2]. Program Therm 5.2 [7] posłużył, do obliczenia pola temperatury detali połączeń stropu nad piwnicą ze ścianą zewnętrzną i z gruntem oraz dla ścian zewnętrznych. Do obliczeń przyjęto następujące warunki brzegowe:  $\theta_e = -18^\circ\text{C}$ ,  $\theta_{int} = 20^\circ\text{C}$ , opory przejmowania ciepła  $R_{se}$  oraz  $R_{si}$  w zależności od kierunku przepływu ciepła przyjęto zgodnie z PN EN ISO 6946 [6].

### 2.4.2. Liniowe mostki cieplne wynikające ze struktury ścian zewnętrznych

Rysunek poniżej przedstawi wyniki symulacji komputerowej rozkładu temperatur w ścianach zewnętrznych obliczone w programie Therm 5.2 [7]. Wyniki symulacji rozkładu temperatur w przegrodzie w okolicach elementu konstrukcyjnego drewnianego pokazują, że pionowe izotermy temperatur tworzą prawie linie równoległe. W technologii dwuwarstwowej ścian szkieletowych drewniany element konstrukcyjny nie wpływa na powstawanie liniowego mostka cieplnego.



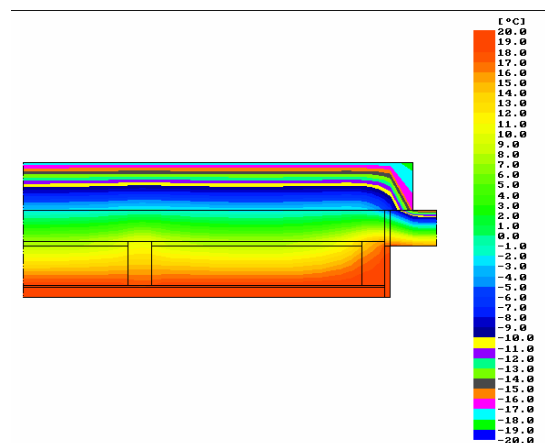
Rys. 3. Przebieg izoterm pionowych w ścianie zewnętrznej północnej, na podstawie [9]

Fig. 3. Isotherms in an external North wall, based on [9]

### 2.4.3. Liniowe mostki cieplne dla montażu stolarki

Okno zamontowano w taki sposób, aby izoterma, przy której może nastąpić wykroplenie pary wodnej nie przebiegała na powierzchni wewnętrznej okna. Przy parametrach powietrza wewnętrznego  $\theta_{\text{int}} = 20^\circ\text{C}$  oraz  $\phi = 50\%$  temperatura punktu rosy wynosi  $\theta_r = 9,3^\circ\text{C}$ . Przy temperaturze obliczeniowej powietrza zewnętrznego na poziomie  $\theta_e = -18^\circ\text{C}$  izoterma punktu rosy przebiega przez środkową część ościeżnicy oraz warstwę izolacji ściany zewnętrznej (Rys. 4). Poniżej przedstawiono zestawienie tabelaryczne oszacowanych wartości mostków cieplnych (Tablica 2).

Z powyższych analiz i przedstawionej tablicy wynika, że budynek doświadczalny jest pozbawiony mostków cieplnych.



Rys. 4. Przebieg izoterm w połączeniu ściany z oknem – przekrój przez ościeżnicę, na podstawie [9]

Fig. 4. Isotherms get through an external wall and a window, based on [9]

Tablica 2. Zestawienie liniowych współczynników przenikania ciepła  $\Psi$  [W/m/K] w DoPas, na podstawie [1, 9]

Table 2. Summary of linear heat transfer coefficients  $\Psi$  [W/m/K] w DoPas, based on [1, 9]

Miejsce w budynku		$\Psi$ [W/m/K] względem wymiarów zewnętrznych
„A”	narożnik ściany zewnętrznej północnej i zachodniej	-0,24
„B”	narożnik ściany zewnętrznej południowej i zachodniej	-0,27
„C”	połączenie ściany zachodniej (wschodniej) ze stropodachem	-0,05
„D”	połączenie ściany północnej ze stropodachem	-0,41
„E”	połączenie ściany południowej ze stropodachem	-0,45
„F”	połączenie ściany zachodniej (wschodniej) ze stropem nad piwnicą	-0,16
„G”	połączenie ściany północnej ze stropem nad piwnicą	-0,24
„H”	połączenie ściany południowej ze stropem nad piwnicą	-0,16
	połączenie ściany zewnętrznej z ościeżnicą - przekrój poziomy	0,05
	połączenie ściany zewnętrznej z ościeżnicą - przekrój przez podokiennik	0,02

### 3. Ocena energetyczna

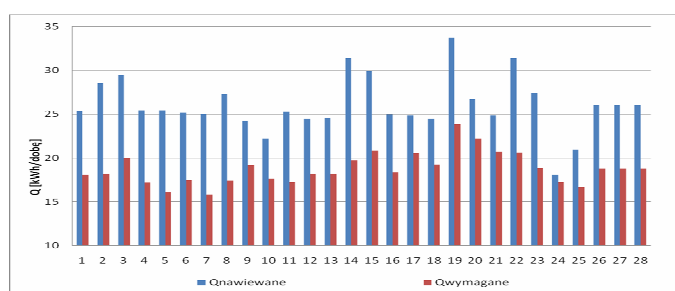
Dla konkretnego budynku (znana charakterystyka cieplna) zlokalizowanego w danych parametrach klimatycznych na zużycie ciepła pomierzone lub teoretyczne wpływa wiele czynników, których ważność wzrasta wraz z obniżaniem potrzeb cieplnych budynku. Można do nich zaliczyć: zyski wewnętrzne od ludzi, oświetlenia, urządzeń zależne od sposobu użytkowania budynku (przyjęto ich wartość w odniesieniu do powierzchni ogrzewanej o regulowanej temperaturze na poziomie  $q_{int}=4,7 \text{ W/m}^2$ ), zyski słoneczne dla przeszklenia zależne od zmiennej w czasie przepuszczalności promieniowania słonecznego, zmienną w czasie temperaturę wewnętrzną w związku z niedoskonałą regulacją instalacji.

#### 3.1. Rzeczywiste i teoretyczne zużycie ciepła

Ocenę rzeczywistego zużycia energii budynku doświadczalnego przeprowadzono w oparciu o wyniki analiz działania źródła energii [1, 3]. W obliczeniach wykorzystano algorytmy obliczeniowe bilansowania strumienia powietrza nawiewanego do pomieszczeń na parterze budynku. Z analiz średnio-

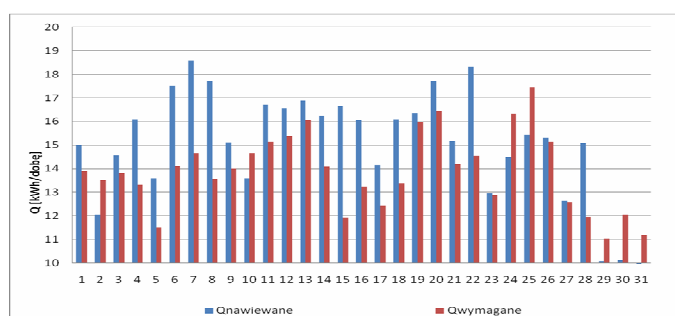
godzinowych wyznaczono ilość energii dostarczonej w poszczególnych dniach analizowanych miesięcy. Przeanalizowano miesiące luty i marzec 2009 roku. Uwzględniono rzeczywiste temperatury w strefach zewnętrznych osłony bilansowej budynku doświadczalnego (piwnica znajdująca się poza osłoną bilansową, powietrze zewnętrzne). W pracy przedstawiono szczegółowe godzinowe bilanse energii dostarczonej przez urządzenie grzewczo – chłodzące w obręb osłony termicznej parterowej części budynku doświadczalnego, które porównano z wynikami teoretycznymi energii końcowej  $Q_{wymagane}$  wyznaczone zgodnie z algorytmem charakterystyki energetycznej budynku.

Na rysunkach (Rys. 5) oraz (Rys. 6) przedstawiono zmienność parametrów bilansu ciepłego w obiekcie doświadczalnym dla wybranych miesięcy okresu pomiarowego. Przy wyznaczaniu strat ciepła na drodze przenikania przez podłogę części parterowej budynku doświadczalnego uwzględniono współczynnik redukcji temperatury przyjmując temperaturę przyległej przestrzeni  $\theta_{p,p.}$  równą temperaturze panującej w piwnicy  $\theta_{piw.}$



Rys. 5. Suma dobowej energii dostarczonej i wymaganej w miesiącu lutym

Fig. 5. The sum of daily energy supplied and required in the month of February



Rys. 6. Suma dobowej energii dostarczonej i wymaganej w miesiącu marcu

Fig. 6. The sum of daily energy supplied and required in the month of March

Analizując zużycie energii w okresie miesięcznym można zauważyć, że w miesiącu lutym  $Q_{\text{nawiewane}}$  kształtowało się na poziomie  $Q_N=729$  kWh/miesiąc, przy potrzebach cieplnych budynku na poziomie  $Q_w=526$  kWh/miesiąc. Dla analizowanego miesiąca marca odpowiednio  $Q_N=465$  kWh/miesiąc,  $Q_w=430$  kWh/miesiąc. Rozbieżność między ilością energii dostarczonej i wymaganej, przy zachowaniu temperatur wewnętrznych na poziomie komfortu cieplnego wynika z problemów z regulacją urządzenia grzewczego – chłodniczego, związane było ze stratami ciepła związanymi z jego dystrybucją przewodami powietrznymi znajdującymi się poza osłoną bilansową budynku oraz z uwzględnienia w obliczeniach teoretycznych stałego strumienia powietrza dostarczanego do budynku (według projektu zgodnie z wymaganiami higienicznymi) na poziomie  $120$  m<sup>3</sup>/h, w rzeczywistości strumień powietrza nawiewanego był zmienny i osiągał wartość nawet  $200$  m<sup>3</sup>/h.

Średnie miesięczne wartości temperatury powietrza wewnętrznego kształtowały się na poziomie odpowiednio dla lutego  $\theta_{\text{int}}^{\text{II}}(\text{m})=21,27^\circ\text{C}$  przy średniej miesięcznej temperaturze powietrza zewnętrznego  $\theta_e^{\text{II}}(\text{m})=-0,13^\circ\text{C}$ , oraz dla marca  $\theta_{\text{int}}^{\text{III}}(\text{m})=20,46^\circ\text{C}$  przy  $\theta_e^{\text{III}}(\text{m})=4,65^\circ\text{C}$ .

### 3.2. Ocena metodą PHPP

Do oceny budynków efektywnych energetycznie wykorzystano pakiet do projektowania, weryfikacji, optymalizacji oraz przygotowania budynków pasywnych pod kątem certyfikacji PHPP [4] według standardów Passivhaus Institut Darmstadt.

Założono, że wszystkie pomieszczenia w części pasywnej budynku znajdują się w jednej strefie temperaturowej. Roczny bilans energii odniesiono do umownej powierzchni ogrzewanej. Zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania dla budynku jest różnicą rocznych strat i zysków ciepła. W bilansie oprócz zysków ciepła od słońca uwzględnia się także zyski ciepła bytowego. Źródłem ciepła jest również ciepło odpadowe od urządzeń elektrycznych, oświetlenia, instalacji wentylacji, ciepłej wody użytkowej oraz ludzi, a także akumulowana w budynku energia słoneczna. Obliczenia zapotrzebowania na ciepło w pakiecie PHPP można wykonać wg metody miesięcznej lub rocznej zgodnie z PN – EN 832 [5] przy użyciu miesięcznych danych klimatycznych dla miasta Poznania. W tabelicy 3 przedstawiono ocenę budynku pasywnego DoPas wykonane zgodnie z algorytmem pakietu PHPP.

Budynek wykazuje większe niż określone przez Passivhaus Institut maksymalne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania. Wynika to z zimniejszego klimatu dla miasta Poznania. Maksymalne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania budynków pasywnych zostało wyznaczone na podstawie badań domu pasywnego w Darmstadt w Niemczech, dla którego minimalne temperatury powietrza zewnętrznego dla dwóch obliczeniowych typów pogody wynoszą:

$\theta_{e1} = -6^{\circ}\text{C}$  i  $\theta_{e2} = -1^{\circ}\text{C}$  [4]. Podczas gdy dla klimatu Poznania są one zdecydowanie niższe:  $\theta_{e1} = -21,2^{\circ}\text{C}$  i  $\theta_{e2} = -19,5^{\circ}\text{C}$ .

W budynku doświadczalnym uzyskano bardzo niski wskaźnik zużycia energii pierwotnej – aż o 40% poniżej maksymalnej wartości wymaganej przez Passivhaus Institut.

Z przedstawionego zestawienia wynika, że budynek spełnia wymagania stawiane budynkom pasywnym.

Tablica 3. Ważniejsze wskaźniki oceny jakościowej dla budynku doświadczalnego DoPas

Table 3. The most important indicators of quality for experimental building DoPas

Wskaźniki oceny		Wartości
1.	Zapotrzebowania energii do ogrzewania	14 kWh/m <sup>2</sup> /a
2.	Wyniki próby ciśnieniowej	0,49 h <sup>-1</sup>
3.	Zapotrzebowania na energię pierwotną (ogrzewania, cwu, en. elektryczna i pozostała en. elektryczna)	70 kWh/m <sup>2</sup> /a
4.	Mocy cieplnej dla ogrzewania	16,9 W/m <sup>2</sup>

### 3.3. Ocena jakościowa budynku doświadczalnego DoPas

Budynek doświadczalny spełnia także kryteria pod względem oszczędności energii cieplnej oraz wykorzystania pasywnych źródeł ciepła. Tablica 4 przed-

Tablica 4. Ocena jakościowa budynku doświadczalnego – wymagania budowlane, na podstawie [9]

Table 4. Qualitative assessment of the experimental building - building requirements, based on [9]

Cecha	Budynek doświadczalny
Konstrukcja pozbawiona liniowych mostków cieplnych	spełnione
Zachowanie ciągłości i grubości izolacji cieplnej przegród zewnętrznych, brak szczelin i pustek powietrznych	spełnione
Zamontowanie folii powietrzno - szczelnej z zachowaniem ciągłości warstwy	spełnione
Okna trójszybowe z powłokami niskoemisyjnymi, przestrzeń między szybami wypełniona gazem szlachetnym, współczynnik przepuszczalności promieniowania słonecznego $g \geq 50\%$	okna trójszybowe wypełnione argonem, średni współczynnik przepuszczalności promieniowania słonecznego $g = 48\%$
Okno zamontowane na jednej linii z izolacją termiczną ściany	spełnione
Pasywne wykorzystanie energii promieniowania słonecznego	okna w południowej ścianie
Stopień akumulacji ciepła przez strukturę budynku	zdolność akumulacji w stropie masywnym nad piwnicą.
Ochrona przed stratami ciepła przez przenikanie	współczynnik kształtu $A/V = 0,73$ , prosta budowa ścian zewnętrznych



stawia podstawowe standardy materiałowo – konstrukcyjne oraz wytyczne dla koncepcji architektonicznej, które zastosowano i osiągnięto podczas remontu budynku.

Najważniejszymi założeniami dotyczącymi wyposażenia technicznego budynków pasywnych jest maksymalny odzysk ciepła z powietrza wentylacyjnego oraz wykorzystanie pasywnych źródeł ciepła. Sprawność odzysku ciepła kompaktowego urządzenia grzewczo – chłodniczego współpracującego z gruntowym wymiennikiem ciepła i instalacją słoneczną jest głównym czynnikiem świadczącym o jakości elementów wyposażenia technicznego pasywnego budynku jednorodzinne. W tablicy 5 przedstawiono główne osiągnięte założenia dotyczące wyposażenia technicznego budynku.

Tablica 5. Ocena jakościowa budynku doświadczalnego – wymagania instalacyjne, na podstawie [9]

Table 5. Qualitative assessment of the experimental building - installation requirements, based on [9]

Cecha	Budynek doświadczalny
Odzysk ciepła	efektywna sprawność odzysku ciepła $\eta_{OC,ef} = 88\%$
Rozdział powietrza wentylacyjnego: strefa nawiewu (pokoje), strefa pośrednia (korytarz, kuchnia), strefa wywiewu (łazienka, wc)	spełnione
Regulacja instalacji	brak przepustnic na poszczególnych obiegach, wentylator z regulacją przepływu, kilka trybów pracy instalacji
Instalacja gruntowego wymiennika ciepła	sprawność GWC $\eta_{GWC} = 17\%$ .
Instalacja słoneczna	powierzchnia absorbera równa $4,6 \text{ m}^2$
Krótkie trasy zaizolowanych termicznie kanałów i przewodów instalacji wewnętrznych prowadzone wewnątrz obudowy termicznej, szczelne przejścia instalacji przez przegrody	spełnione po modernizacji instalacji wentylacyjnej
Energooszczędny sprzęt gospodarstwa domowego	spełnione

#### 4. Podsumowanie

Konieczność budowy budynków niskoenergetycznych i pasywnych została w ostatnich czasie usankcjonowana przepisami prawnymi [8]. Do oceny uzyskanego standardu Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska wprowadził metodę opartą na charakterystyce energii użytkowej (NF40, NF15) oraz na wymaga-

niach stawianych obudowie oraz technice instalacyjnej. Zgodnie z wymaganym algorytmem dla budynku doświadczalnego DoPas wartość energii użytkowej wyznaczono na poziomie 14,3 kWh/m<sup>2</sup>/a. Jednak ocena teoretyczna odbiega znacznie od zużycia rzeczywistego. Na rozbieżność wpływa sposób działania źródła ciepła i chłodu, niekontrolowane straty ciepła, trudne do precyzyjnego oszacowania zyski wewnętrzne mające duży udział w przypadku budynków niskoenergetycznych oraz zmienność deklarowanych temperatur wewnętrznych oraz przepływów powietrza.

## Literatura

- [1] Basińska M. i inni: „Standardy zużycia energii współczesnych budynków i ich wpływ na strukturę i działanie źródła ciepła”. Grant Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego, nr N 523 092 32/3765, 2007 – 2010.
- [2] Eurokobra – komputerowy katalog mostków cieplnych”, Phisibel 2001.
- [3] Magdziarz T.: Analiza działania instalacji ogrzewania, chłodzenia oraz przygotowania cwu w budynku doświadczalnym PP. Praca magisterska pod kierunkiem dr inż. Małgorzaty Basińskiej. Politechnika Poznańska. 2009.
- [4] Pakiet do projektowania budynków pasywnych PHPP. Wymagania dotyczące budynków pasywnych sprawdzonych pod względem jakościowym”. Polski Instytut Budownictwa Pasywnego, Gdańsk 2006.
- [5] PN-EN 832:2001. Właściwości cieplne budynków. Obliczanie zapotrzebowania na energię do ogrzewania. Budynki mieszkalne.
- [6] PN-EN ISO 6946:1996+A1:2003. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- [7] Therm 5.2” LNBL Windows.
- [8] Warunki techniczne jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dz. U. 75, poz.690 wraz z późniejszymi zmianami.
- [9] Wojciechowska E.: Budynek pasywny – teoria a rzeczywistość. Praca magisterska pod kierunkiem dr inż. Małgorzaty Basińskiej. Politechnika Poznańska. 2008.

## ENERGY ESTIMATION OF EXPERIMENTAL PASSIVE BUILDING

### Summary

The paper presents experimental passive building of the Institute of Environmental Engineering, Poznan University of Technology – DoPas. Building of the wooden frame built in 1991, was rebuilt in 2007. Used materials and components approved for use in building energy-efficient and passive. The paper analyzes existing thermal bridges in the building and determine their values.

To evaluate the energy method to package design energy-efficient buildings and a comparative analysis of the actual and theoretical heat consumption for the two months of the heating season was used. For the experimental building performed theoretical analyzes confirmed the compliance building and installation requirements set by Passivhaus Institut w Darmstadt. The building achieved a very low rate of primary energy consumption 70 kWh/m<sup>2</sup>/a - up to 40% below the maximum required value.

On the basis of the analysis carried out in the experimental building noted a discrepancy between the amount of energy supply (measured) and required (theoretical calculations), while maintaining the internal temperature at the level of thermal comfort. The incompatibility of results is connected with control of a heating - cooling unit, with heat loss connected with distribution of air ducts outside the building, the cover carrying, and the theoretical steady stream of air supplied to the building. The maximum difference in the balance sheet can be estimated at 30%.

**Keywords:** passive house, experimental building, thermal bridges, energy performance, measurement, design

DOI:10.7862/rb.2014.72

*Przesłano do redakcji: 20.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 16.12.2014 r.*

Michał BASZEŃ<sup>1</sup>

## WYKORZYSTANIE NIETYPOWYCH MATERIAŁÓW I TECHNOLOGII W BUDYNKACH I OBIEKTACH O KONSTRUKCJI DREWNIANEJ

W pracy przedstawiono przegląd wybranych gatunków drzew tropikalnych takich jak tek czy azobé oraz drzew liściastych (biały dąb amerykański) mogących znaleźć zastosowanie, jako materiał konstrukcyjny we wznoszeniu obiektów o konstrukcji drewnianej, w miejsce powszechnie stosowanej tarcicy drzew iglastych. Przedstawiono właściwości wybranych gatunków drzew oraz przykłady zastosowania ich w zrealizowanych konstrukcjach. W dalszej części pracy dokonano prezentacji wybranych technologii pozwalających na podniesienie trwałości i wytrzymałości konstrukcji drewnianych, jak również pozwalających na skrócenie czasu wznoszenia obiektów budowlanych. Omówiono technologię impregnacji drewna Accoya®, panele CLT oraz budownictwo modułowe. Technologia Accoya® poprzez procesy chemiczne pozwala na usunięcie z drewna związków chemicznych odpowiedzialnych za absorpcję wody w ścianach komórkowych drewna i zastąpienie ich związkami o charakterystyce hydrofobowej. Taki proces pozwala na ograniczenie zawartość wilgoci w drewnie, powodując równoczesny wzrost twardości i odporności tarcicy iglastej do poziomu odpowiadającego drewnu drzew liściastych przy zachowaniu cech pierwotnych drewna poddawane go modyfikacji. Zastosowanie paneli CLT (cross laminated timber) pozwala na ominięcie negatywnej cechy drewna, jaką jest wytrzymałość na kierunku prostopadłym do włókien. Panele wykonane są z warstw drewna klejonego pod kątem prostym, przez co otrzymuje się element konstrukcyjny o wysokiej sztywności i wytrzymałości we wszystkich kierunkach. Czas potrzebny na wzniesienie obiektu budowlanego można znacząco skrócić poprzez zastosowanie budownictwa modułowego. Budynki wznoszone są ze złożonych w zakładach prefabrykacji gotowych modułów w pełni wykończonych w środku.

**Słowa kluczowe:** tarcica drzew tropikalnych i liściastych, drewno Accoya®, panele CLT, budownictwo modułowe

### 1. Wstęp

W budownictwie drewnianym głównym materiałem konstrukcyjnym jest drewno drzew iglastych. Szybki rozwój techniki powoduje, że możliwe staje się

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Michał Baszeń, Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45E/222 Białystok, tel. 797-995-942, m.baszen@kmb.pb.edu.pl.

wprowadzanie na lokalny rynek budowlany materiałów czy też technologii, które dotychczas nie znajdowały tutaj zastosowania. Ograniczeniem pozostaje oczywiście cena, ale w przypadku nietypowych obiektów, koszt zakupu materiałów lub też technologii może stanowić niewielki procent całego kosztu wznieszonego obiektu.

Drewno drzew liściastych znajduje zastosowanie przy produkcji mebli, wykładzin lub paneli podłogowych. Jako elementy konstrukcyjne głównie wykorzystywane jest przy konstruowaniu łodzi. Właściwości materiałowe takie jak wysoka wytrzymałość, sztywność, twardość, odporność na oddziaływania zewnętrzne ( atmosferyczne, biologiczne) pozwala widzieć w drewnie drzew liściastych materiał, który może być zastosowany, jako element konstrukcyjny, osłonowy lub wykończeniowy.

Tarcica drzew iglastych charakteryzuje się skończonością wymiarów poprzecznych, dlatego popularne staje się wykorzystanie elementów klejonych. Pozwala to na zwiększenie potrzebnego przekroju i wykonanie konstrukcji o większych rozpiętościach. Nie eliminuje jednak wady drewna, jaką jest jego niska wytrzymałość na kierunku prostopadłym do włókien. Istnieją jednak technologie pozwalające na wyeliminowanie tego problemu.

## **2. Drewno drzew liściastych**

### **2.1. Gatunki tropikalne**

#### **2.1.1. Tek**

Teczyna wyniosła (*Tectona grandis*) znana powszechnie pod nazwą "tek" jest drzewem tropikalnym rosnącym w stanie naturalnym w południowo-wschodniej Azji. Współcześnie rozległe przemysłowe plantacje rozmieszczone są także w Ameryce Środkowej i Południowej.

Tek jest drzewem, którego drewno charakteryzuje się dużą wytrzymałością i trwałością. Duża naturalna zawartość substancji oleistych powoduje, że jest odporne na działania czynników atmosferycznych i biologicznych. Dzięki czemu znajduje zastosowanie w budownictwie jednostek pływających, jak również w meblarstwie.

Długo uznawano, że drewno rosnące naturalnie jest twardsze i bardziej wytrzymałe niż drzewa hodowane na plantacjach. Aktualne badania dowodzą, że oba rodzaje drewna charakteryzują się podobnymi wymiarami, podobną podatnością na erozję, wypaczenie czy też podobną fakturą, różnica uwidacznia się jedynie w większej podatności drewna z plantacji na zmianę jego koloru w związku z działaniem promieniowania UV [8]. Różnica w wytrzymałości i trwałości drzew z plantacji i rosnących naturalnie wynikała ze zbyt wczesnego ścinania drzew z hodowli, które nie osiągały jeszcze odpowiednich właściwości fizycznych i mechanicznych. Obecnie ten problem już nie występuje.

Duża zawartość substancji oleistych w drewnie teczyny powoduje, że drewno te nie ulega spaceniom w miarę upływu czasu, jest bardzo odporne na korozję biologiczną, nie poddaje się niszczyielskiemu działaniu korników i innych szkodników drzewnych. Drewno te zalicza się do 1 klasy trwałości [10], co oznacza, że jest odporne na oddziaływania biologiczne oraz że jego trwałość bez konieczności remontów to minimum 25 lat.

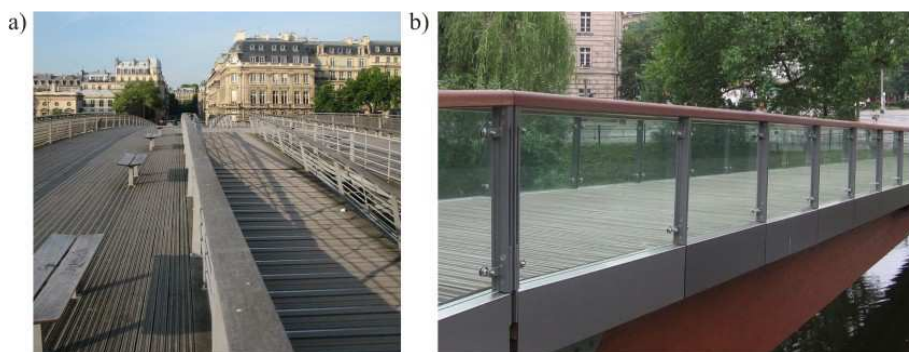
Tek szeroko stosowany jest, jako wykończenie elewacyjne ścian budynków. Duża odporność na działania czynników atmosferycznych powoduje, że nie istnieje potrzeba zabezpieczenia konstrukcji ścian osłonowych, przy równoczesnym zapewnieniu długotrwałego efektu wizualnego.

Drewno tekowe wykorzystywane jest także, jako drewno konstrukcyjne, np. przy wznoszeniu wiat czy też antresoli, czy nawet domków wypoczynkowych. Może być także zastosowane, jako element konstrukcji pomostu w kładkach dla pieszych czy też konstrukcji pomostów żeglarskich.

### 2.1.2. Azobé

Azobé (*Lophira alata*), znane też pod nazwą "red iron wood" jest drzewem rosnącym w wilgotnych lasach tropikalnych głównie zachodniej Afryki, ale sięgająca na wschodzie do pogranicza między Południowym Sudanem, a Ugandą. Drewno azobé jest drewnem bardzo twardym, trudnym do obróbki, o bardzo wysokiej wytrzymałości - moduł Younga zawiera się w zakresie od 22000 do 28500 MPa. Drewno azobé zalicza się do 2 klasy trwałości [10], co oznacza trwałość od 15 do 25 lat.

Ze względu na swoją twardość i trwałość stosowane jest, jako deskowanie pomostu kładek i mostów dla pieszych, jak również, jako podkłady kolejowe.



Rys. 1. Kładki z pomostem z drewna azobé: a) Passerelle Solférino [14], b) Kładka Świebodzka

Fig. 1. Foot-bridges with azobé decking: a) Passerelle Solférino [14], b) Kładka Świebodzka

Przykładem konstrukcji, w której wykorzystano drewno azobé na konstrukcję pomostu jest wzniesiony w roku 1999 w Paryżu most Passerelle Solférino (rys. 1a). W Polsce przykładem takiego rodzaju konstrukcji jest wybu-

dowana w roku 2009 we Wrocławiu Kładka Świebodzka (rys. 1b), tu także drewno azobé użyto na konstrukcję pomostu.

Drewno azobé znajduje także zastosowanie, jako materiał konstrukcyjny. Przykładami realizacji z wykorzystaniem tego drewna są dwa mosty dla ruchu rowerowo-pieszego w Alveringem i oraz przeprawa wodna w Destelbergen w Belgii, jak również łukowy most w Kopenhadze.

## 2.2. Gatunki strefy umiarkowanej

Znaczące połacie Stanów Zjednoczonych zalesione są różnego rodzaju lasami liściastymi. Praktycznie cała wschodnia część tego kraju porośnięta jest takimi gatunkami drzew jak brzoza, różne gatunki dębów czy klonów, tulipanowce, orzechy czy jesiony.

Pomimo, że drewno drzew liściastych wykorzystywane jest głównie, jako produkt meblarski, bardzo dobrze sprawdza się jako konstrukcja podłóg czy też w architekturze wnętrz (jesion amerykański, dąb czerwony amerykański, dąb biały amerykański) [4]. Chociaż wykorzystanie tarcicy liściastej, jako elementów konstrukcyjnych nie jest zbyt częste, to daje bardzo zadawalające efekty.

Przykładem konstrukcji, w której jako drewno konstrukcyjne wykorzystano dąb biały amerykański jest konstrukcja nośna przekrycia atrium budynku Portcullis House w Westminsterze w Wielkiej Brytanii (rys. 2). Budynek, wznoszony w latach 1998-2001, wybudowano jako obiekt mieszczący biura 1/3 członków parlamentu oraz ich współpracowników. Dobudowany został do budynku Westminster Palace, gdzie obraduje parlament Wielkiej Brytanii.



Rys. 2. Konstrukcja przekrycia atrium Portcullis House w Westminsterze [15]

Fig. 2. Roof supporting structure of Portcullis House atrium - Westminster [15]

Przestrzenna prętowa konstrukcja nośna wykonana jest z drewna dębu białego amerykańskiego i utrzymuje przeszklony dach znajdujący się nad atrium [7]. Przeprowadzone badania doświadczalne [7] wykazały, że charakteryzuje się on właściwościami fizycznymi nieznacznie przekraczającymi wielkości odpowiadające klasie D50 [9], co pozwoliło na zastosowanie smukłych elementów o niewielkim przekroju poprzecznym.

### 3. Drewno drzew iglastych

#### 3.1. Drewno impregnowane Accoya®

Grzyby atakując drewno powodują degradację przekroju elementów konstrukcji. Wpływa to bezpośrednio na sztywność i nośność elementu, wymaga zatem stosowania zabezpieczeń antygrzybiczych. Stosowanie impregnatów grzybobójczych niestety ma negatywne oddziaływanie na otaczające środowisko zarówno w trakcie impregnacji, jak i podczas użytkowania konstrukcji, a nawet w procesach utylizacji.

Oczywiście w trosce o środowisko można zastosować drewno gatunków tropikalnych o wysokiej odporności na degradację biologiczną (np. tek czy azobé) lub też rodzimych gatunków drzew liściastych (np. dąb), jednak nie we wszystkich przypadkach jest to możliwe. Przy dużych rozpiętościach, gdy zachodzi konieczność zastosowania drewna klejonego, drewna drzew tropikalnych i liściastych nie znajdują zastosowania, ze względu na słabe wiązanie z klejami, wynikające z dużej zawartości substancji oleistych, które zabezpieczają drewno przed szkodnikami. W takim przypadku dobrym rozwiązaniem jest technologia impregnacji drewna Accoya®.

Drewno Accoya® jest to drewno sosny kalifornijskiej poddawane procesom modyfikacji opracowanych przez Accsys Technologies [6]. W procesach tych grupy hydroksylowe w ścianach komórek drewna zastępowane są przez grupy acetylowe, które ze względu na swoją hydrofobowość zapobiegają wnikaniu wilgoci do drewna. Brak dostępu wilgoci ogranicza pęcznienie drewna oraz uniemożliwia rozwój grzybów. Drewno staje się twardsze, co z kolei uniemożliwia penetrację korników. Drewno Accoya® zalicza się do 1 klasy trwałości o okresie użytkowania równym co najmniej 50 lat na powietrzu i 25 lat w ziemi lub wodzie.

W odróżnieniu od typowej impregnacji gdzie ochrona drewna zapewniana jest dla tarcicy o grubości do ok. 75mm, w przypadku zastosowania technologii Accoya® wymiary przekroju nie mają znaczenia. Wytrzymałość nieznacznie się zmienia, podczas gdy twardość się znacząco zwiększa, a samo drewno jest mniej podatne na zmiany kształtu (pęcznienie, wysychanie).

Drewno pozostaje nadal materiałem biodegradowalnym, niezanieczyszczającym środowiska, o dużej odporności na działanie promieni UV, o naturalnej kolorystyce odpowiadającej danemu gatunkowi drzew.

Drzewo sosny kalifornijskiej zaimpregnowane Accoya® uzyskuje podobną twardość i odporność na grzyby jak drewno drzew tropikalnych, cały czas łatwo poddając się procesom klejenia. Mała podatność na spaczenie i pęcznienie dodatkowo zapewnia lepszą jakość drewna klejonego, aniżeli naturalnego drewna iglastego.

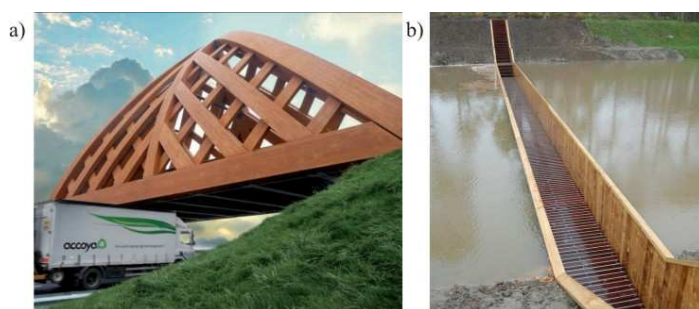
Przeprowadzone testy eksperymentalne [1], [3] pokazują, że drewno lite Accoya® posiada właściwości odpowiadające klasie C24 według [9], zaś pię-



ciowarstwowe drewno klejone Accoya® zawiera się w klasach GL24 do GL32 według [12] przy zastosowaniu tarcicy klasy C27-C35. Jednak według [1], [6] zaleca się przyjmowanie charakterystyk odpowiadających klasie GL24h. Współczynniki  $k_{mod}$  i  $k_{def}$  zaleca się przyjmować jak dla drewna w 3 klasie użytkowania według [11].

Pierwszym obiektem, w którym wykorzystano drewno Accoya®, był wzniesiony w roku 2008 most w Sneek w Holandii (rys. 3a) o rozpiętości 32 m. Trwałość konstrukcji określono na 80 lat. Drugi bliźniaczy most został wzniesiony 2 lata później.

Innym przykładem wykorzystania omawianej technologii jest przeprawa przez ciek wodny w Fort de Roovere w Holandii. Konstrukcja jest ukryta w wodzie, górna jej krawędź znajduje się kilka centymetrów ponad lustrem wody (rys. 3b). Ze względu na swoją konstrukcję nazywana jest mostem Mojżesza.

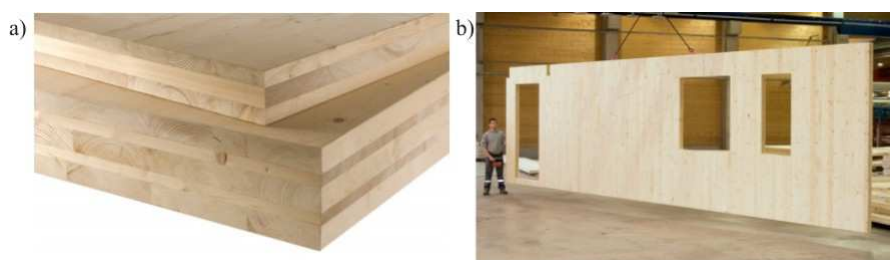


Rys. 3. Konstrukcje z drewna Accoya®: a) most w Sneek [6], b) most Mojżesza [13]

Fig. 3. Construction using Accoya® wood: a) Sneek's bridge [6], b) Moses bridge [13]

### 3.2. Panele CLT

Cross laminated timber (CLT), nazywany czasami także XLams jest to ustrój wykonany z elementów drewnianych klejonych warstwami pod kątem  $90^\circ$ . Minimalna liczba warstw wynosi trzy (rys. 4).



Rys. 4. Panele CLT: a) warstwy, b) ściana w skali naturalnej [2]

Fig. 4. Cross laminated timber: a) layers, b) full-scale wall diaphragm [2]

Ze względu na zastosowanie w panelach CLT diagonalnego ułożenia tarcicy drewnianej otrzymuje się element konstrukcyjny o bardzo wysokiej wytrzymałości i sztywności we wszystkich kierunkach, w odróżnieniu do litego drewna, w którym duża wytrzymałość odnosi się tylko do kierunku wzdłuż włókien.

Panele CLT produkuje się z reguły o wymiarach do 2950mm wysokości i długości 16000mm. Poszczególne warstwy wykonane są z drewna litego klasy C18 do C24, zaś całkowita grubość panelu wynosi do 300mm [2].

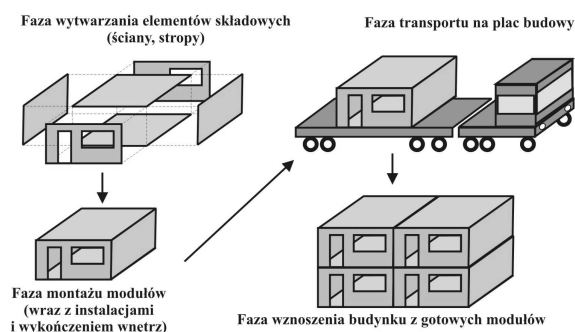
Duża przestrzenna nośność i sztywność pozwala zastosować elementy z CLT w różnego rodzaju konstrukcjach. Jako elementy stropowe w odróżnieniu do typowych stropów szkieletowych, mogą być stosowane jako elementy podparte na wszystkich krawędziach. Dobrze sprawdzają się jako elementy belkowe obciążone dużymi siłami, np. nadproża nad szerokimi otworami drzwiowymi lub okiennymi. W tradycyjnym budownictwie szkieletowym wykorzystywane są jako elementy usztywniające obiekt na działanie sił poziomych.

Badania doświadczalne [13] pokazały bardzo wysoką odporność obiektów wykonanych z paneli CLT na obciążenia sejsmiczne. Analizowano 7 piętrowy budynek w skali rzeczywistej pod obciążeniem modelującym oddziaływania podczas trzęsienia ziemi w Kobe w 1995 (7,2 stopnia w skali Richtera).

Łączniki, które są najsłabszym ogniwem obiektu wykonanego z paneli CLT wykazały dużą zdolność do rozproszenia energii od oddziaływań dynamicznych na cały budynek, równocześnie duża sztywność paneli ściennych i stropowych powodowała, że nie ulegały one destrukcji. Po ustaniu obciążeń wymuszających nastąpiło samo centrowanie budynku.

### 3.3. Budownictwo modułowe

Wznoszenie szkieletowych budynków drewnianych na placach budowy może generować pewne niedogodności. Montaż jest mocno uzależniony od warunków pogodowych, przestrzenna sztywność obiektu nie zawsze jest zadowalająca.



Rys. 5. Fazy wznoszenia budynków modułowych

Fig. 5. Phase of construction of modular buildings

Rozwiązaniem tego typu problemów jest prefabrykacja całych jego segmentów, czyli budownictwo modułowe. Proces wznoszenia budynku można podzielić na cztery fazy (rys. 5). Przy czym dwie pierwsze fazy realizowane są w zakładzie prefabrykacji, a tylko ostatnia na miejscu budowy.

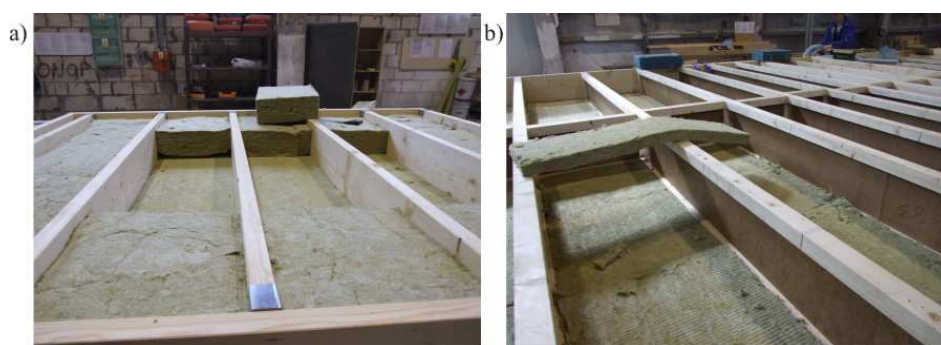
Moduły dostarczane na miejsce budowy są już w pełni wykończone od wewnątrz (podłogi, malowanie, glazura, meble), z poprowadzonymi w środku instalacjami (elektryczna, wodna, grzewcza). Wzniesienie kilkukondygnacyjnego budynku modułowego, łącznie z podłączeniem do instalacji, robotami wykończeniowymi zajmuje kilka dni, zaś same instalacje po ich podłączeniu mogą być uruchomione w ciągu kilku godzin.

Przykładem budownictwa modułowego są domy mieszkalne wytwarzane przez firmę UNIHOUSE z Bielska Podlaskiego, która produkuje takie obiekty wznoszone głównie w Norwegii (rys. 6a). Ze względu na łączenia w jednym segmencie mieszkalnym dwóch modułów, ściana wewnętrzna jest podwójnej grubości w stosunku do ściany zewnętrznej (rys. 6b).



Rys. 6. Modelowy domu modułowy firmy UNIHOUSE: a) widok, b) widok wnętrza

Fig. 6. A model modular home UNIHOUSE company: a) view, b) view of the interior



Rys. 7. Elementy konstrukcji budynków modułowych: a) ściana, b) strop

Fig. 7. Elements of the construction of modular buildings: a) wall, b) floor

Ściany, stropy oraz dach wykonane są jako elementy drewniane szkieletowe. W przypadku ścian zarówno słupki jak i rygle poziome wykonano o przekroju pełnym z litego drewna (rys. 7a), natomiast w elementach poziomych tylko belki obwodowe są o przekroju pełnym, zaś belki nośne wykonane są jako belki dwuteowe o półkach z drewna litego oraz ze środkiem z twardej płyty pilśniowej (rys. 7b). Przekrój dwuteowy zapewnia odpowiednią nośność oraz łatwość poprowadzenia instalacji wewnętrznych.

Budynki te można wznosić w dowolnych warunkach atmosferycznych, przy braku odpadów na placu budowy. Czas realizacji jest zdecydowanie krótszy niż w przypadku tradycyjnych budynków szkieletowych. Obiekty te charakteryzują się doskonałą izolacyjnością cieplną i przyjaznym klimatem wewnętrznym. Dodatkową zaletą jest możliwość demontażu obiektu i przeniesienie go w nowe miejsce.

#### 4. Wnioski

Dostęp do różnorodnych gatunków drzew, jak również do najnowocześniejszych technologii konstruowania obiektów wykonanych z drewna, pozwala na coraz śmielsze projektowanie obiektów. To co dotychczas wydawało się, że jest zarezerwowane tylko dla stali i żelbetu, staje się możliwe także przy wykorzystaniu drewna. Dzięki zastosowaniu paneli CLT, impregnacji Accoya® czy modułowego budownictwa możliwe staje się wznoszenie obiektów o coraz większych rozpiętościach i wysokościach, przy zapewnieniu odpowiednich nośności i sztywności. Równocześnie lekkość tych konstrukcji i szybkość ich montażu powoduje, że stają się rzeczywistą alternatywą dla konstrukcji żelbetowych, stalowych czy też wznoszonych w technologii tradycyjnej.

#### Literatura

- [1] Bongers F., Alexander J., Marcroft J., Crawford D., Hairstans R.: Structural design with Accoya wood, *International Wood Products Journal*, vol. 4, no 3, 2013, pp 172–176.
- [2] Building with cross laminated timber. Load-bearing solid wood components for walls, ceilings and roofs, Studiengemeinschaft Holzleimbau e.V. Wuppertal, Germany 2010.
- [3] Crawford, D., Hairstans, R., Alexander, J., Bongers, F.: Assessment of the structural performance of Accoya® wood, *Proceedings of the 12th World Conference on Timber Engineering*, July 15– 19, 2012, Auckland, New Zealand.
- [4] Długotrwałe amerykańskie drewno liściaste. Przewodnik gatunków drewna. American Hardwood Export Council, <http://americanhardwood.org/pl/>.
- [5] Dujic B., Strus K., Zarnic R., Ceccotti A.: Prediction Of Dynamic Response of a 7-Storey Massive Xlam Wooden Building Tested On a Shaking Table, W: *11th World Conference on Timber Engineering*, Riva del Garda, Trentino, Italy, 2010.
- [6] Lawrence A., Marcroft J., Crawford D., Hairstans R.: Accoya® - modified wood by Accsys Technologies – Structural Design Guide to Eurocode 5, Accoya Folder, Accsys Technologies, 2012.

- [7] Structural Design in American Hardwoods. American Hardwood Export Council, London 2005.
- [8] Williams, R. S., Miller R.: Characteristics of Ten Tropical Hardwoods from Certified Forests in Bolivia, Wood and Fiber Science, vol. 33, no 4, 2001, pp. 618–626.
- [9] PN-EN 338:2011. Drewno konstrukcyjne – Klasy wytrzymałości.
- [10] PN-EN 350-2:2000P. Trwałość drewna i materiałów drewnopochodnych. Naturalna trwałość drewna litego. Wytyczne dotyczące naturalnej trwałości i podatności na nasycanie wybranych gatunków drewna mających znaczenie w Europie.
- [11] PN-EN 1995-1-1:2010. Eurokod 5 - Projektowanie konstrukcji drewnianych – Część 1-1: Postanowienia ogólne – Reguły ogólne i reguły dotyczące budynków.
- [12] PN-EN 14080:2013-07E. Konstrukcje drewniane – Drewno klejone warstwowo i drewno lite klejone warstwowo – Wymagania.
- [13] Foto ©: Forgemind ArchiMedia, <http://www.flickr.com/photos/eager/7669587888/>, licencja CC BY 2.0
- [14] Foto ©: TCY, [http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Passerelle\\_Léopold-Sédar-Senghor.jpg](http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Passerelle_Léopold-Sédar-Senghor.jpg), licencja CC BY-SA 3.0
- [15] Foto ©: murky, <http://www.flickr.com/photos/murky/44112699>, licencja CC BY-NC-ND 2.0

## USE OF NON-STANDARD MATERIALS AND TECHNOLOGIES IN BUILDINGS AND FACILITIES WITH WOODEN CONSTRUCTION

### Summary

The paper presents an overview of some tropical tree species as Teak or Azobé and hardwood (American White Oak ) which can be used as a construction material in place of the commonly used softwood timber. There were presented characteristics of selected wood species and examples of the application in completed structures. In the following of the paper there were presented selected technologies allowing to improve durability and strength of timber structures as well as allowing for shorten the time necessary to erect the buildings. There were discussed Accoya® Technology impregnation, CLT panels and modular buildings.

Accoya® technology by the chemical processes allows for replacing in wood groups responsible for absorption of the water in the wood cell walls by other groups with hydrophobic characteristics. This process helps to reduce the moisture content of the wood, causing a simultaneous increase in hardness and resilience of softwood to the level corresponding to hardwood while maintaining the rest of original features of softwood under modification. The use of CLT (cross laminated timber) panels allows to avoid the negative feature of wood, which is the strength perpendicular to grain. The panels are made of glued wood board layers glued at right angles, thereby obtaining a structural member with high rigidity and strength in all directions. The time needed to erect a construction can be significantly reduced using modular buildings. The buildings are constructed of finished modules fully fitted inside, made in prefabrication factories.

**Keywords:** hardwood, Accoya® wood, CLT (cross laminated timber), modular building

DOI:10.7862/rb.2014.73

*Przesłano do redakcji: 18.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 16.12.2014 r.*

Wojciech BIALIK<sup>1</sup>  
Stanisław GIL<sup>2</sup>  
Piotr MOCEK<sup>3</sup>  
Bogusław GRADON<sup>4</sup>  
Bolesław MACHULEC<sup>5</sup>  
Józef OCHMAN<sup>6</sup>

## **OGRANICZENIE SKUTKÓW EMISJI DITLENKU WĘGLA PRZY WYKORZYSTANIU NATURALNEJ SEKWESTRACJI**

W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania i rozwoju obszarów leśnych o odpowiedniej strukturze drzewostanu, jako ujemnego źródła emisji CO<sub>2</sub> ze szczególnym uwzględnieniem warunków panujących w Polsce. Skala finansowania energetyki jest tak wielka, iż przekierowanie odpowiednich kwot pieniędzy w obszary leśne nie wydaje się być działaniem niewykonalnym. Jedną z możliwości obniżających koszt takiego działania mogłoby być przekazywanie przez agencję rynku rolnego części nieużytków do zalesiania na określony czas, po którym obszar ten jako użytek leśny stawałby się terenem o określonej wartości dodanej. Wykazano, że koszty inwestycji w naturalny sposób pochłaniania CO<sub>2</sub> mogą być nawet dziesięciokrotnie niższe od kosztów budowy instalacji wychwytywania CO<sub>2</sub> ze spalin i magazynowania. Lasy o odpowiedniej strukturze drzewostanu uczestniczą w kształtowaniu poziomu stężeń tego tlenu w atmosferze. Pod względem ekonomicznym inwestowanie w takie źródła wymaga znacznie mniejszych nakładów w porównaniu z proponowanymi metodami sekwestracji dwutlenku węgla. Obecnie wielkość naturalnych źródeł absorpcji CO<sub>2</sub> oraz wysiłki podejmowane w kierunku zwiększenia ich efektywności nie są brane pod uwagę przy doborze kryteriów przydziału limitów emisyjnych poszczególnym krajom Unii Europejskiej. Polska posiada znaczne obszary nieużytków możliwych do zagospodarowania pod uprawy leśne. Zaistnienie odpowiednich przepisów mogłoby stworzyć szansę dla polskiego przemysłu w zakresie dotrzymania zobowiązań proekologicznych przy możliwych do zaakceptowania nakładach finansowych. Problem wymaga dalszych wnikliwych badań.

**Słowa kluczowe:** CO<sub>2</sub>, emisja, globalne ocieplenie, sekwestracja, fotosynteza

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Wojciech Bialik, Politechnika Śląska, 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8, wojciech.bialik@polsl.pl

<sup>2</sup> Stanisław Gil, Pol. Śl., 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8, stanislaw.gil@polsl.pl

<sup>3</sup> Piotr Mocek, Główny Instytut Górnictwa, 40-166 Katowice, Plac Gwarków 1, pmocek@gig.eu

<sup>4</sup> Bogusław Gradon, Pol. Śl., 40-019 K-ce, ul. Krasińskiego 8, boguslaw.gradon@gmail.com

<sup>5</sup> Bolesław Machulec, Pol. Śl., 40-019 -ce, ul. Krasińskiego 8, boleslaw.machulec@polsl.pl

<sup>6</sup> Józef Ochman, Pol. Śl., 40-019 Katowice, ul. Krasińskiego 8, jozef.ochman@polsl.pl

## 1. Wprowadzenie

Prognozy prawdopodobnych zmian klimatycznych sprawiają, że rośnie, zwłaszcza w ostatnich latach, zainteresowanie emisją dwutlenku węgla jako gazu cieplarnianego [1]. Choć gaz ten powstaje w wielu procesach naturalnych, to powszechnie akceptowany jest pogląd, że główną przyczyną obserwowanego wzrostu jego stężeń w atmosferze i prawdopodobnie zakłócenia ziemskiego efektu cieplarnianego jest gwałtowny rozwój działalności gospodarczej człowieka, zwłaszcza procesów spalania paliw kopalnych dla pozyskiwania ciepła i energii elektrycznej. Udział CO<sub>2</sub> w atmosferze ziemskiej wzrósł o ponad 100 ppm w stosunku do okresu przedindustrialnego i ciągle rośnie. Według prognoz Międzynarodowej Agencji Energii (IEA) zapotrzebowanie na energię pierwotną w świecie wzrośnie do 2030 roku o 60% w odniesieniu do roku 2002 [2]. Ponadto przewiduje się, że blisko 90% tego zwiększonego zapotrzebowania będzie pochodzić z paliw kopalnych. Konsekwencją prognozowanych zmian rozwojowych może być wzrost globalnej emisji CO<sub>2</sub> z ok. 23 miliardów ton rocznie rejestrowanych na początku bieżącego stulecia do blisko 46 miliardów ton/rok w latach pięćdziesiątych [3]. Z drugiej strony, coraz bardziej realna groźba globalnego ocieplenia zmusza do podejmowania odpowiednich działań [1]. Szczególnie ambitne cele w tym zakresie stawia sobie Unia Europejska, zakładając obniżenie emisji CO<sub>2</sub> w krajach członkowskich do 2020 roku o 20% w stosunku do emisji z początków stulecia [4].

Koszty ekologiczne [5] stają się coraz bardziej istotnym składnikiem ogólnych kosztów działalności gospodarczej, zwłaszcza w obliczu rysującej się tendencji do zaostrzania limitów emisyjnych przyznawanych w ramach handlu zezwoleniami na emisję. Emitenci zmuszeni są wybierać pomiędzy nakładami na inwestycje proekologiczne, a koniecznością zakupu odpowiedniej ilości zezwoleń. Nie bez znaczenia są również koszty społeczne, objawiające się często wzrostem cen ciepła i energii elektrycznej.

Dostępne obecnie sposoby obniżania emisji CO<sub>2</sub> to między innymi:

- poprawa sprawności energijnej istniejących urządzeń,
- rozwój energetyki jądrowej,
- wykorzystanie bezemisyjnych odnawialnych źródeł energii,
- zwiększenie sprawności elektrowni konwencjonalnych przez zastosowanie kotłów na parametry nadkrytyczne.

Intensywnie badana i rozwijana jest metoda sekwestracji CO<sub>2</sub> w połączeniu ze spalaniem w czystym tlenie. Stosunkowo niewiele uwagi poświęca się roli oraz możliwości intensyfikacji usuwania drobin CO<sub>2</sub> z atmosfery w naturalnym procesie fotosyntezy. W artykule przedstawiono wyniki analizy tego kierunku działań w zestawieniu z metodą sekwestracji dla warunków panujących w Polsce.

## 2. Sekwestracja CO<sub>2</sub>

Usuwanie CO<sub>2</sub> ze spalin i jego sekwestracja pozwala prawie całkowicie wyeliminować emisję tego tlenku z dużych urządzeń cieplnych pod warunkiem uniknięcia emisji wtórnych. Do wysoce skutecznych metod usuwania CO<sub>2</sub> należą metody membranowe i absorpcyjne z regeneracją sorbentu [6]. Metody te, możliwe do realizacji w skali wielkoprzemysłowej, prowadzą do otrzymania stężonego roztworu o zawartości dwutlenku węgla powyżej 90%. Roztwór taki mógłby być następnie wtlaczany w otwory geologiczne lub głębiny morskie. Do najbardziej efektywnych metod, spośród dotychczas opracowanych, należy metoda polegająca na separacji CO<sub>2</sub> na membranach, a następnie wtlaczaniu go w wodę morską bezpośrednio w elektrowni. Proces przebiega podczas przepływu spalin przez warstwę rozdrobnionego kamienia wapiennego ciągle zwilżanego wodą [7]. W rezultacie woda zostaje nasycona dwuwęglanami i jest odprowadzana do morza. Koszt usuwania CO<sub>2</sub> tą metodą dla elektrowni w obszarach nadmorskich waha się w granicach od 40 do 140 pln/MgCO<sub>2</sub>. Jej wadą jest możliwość występowania zaburzeń w pływach oceanicznych.

W warunkach polskich koszty budowy instalacji pochłaniającej zakładaną wartość 20% emisji CO<sub>2</sub> wraz z kosztami eksploatacji w założonym okresie 25 lat oscylują wokół wartości 1,0-1,5 pln/W. Sam koszt składowania w zależności od typu instalacji wynosi 0,1 do 0,14 pln/kWh dla bloków parowo gazowych, 0,21 do 0,42 pln/kWh dla kotła pyłowego i 0,14 do 0,25 pln/kWh dla kotła działającego w zintegrowanym cyklu ze zgazowaniem węgla [8]. Sumy te składają się na wartość dodaną kosztów energii elektrycznej w wysokości 0,37 do 0,83 pln/kWh. Ponoszenie takich kosztów przez energetykę zawodową może przy obecnych taryfach prowadzić do nieakceptowanego społecznie nawet pięciokrotnego wzrostu cen energii elektrycznej.

Krytycy metody sekwestracji, zwłaszcza składowania CO<sub>2</sub> w jamach geologicznych zwracają uwagę na możliwość wystąpienia wtórnych emisji wskutek dyfuzji tlenku w kierunku powierzchni Ziemi. Należy również zauważyć, że metody sorpcyjne nie są technologiami bezodpadowymi, a produkty sorpcji nie nadają się w pełni do ponownego wykorzystania. Zastosowanie sekwestracji może spowodować spadek skumulowanej sprawności obiegu elektrociepłowni o ok. 7 do 10%. Przy wysokich kosztach utylizacji CO<sub>2</sub> może się zdarzyć, że w wyniku kalkulacji ekonomicznej producenci energii przyjmą opłaty za emisje jako bardziej opłacalne, wstrzymując tym samym inwestycje proekologiczne.

## 3. Sorpcja CO<sub>2</sub> przez obszary leśne

W ramach badań problemu przeprowadzono symulację dodatkowego zalesienia obszarów nieużytków. Przyjęto przy tym następujące założenia:

- pełna eksploatacja lasu rozpoczyna się po 50 latach,



- sadzone są lasy mieszane charakterystyczne dla pierwotnego drzewostanu Polski.

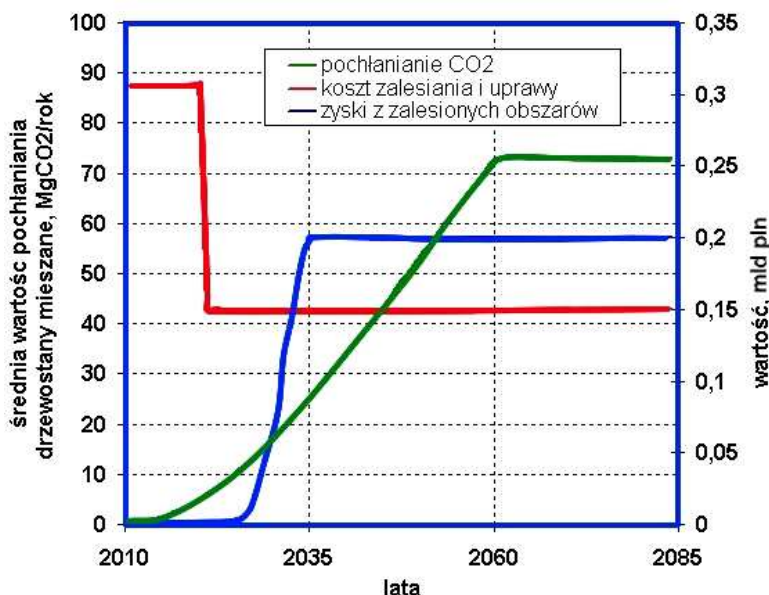
Przeprowadzono również obliczenia dla obiegów współspalania biomasy z węglem. Obliczenia wykonano dla dwóch mieszanin węgla i biomasy: o zawartości 20% i 5% masowych pierwiastka węgla z biomasy. W obydwu przypadkach 25% wkładu biomasy stanowiły odpady drzewne pozyskiwane z upraw własnych. Na podstawie analiz dostępnych danych dla drzewostanów charakterystycznych dla Polski [9] wyznaczono wartości pochłaniania CO<sub>2</sub>.

Rezultaty badań dotyczą drzewostanów z całego obszaru naszego kraju. Badania zamieszczone w pracy [9] pozwoliły określić szybkość pochłaniania różnego typu drzewostanów. Zakładając addytywność wartości pochłaniania mieszanego drzewostanu wyznaczano zdolności akumulacji CO<sub>2</sub> dla różnego rodzaju nasadzeń. Kalkulacja ekonomiczna pokazała (rys. 1), że w obecnej sytuacji rynkowej najlepszą metodą absorpcji CO<sub>2</sub> może być zwiększanie areałów upraw leśnych, szczególnie lasów mieszanych ze zróżnicowaną strukturą biologiczną odporną na szkodniki.

Całkowite koszty uprawy z uwzględnieniem przygotowania, nawożenia i walki ze szkodnikami kształtuje się na poziomie 4000 zł/hektar. Wykup ziemi z zasobów Agencji Własności Rolnej Skarbu Państwa po cenach rynkowych to koszt rzędu 8000 zł/hektar. Możliwe są dwie opcje: w pierwszej ziemia jest zalesiana w ramach własności państwowej, a w drugiej kupowana z zasobów nieużytków rolnych. W pierwszym przypadku koszty jednostkowe wynoszą 0,46 zł/W (0,12 zł/kWh) dla starych instalacji o sprawności 0,36 współspalających 20% biomasy i 0,32 zł/W (0,09 zł/kWh) dla instalacji nowych o sprawności 45%. Przy wykupie gleby z zasobów nieużytków rolnych wartości te wynoszą kolejno 0,36 zł/kWh oraz 0,27 zł/kWh. W analizie obydwu opcji przyjęto minimalną wartość pochłaniania CO<sub>2</sub> na poziomie 72 MgCO<sub>2</sub>/(rok-hektar).

Jak widać z przeprowadzonych kalkulacji, prezentowany kierunek działania może stanowić bardzo interesujące rozwiązanie z punktu widzenia kosztów energii. Przynosi on również inne korzyści społeczne wynikające z rozsądnie prowadzonej strategii zalesiania. Warto podkreślić, że prezentowana analiza została przeprowadzona dla założonego pochłaniania pięciokrotnie większej ilości CO<sub>2</sub>, niż miało to miejsce w przypadku analiz ekonomicznych układów absorpcyjno-desorpcyjnych.

Lasy zajmują około 28% obszaru Polski. Planuje się, że do 2020 roku ich powierzchnia powiększy się o dodatkowe 2%. Kompensacja 40% całkowitej emisji przemysłowej CO<sub>2</sub>, jeśli przyjąć ją na poziomie uprawnień, czyli 208.5 Mg/rok wymagałaby zwiększenia tej powierzchni o dalsze 4%. Inwestycją w ramach omawianej metody byłoby zatem powiększenie obszaru zalesionego kosztem nieużytków do 33-34% terytorium naszego kraju, co jest możliwe do osiągnięcia.



Rys. 1. Przewidywane efekty zalesienia obszaru nieużytków o powierzchni  $2 \times 10^6$  hektarów

Fig. 1. The predicted effects of afforestation of wastelands of  $2 \times 10^6$  ha

Skala finansowania energetyki jest tak wielka, iż przekierowanie odpowiednich kwot pieniędzy w obszary leśne nie wydaje się być działaniem niewykonalnym. Jedną z możliwości obniżających koszt takiego działania mogłoby być przekazywanie przez agencję rynku rolnego części nieużytków do zalesienia na określony czas, po którym obszar ten jako użytek leśny stawałby się terenem o określonej wartości dodanej. Interesująca jest również możliwość pozyskiwania w sposób racjonalny z obszarów zalesionych przez sektor energetyczny określonych ilości biomasy w postaci naturalnego odpadu drzewnego. Taka internalizacja działań może zatem dawać wiele pożytecznych efektów. Należy również pamiętać o walorach rekreacyjnych nowych kompleksów leśnych.

Lasy o odpowiedniej strukturze drzewostanu stanowią „ujemne źródło” CO<sub>2</sub>, uczestniczące w kształtowaniu poziomu stężeń tego tlenu w atmosferze. Pod względem ekonomicznym inwestowanie w takie źródła wymaga znacznie mniejszych nakładów w porównaniu z proponowanymi metodami sekwestracji dwutlenku węgla.

Obecnie wielkość naturalnych źródeł absorpcji CO<sub>2</sub> oraz wysiłki podejmowane w kierunku zwiększenia ich efektywności nie są brane pod uwagę przy doborze kryteriów przydziału limitów emisyjnych poszczególnym krajom Unii Europejskiej. Polska posiada znaczne obszary nieużytków możliwych do zagospodarowania pod uprawy leśne. Zaistnienie odpowiednich przepisów mogłoby

stworzyć szansę dla polskiego przemysłu w zakresie dotrzymania zobowiązań proekologicznych przy możliwych do zaakceptowania nakładach finansowych. Problem wymaga dalszych wnikliwych badań.

#### 4. Wnioski

- Prowadzenie planowanej gospodarki leśnej przynosi wymierne korzyści całemu środowisku przyrodniczemu, zalesienie pierwotnymi drzewostanami w całym cyklu działania charakteryzuje się zarówno niższą kosztocłonnością jak i znacznie niższą ilością odpadowych substancji w odniesieniu do sorpcji chemicznej.
- Koszt inwestycji w lasy jako źródło usuwania drobin CO<sub>2</sub> z atmosfery jest około dziesięć razy niższy od kosztów inwestycji w technologie sekwestracji.
- Polityka zamiennego zalesiania w skali globalnej nie tylko pozwoli zmniejszyć emisje, ale może również w rezultacie zmniejszać stężenia CO<sub>2</sub> w atmosferze.
- Rozwój naturalnych metod usuwania CO<sub>2</sub> z atmosfery wymaga zmiany kryteriów przyznawania limitów emisji CO<sub>2</sub> dla krajów UE, tak, aby były one powiązane z wielkością obszarów zalesionych w danym kraju oraz wysiłkami podejmowanymi w kierunku zwiększenia ich efektywności.

#### Literatura

- [1] IPCC Fourth Assessment Report 2007.
- [2] World Energy Outlook 2004, International Energy Agency, (61 2004 25 1P1)ISBN-92-64-1081-73-2004, <http://www.iea.org/textbase/nppdf/free/2004/weo2004.pdf> [dostęp: 2010 r.].
- [3] Pacala S., Sokolow R.: Stabilization wedges: solving the climate problem for the next 50 years with current technologies, *Science*, 305, 5686, 2004, pp. 968-972.
- [4] [http://ec.europa.eu/environment/climat/climate\\_action.htm](http://ec.europa.eu/environment/climat/climate_action.htm) [dostęp: 2010 r.].
- [5] Pigou A.C.: *The Economics of Welfare* (4-th edition), Macmillan and Co., London 1932.
- [6] Pacheco M.A.: *Mass Transfer, Kinetics and Rate-Based Modeling of Reactive Absorption*, The University of Texas at Austin, 1998.
- [7] Rau G.H., Caldeira K.: Minimizing Effects of CO<sub>2</sub> Storage in Oceans, *Science* 11, 295, 2002, pp. 275–276.
- [8] Balcewicz J.: Podziemna sekwestracja dwutlenku węgla, *Gigawat Energia*, nr 2, 2006.
- [9] Zianis D., Makipaa R., Mencuccini M.: Biomass and Stem Volume Equations for Tree Species In Europe, *Silva Fennica* 4, 2005.

## LIMITATION OF THE IMPACT OF CARBON DIOXIDE EMISSIONS USING NATURAL SEQUESTRATION

### Summary

The article presents an analysis of the use and development the forest areas about the appropriate structure tree stand as negative sources of CO<sub>2</sub> emissions with particular emphasis on conditions in Poland. Financing scale of power industry is so large that the redirecting of appropriate amounts of money in forest areas does not seem to be an impossible action. One possibility to lower the cost of such action would be forwarding uncultivated by an agricultural market agency for afforestation for a limited time, after which the forest terrain would become an area of a specific added value. It has been shown that the investment cost of natural way CO<sub>2</sub> absorption can be up to ten times lower than the cost of plant construction to capture CO<sub>2</sub> from the flue gas and storage. Forests of suitable stand structure take part in the level of concentration of the oxide in the atmosphere. In economic terms, investing in such sources requires much less effort compared with the proposed methods of carbon dioxide sequestration. Currently, the volume of natural sources of CO<sub>2</sub> absorption and efforts to increase their efficiency are not taken into considered when selecting the criteria for the allocation of emission limits to individual countries of the European Union. Poland has vast areas of wastelands possible to development under plantation forestry. The occurrence of the relevant provisions could create an opportunity for the Polish industry in terms of its commitments under the environmental acceptable cost. The problem requires further in-depth research.

**Keywords:** carbon dioxide emission, global warming, sequestration, photosynthesis

DOI:10.7862/rb.2014.74

*Przesłano do redakcji: 18.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 16.12.2014 r.*



Artur BOROWCZYŃSKI<sup>1</sup>  
Dariusz HEIM<sup>2</sup>

## PORÓWNANIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ BUDYNKÓW Z WYBRANYMI SYSTEMAMI STEROWANIA INSTALACJĄ OGRZEWczą

Artykuł zawiera analizę porównawczą wybranych modeli sterowania systemem ogrzewania w odniesieniu do ich efektywności energetycznej. Analiza dotyczy pomieszczenia biurowego o zmniejszonym zapotrzebowaniu na energię. Pomieszczenie przeznaczone jest do pracy z komputerem jednej osoby w średnim wieku. Biuro jest użytkowane jedynie w dni robocze przez 8 godzin. Proponowanym rozwiązaniem energooszczędnym jest zastosowanie systemów zarządzania budynkiem BMS. W pracy zostało opisanych pięć algorytmów sterowania instalacją ogrzewczą. Określono model ich pracy i omówiono charakterystyczne cechy. Wykonano model obliczeniowy właściwie opisujący parametry pomieszczenia, obliczenia przeprowadzono dla danych klimatycznych wg. ISO dla Łodzi, dla pojedynczego tygodnia zimowego. Wykonano symulacje z uwzględnieniem dynamiki procesów cieplnych za pomocą programu ESP-r. W wynikach pokazano profile temperatury dla każdego z systemów. Zwrócono uwagę na ich nieregularny przebieg. Zaprezentowano również rezultaty wskaźników komfortu cieplnego, jako kryterium wykorzystano wskaźnik PPD. Ostatnie wyniki dotyczą zapotrzebowania na energię do ogrzewania dla całego tygodnia. Najbardziej energooszczędnym okazał się sterownik PID, najmniej adaptacyjny. Z kolei najwyższy komfort odnotowano dla sterownika adaptacyjnego oraz wielostopniowego, najmniejszy dla regulatora PID. Przeprowadzona analiza pozwala stwierdzić, że wybór modelu sterowania ma znaczący wpływ na efektywność energetyczną i jakość środowiska wewnętrznego. Ponadto, dla rozpatrywanych modeli większa oszczędność energii przekłada się na pogorszenie parametrów komfortu.

**Słowa kluczowe:** energia, komfort cieplny, system ogrzewczy, systemy zarządzania budynkiem, model sterowania

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Artur Borowczyński, mgr inż., Katedra Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, 90-924 Łódź, ul. Wólczańska 213, tel. 608-226-552, e-mail: artur.borowczynski@wipos.p.lodz.pl

<sup>2</sup> Dariusz Heim, dr. hab. inż., Katedra Inżynierii Środowiska, Politechnika Łódzka, 90-924 Łódź, ul. Wólczańska 213, tel. (42) 631-37-82, e-mail: dariusz.heim@p.lodz.pl

## 1. Wprowadzenie

Postępujący wzrost gospodarczy i rozwój technologiczny mają negatywny wpływ na zużycie energii pierwotnej. Szacuje się, że w krajach Unii Europejskiej sektor budowlany jest odpowiedzialny za konsumpcję nawet do 40% całkowitej energii, z czego dla budynków biurowych około 50% stanowi energia przeznaczana na ogrzewanie, wentylację oraz klimatyzację [5]. Dlatego zabiegi mające na celu zmniejszenie zapotrzebowania na energię zyskują coraz większe znaczenie przy projektowaniu i modernizacji budynków. Przejawia się to również w polityce europejskiej, poprzez wprowadzenie systemu certyfikacji energetycznej oraz wielu restrykcyjnych przepisów prawnych [4].

Jednym ze sposobów ograniczenia zużycia energii jest zastosowanie systemów zarządzania budynkiem (*ang. Building Management Systems, BMS*) dedykowanych kontroli systemów ogrzewania. Istnieje wiele algorytmów sterujących, pozwalających na swobodne dostosowanie parametrów źródła ciepła, czasu jego pracy czy temperatury czynnika grzewczego przy jednoczesnej efektywnej i optymalnej energetycznie pracy układu grzewczego [2, 8]. Jednak ważnym aspektem, szczególnie w obiektach biurowych, jest także jakość środowiska wewnętrznego. Prowadzone badania wykazały [3], że komfort termiczny użytkowników jest istotny i znacząco wpływa na wydajność pracy.

Celem artykułu jest analiza pięciu wybranych modeli sterowania systemem ogrzewczym pod kątem efektywności energetycznej oraz jakości środowiska wewnętrznego. Praca ma na celu pokazanie wyraźnego związku pomiędzy zużyciem energii a komfortem termicznym użytkowników. W celu pokazania powyższej zależności przeprowadzono symulacje z wykorzystaniem programu ESP-r na podstawie rzeczywistego pomieszczenia biurowego o zmniejszonym zapotrzebowaniu na energię.

## 2. Modele sterowania

### 2.1. Idealny model sterowania (I)

Pierwszy z analizowanych modeli sterowania to idealny regulator pracujący na zasadzie przełącznika włącz/wyłącz. Opisuje go najprostszy z modeli sterowania. Dla potrzeb ogrzewania niezbędne jest zdefiniowanie jedynie trzech parametrów: minimalnej i maksymalnej mocy cieplnej źródła oraz temperatury powietrza wewnętrznego. Po rozpoczęciu pracy sterownik dąży do osiągnięcia zadanej temperatury, która zostaje utrzymywana na stałym, niezmiennym poziomie. Model sterowania jest nazwany idealnym, jednak tak idealne sterowanie jest niemal niemożliwe do osiągnięcia w praktyce. Niezwykle trudne jest utrzymanie stałej zadanej temperatury na niezmiennym poziomie w dynamicznie zmieniających się warunkach termicznych, wobec tego jest to idealizacja modelu fizycznego zachowania się budynku.

## 2.2. Sterownik PID (II)

Regulator PID (proporcjonalno-całkująco-różniczkujący) wykorzystuje bardzo powszechny model sterowania, stosowanym również szeroko w przemyśle. Ze względu na trzy składowe działania algorytmu, sterownik jest w stanie znacznie ograniczyć odchyły od wartości zadanej. Człon całkujący zapobiega nagromadzeniu się uchybów podczas dłuższej pracy, natomiast różniczkujący odpowiada za ograniczenie oscylacji w przypadku dynamicznych zmian mierzonej wartości. Połączenie tych własności pozwala na precyzyjne operowanie sterowaną wartością w zadanym przez użytkownika zakresie [6].

## 2.3. Wielostopniowy model sterowania (III)

Regulator wielostopniowy z histerezą bazuje na efektywnym zarządzaniu źródłem ciepła. Sterownik zakłada kilkusetapową pracę, przy np. trzech zdefiniowanych parametrach mocy źródła. Energia na ogrzewanie jest dostarczana etapami, jeżeli dana pojemność cieplna jest wystarczająca, sterownik pracuje w jednym trybie. Jeżeli wymagane jest zwiększenie bądź zmniejszenie mocy, sterownik przełącza tryb źródła. Dodatkowo model zakłada wykorzystania histerezy, czyli pozwala na regulowanie temperatury np. w zakresie 2 K większym bądź mniejszym od ustalonej. Przekłada się to na bardziej wydajne wykorzystanie poszczególnych trybów pracy źródła, powoduje jednak zjawisko oscylacji temperatury odczuwalnej.

## 2.4. Adaptacyjny model sterowania (IV)

Adaptacyjny model sterowania pozwala na częściowe uwzględnienie komfortu termicznego użytkowników pomieszczenia. Realizowany jest przez dwa parametry: średnią odpowiedź na temperaturę oraz ograniczenie temperatury. Na podstawie pierwszego z nich i zadanej temperatury model oblicza właściwą temperaturę niezbędną dla zapewnienia wysokiej jakości komfortu wewnętrznego. Drugi parametr służy do ograniczenia pracy źródła, bez względu na wynik obliczeń komfortu cieplnego (ograniczenie dużych wahań temperatury).

## 2.5. Regulator temperatury powietrza o stałej objętości (V)

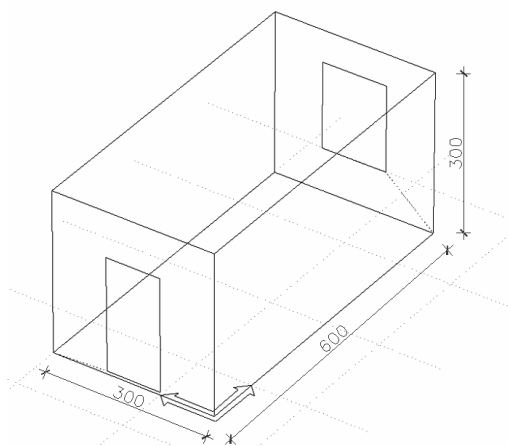
Ostatni model sterowania stosowany jest w przypadku, kiedy ogrzewanie odbywa się za pomocą powietrza. Przy założeniu stałego strumienia przepływu objętość powietrza w pomieszczeniu nie zmienia się w czasie. Koniecznym jest również określenie zakresu temperatur wdmuchiwanego powietrza. System sprawdza się w instalacjach wentylacji mechanicznej, także podczas chłodzenia. Zaletą tego rozwiązania jest również stały profil temperatury.



### 3. Model obliczeniowy

Jako wzór do modelowania przyjęto rzeczywiste pomieszczenie znajdujące się w budynku Instytutu Papiernictwa i Poligrafii Politechniki Łódzkiej i przeznaczone do modernizacji. Aby poprawić charakterystykę energetyczną pomieszczenia, do istniejących konstrukcji ścian została dodana 15 centymetrowa warstwa izolacji termicznej (wełna mineralna) oraz wyeliminowano występujące mostki termiczne. Tak więc pomieszczenie należy rozpatrywać w kategoriach obniżonego zapotrzebowania na energię.

Pomieszczenie jest o szerokości 3 m, długości 6 m i wysokości 3 m, co daje łączną powierzchnię użytkową  $18 \text{ m}^2$ . Podstawową budowę ścian stanowi warstwa konstrukcyjna (różniąca się w zależności od rodzaju ściany), warstwa izolacji w postaci wełny mineralnej, płyta gipsowo-kartonowa oraz tynk. Stropy są konstrukcji betonowej izolowanej styropianem, posadzka wykonana jest z płytek ceramicznych. Pojedyncze okno podwójnie oszklone o wymiarach 1,2 m na 1,6 m znajduje się na ścianie zewnętrznej. Wejście do pomieszczenia stanowią drzwi drewniane o wymiarach 1,0 m na 2,1 m.



Rys. 1. Geometria modelu w ESP-r

Fig. 1. The geometry of model in the ESP-r

Pomieszczenie jest typu biurowego, przeznaczone do pracy z komputerem w pozycji siedzącej jednej osoby w średnim wieku. Dla potrzeb oceny komfortu wewnętrznego założono, że wykonywana praca jest średnio intensywna ( $70 \text{ W/m}^2$ ) oraz że osoba jest ciepło ubrana ( $0,9 \text{ clo}$ ), w sposób właściwy dla zimowego okresu. Wewnątrz znajduje się komputer stacjonarny z monitorem i drukarką. Biuro jest wyposażone w podstawowe meble, oświetlane jest przez układ dwóch lamp. W celu określenia wewnętrznych zysków ciepła oraz strumienia powietrza przypadającego na jedną osobę wykorzystano dane z [1].

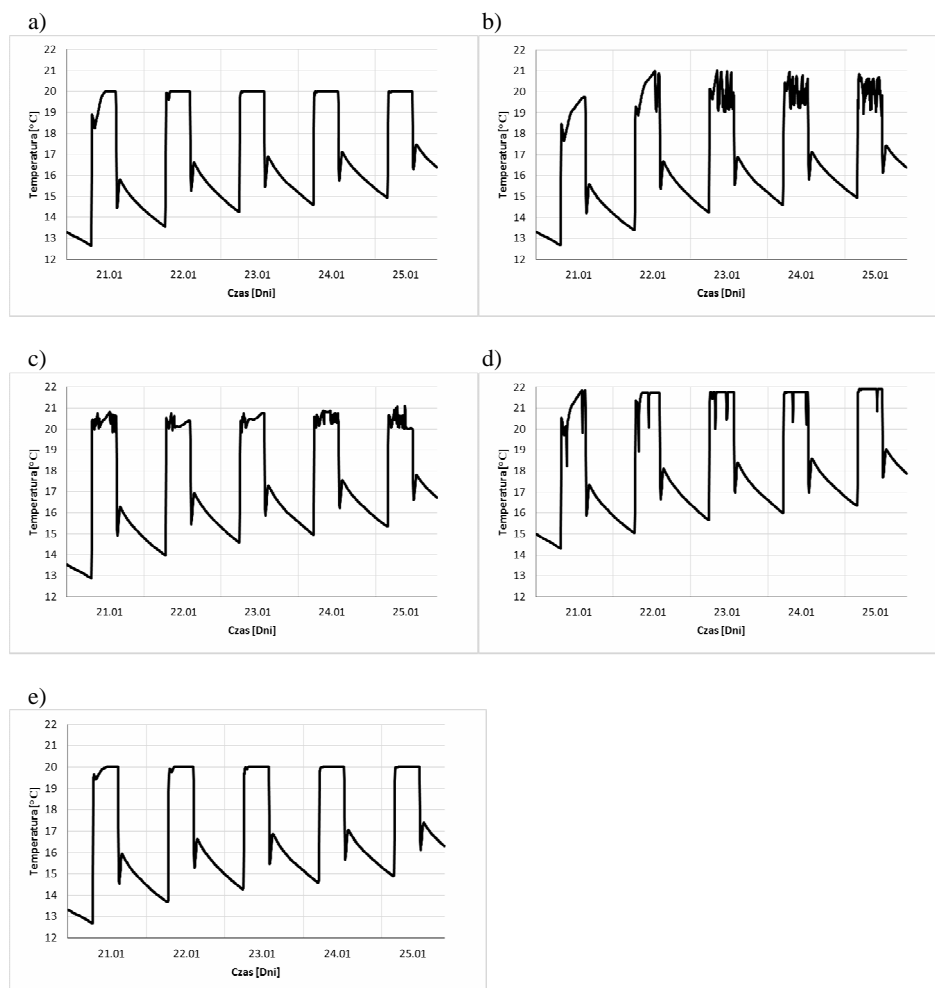
Dane klimatyczne przyjęto jako dane dla typowego roku meteorologicznego ISO dla miasta Łodzi [7]. Analiza zakłada sterowanie ogrzewaniem, w związku z tym jako okres prowadzenia obliczeń przyjęto tydzień od 21 do 27 stycznia, kiedy to odnotowano najniższe temperatury powietrza zewnętrznego.

Dla potrzeb symulacji założono, że użytkowanie pomieszczenia w dni robocze odbywa się od godziny 8:00 do 16:00, w weekend biuro jest nieużytkowane. Pomieszczenie zasilane jest przez system ogrzewania powietrznego o maksymalnej mocy równej 1 kW. Zadaniem systemu sterowania jest ogrzanie pomieszczenia do temperatury 20 °C i utrzymanie jej na stałym poziomie w czasie użytkowania biura.

Tak zdefiniowany model został wprowadzony do programu ESP-r, który pozwala na analizę procesów fizyko-budowlanych zachodzących w budynkach. Symulacje zostały przeprowadzone dla każdego z wariantów sterowania, z krokiem czasowym wynoszącym 5 minut.

#### 4. Wyniki

Przeprowadzona analiza wykazała, że dobór systemu sterowania ogrzewaniem ma kluczowe znaczenie dla czasowego rozkładu temperatury w pomieszczeniu. Profil zmiany temperatury dla regulatorów I oraz V jest bardziej stabilny, natomiast dla pozostałych regulatorów można zauważyć wyraźne oscylacje wokół temperatury docelowej. Związane jest to z odmiennym algorytmem sterowania każdego z nich. Należy jednak zauważyć, że zmiany te przebiegają stopniowo, w przeciągu kilkunastu lub kilkudziesięciu minut, dlatego nie są odczuwalne dla człowieka. Ponadto efektywność sterowania jest różna w zależności od dni poprzedzających okres ogrzewania. Dla poniedziałku następującego po dwóch dniach bez ogrzewania (weekend) jest zdecydowanie niższa niż dla piątku (po czterech dniach ogrzewania), pomimo nocnego osłabienia.

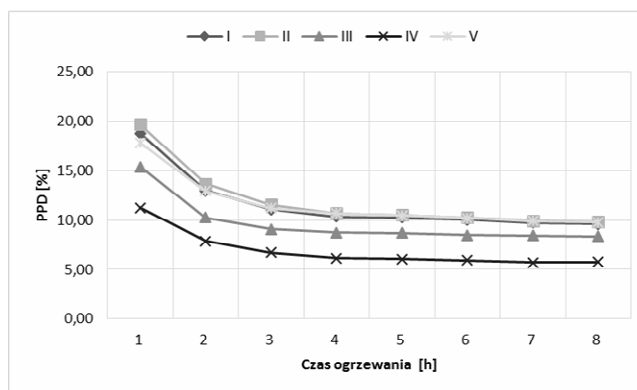


Rys. 2. Tygodniowy rozkład temperatury w pomieszczeniu dla a) I, b) II, c) III, d) IV, e) V

Fig. 2. The weekly temperature distribution in room for a) I, b) II, c) III, d) IV, e) V

Do oceny parametrów komfortu wewnętrznego wykorzystano wskaźnik PPD (*ang. Predicted Percent of Dissatisfied People*), który pozwala oszacować procent osób niezadowolonych z parametrów środowiska wewnętrznego. Wskaźnik ten zależy od indywidualnych różnic w odczuwaniu komfortu przez osoby przebywające w danym pomieszczeniu. Zaleca się jednak żeby nie przekraczał wartości 10%. Na rysunku 3, przedstawiona została zmiana średniej wartości wskaźnika w okresie pracy systemu ogrzewania. Można zaobserwować zbliżony charakter krzywej dla każdego z przyjętych wariantów sterowania. W pierwszych godzinach pracy ogrzewania wskaźnik PPD przekracza war-

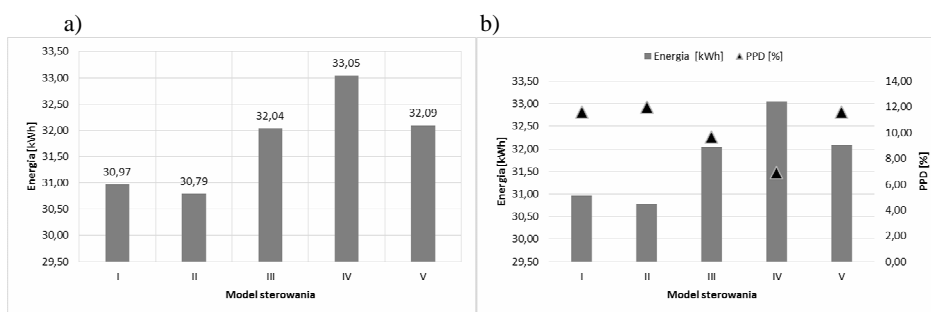
tość graniczną, jednak w następnych (kiedy temperatura w pomieszczeniu stabilizuje się) jego wartość zmniejsza się osiągając pożądane wartości.



Rys. 3. Zmiana wskaźnika PPD w okresie ogrzewania

Fig. 3. The change of PPD indicator during the heating period

Ostatnim etapem prowadzonej analizy było określenie ilości energii dla potrzeb ogrzewania. W skali tygodnia zapotrzebowanie na energię do ogrzewania dla rozpatrywanego pomieszczenia mieści się w zakresie od 30,8 do 33,0 kWh, co daje różnicę pomiędzy skrajnymi modelami sterowania (idealnym i adaptacyjnym) na poziomie 2,2 kWh (6,66%). Może się to wydawać nieznaczną wartością, jednak należy pamiętać, że ta różnica dotyczy ogrzewania tylko jednego (niezbyt dużego) pomieszczenia w okresie tygodnia. Gdyby rozpatrywać cały sezon grzewczy oraz cały budynek biurowy, oszczędność ta stanowiłaby znaczną różnicę w kosztach energii.



Rys. 4. a) Zapotrzebowanie na energię do ogrzewania, b) zestawienie zapotrzebowania na energię oraz wartości wskaźnika PPD

Fig. 4. a) The heating energy demand, b) the juxtaposition of heating energy demand and PPD indicator values

## 5. Podsumowanie

Przeprowadzona analiza wykazała, że wybór odpowiedniej strategii sterowania ogrzewaniem ma duży wpływ zarówno na efektywność energetyczną pomieszczenia jak i na jakość środowiska wewnętrznego. Znaczącym elementem jest także charakterystyka temperatury, mniejsze wahania jej wartości są bardziej pożądane. Decydując się na dany wariant sterowania należy mieć na uwadze osiągnięcie równowagi pomiędzy tymi czynnikami.

Na rysunku 4.b zostało przedstawione zestawienie parametru efektywności energetycznej (zapotrzebowania na energię) oraz parametru komfortu wewnętrznego (wskaźnik PPD). Rozpatrywany sterownik PID jest najbardziej oszczędnym, jednak zapewnia najniższą jakość środowiska wewnętrznego. Natomiast adaptacyjny model sterowania cechuje się wysokim komfortem przy jednoczesnym wysokim koszcie ogrzewania. Na podstawie wyników można wyciągnąć wniosek, że dla rozpatrywanych modeli sterowania zwiększona efektywność energetyczna może zostać osiągnięta kosztem pogorszenia jakości środowiska wewnętrznego.

Przeprowadzoną analizę można rozszerzyć poprzez uwzględnienie sterowania temperaturą przy założeniu stałej wartości wskaźnika PPD. Innym rozwiązaniem jest sprawdzenie większej ilości algorytmów sterowania (np. proporcjonalno czasowego bądź logiki rozmytej).

## Literatura

- [1] 2001 ASHRAE Handbook – Fundamentals. Chapter 29: Nonresidential cooling load calculation procedures.
- [2] Antonio Colmenar-Santos, Lya Noemí Terán de Lober, David Borge-Diez, Manuel Castro-Gil: Solutions to reduce energy consumption in the management of large buildings. *Energy and Buildings*, Volume 56, January 2013, Pages 66-77.
- [3] Djongyang N., Tchinda R., Njomo D.: Thermal comfort: A review paper, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 14, Issue 9, s. 2626 – 2640, 2010.
- [4] Dyrektywa parlamentu europejskiego i rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków.
- [5] Luis Pérez-Lombard, José Ortiz, Christine Pout: A review on buildings energy consumption information. *Energy and Buildings* 40 (2008), pp.394–398.
- [6] MacQueen J (1997) 'The modelling and simulation of energy management control systems', PhD Thesis, Glasgow: University of Strathclyde.
- [7] Ministerstwo Infrastruktury i Rozwoju <http://www.mir.gov.pl/>.
- [8] Rui Yang, Lingfeng Wang: Development of multi-agent system for building energy and comfort management based on occupant behaviors. *Energy and Buildings*, Volume 56, January 2013, Pages 1-7.

## THE COMPARISON OF ENERGY PERFORMANCE OF BUILDINGS WITH SELECTED HEATING CONTROL SYSTEMS

### Summary

This paper is a comparative analysis of selected models of heating control systems in relation to energy efficiency. The analysis is related to the office space with reduced energy demand. The space is designed for work with computer for a single person. The office is used only on weekdays for 8 hours a day. The introduction describes the problem of primary energy consumption in buildings. One of the proposed solution is to use BMS. Five different control algorithms has been described and characterized. The simulation model was built. The calculations for a coldest winter week were performed with use of ISO climate data for Lodz. Dynamic simulations were conducted using ESP-r software. The results shows the indoor temperature profiles for each of the systems. Also the results of thermal comfort with PPD indicator as a criterion were presented. Obtained values were very similar. Last results concerned the energy demand for heating for whole week period. PID controller was proved to be the most efficient and adaptive controller the least. On the other hand, the highest comfort was reported for adaptive and multistage controllers. The conducted analysis shows, that the choice of control strategy has a significant impact on energy efficiency and indoor environmental quality.

**Keywords:** energy, thermal comfort, heating system, building management systems, control model.

DOI:10.7862/rb.2014.75

*Przesłano do redakcji: 14.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 16.12.2014 r.*



Piotr CIERZNIEWSKI<sup>1</sup>  
Karolina KURTZ-ORECKA<sup>2</sup>

## WYBRANE ZAGADNIENIA PROJEKTOWANIA EFEKTYWNEGO ENERGETYCZNIE OŚWIETLENIA WBUDOWANEGO W POMIESZCZENIACH BIUROWYCH

Obecnie w krajach członkowskich Unii Europejskiej dąży się do ograniczenia zużycia energii na potrzeby oświetlenia wbudowanego w budynkach użyteczności publicznej. Świadczą o tym wprowadzane regulacje prawne i uzupełniające je normy przedmiotowe. W artykule dokonano analizy aktów prawnych związanych z efektywnym projektowaniem oświetlenia wbudowanego oraz zawartych w nich wymagań jakościowych i ilościowych dotyczących oświetlenia wbudowanego w budynkach użyteczności publicznej – w szczególności biurowych. Do podstawowych parametrów otoczenia świetlnego uwzględniających światło sztuczne i światło dzienne zalicza się: rozkład luminancji i natężenia oświetlenia, kierunkowość światła oraz oświetlenia w przestrzeni wnętrza, zmienność światła (poziomy i barwa światła), oddawanie barw i wygląd barwy światła czy oślnienie. Wskazano wymagania odnoszące się do pomieszczeń biurowych, wprowadzone przez normę PN-EN 12464:2012 [1]. Podano także wymagania energetyczne oświetlenia miejsc pracy w budynkach użyteczności publicznej w odniesieniu do pomieszczeń biurowych na podstawie normy PN-EN 15193:2010 [2] oraz przepisów techniczno-budowlanych. Wymagania te dotyczą: maksymalnej wartości mocy jednostkowej oświetlenia w zależności od klas kryterium oświetlenia, maksymalnej wartości wskaźnika  $\Delta EP_L$  czy kryteriów projektowania oświetlenia w pomieszczeniach biurowych. Zaprezentowano także wyniki otrzymane z symulacji oświetlenia przy zastosowaniu oprawa z źródłami jarzeniowymi i LED-owymi oraz obliczono na ich podstawie parametry charakterystyki energetycznej. W posumowaniu porównano obliczone roczne zapotrzebowanie na energię na potrzeby oświetlenia wbudowanego  $\Delta EP_L$  z granicznymi wartościami określonymi w przepisach.

**Słowa kluczowe:** natężenie oświetlenia, moc jednostkowa opraw oświetleniowych, liczbowy wskaźnik energii na oświetlenie, klasy kryterium oświetlenia

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Piotr Cierzniewski, WE ZUT w Szczecinie, KEiNE, 70-313 Szczecin ul. Sikorskiego 37, telefon: 914494270, e-mail: Piotr.Cierzniewski@zut.edu.pl

<sup>2</sup> Karolina Kurtz-Orecka, WBiA ZUT w Szczecinie, 70-311 Szczecin al. Piastów 50, tel. 608-691-975, karolinakurtz@gmail.com



## **1. Analiza aktów prawnych wiązanych z efektywnym projektowaniem oświetlenia wbudowanego w obiektach użyteczności publicznej**

### **1.1. Wymagania stawiane przez przepisy Unii Europejskiej oświetleniu obiektów budowlanych**

W krajach Unii Europejskiej dąży się między innymi do ograniczenia zużycia energii elektrycznej przez instalacje oświetleniowe i źródła światła. Świadczą o tym regulacje prawne takie jak: Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/125/WE z dnia 21 października 2009 r. ustanawiająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów związanych z energią czy Dyrektywa 2005/32/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 6 lipca 2005 r. określająca ogólne zasady ustalania wymogów dotyczących ekoprojektu dla produktów wykorzystujących energię oraz zmieniająca dyrektywę Rady 92/42/EWG, Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 96/57/WE i 2000/55/WE, Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE z dnia 19 maja 2010 r. w sprawie charakterystyki energetycznej budynków (zmieniająca Dyrektywę 2002/91/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 2002 r.). Wymagania dotyczące źródeł światła zawarte są również w rozporządzeniach Komitetu Europejskiego takich jak: Rozporządzenie Komisji (WE) NR 859/2009 z dnia 18 września 2009 r. czy Rozporządzenie Komisji (WE) NR 245/2009 z dnia 18 marca 2009 r. Bezpośrednio z Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2010/31/UE związana jest norma europejska PN-EN 15193: 2010 Charakterystyka energetyczna budynków, wymagania energetyczne dotyczące oświetlenia [2].

### **1.2. Wymagania stawiane przez przepisy Polskie oświetleniu obiektów budowlanych**

W Polsce zagadnienia dotyczące oświetlenia oraz zużywanej energii na potrzeby oświetlenia wbudowanego regulują między innymi: Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie [3] oraz wprowadzone przez to rozporządzenie dwie normy: PN-EN 12464: 2012 [1] i PN-EN 15193: 2010 [2].

Zgodnie z normą [1] podstawowymi parametrami otoczenia świetlnego uwzględniającymi światło sztuczne i światło dzienne są:

- rozkład luminancji,
- natężenia oświetlenia,
- kierunkowość światła, oświetlenia w przestrzeni wnętrza,
- zmienność światła (poziomy i barwa światła),
- oddawanie barw i wygląd barwy światła czy olśnienie.

Wprowadzone przez normę [1] wymagania dotyczą parametrów oświetleniowych zalecanego i wymaganego, takich jak:

- poziomu eksploatacyjnego natężenia oświetlenia ( $E_m$ ) oraz jego równomierności ( $U_0$ ) w miejscu pracy, otoczeniu miejsca pracy i tła,
- poziomu natężenia oświetlenia oraz jego równomierności na suficie i ścianach,
- współczynnika oddawania barw ( $R_a$ ) i temperatury barwowej ( $T_{CP}$ ),
- ujednoczonej oceny olśnienia ( $UGR_L$ ).

Ponadto norma [1] zaleca, aby współczynniki odbicia światła od głównych powierzchni rozpraszających we wnętrzu mieściły się w zakresie: od 0,7 do 0,9 w odniesieniu do sufitów, od 0,5 do 0,8 dla ścian, od 0,2 do 0,4 w przypadku podłóg oraz od 0,2 do 0,7 dla głównych przedmiotów w pomieszczeniu, jak meble, maszyny itp.

W normie [2] przedstawiono metody obliczania ilości energii zużywanej do oświetlenia w budynkach oraz sposoby wyznaczania liczbowego wskaźnika energii oświetlenia (LENI). W załącznikach do normy [1] podano: metody pomiaru mocy całkowitej opraw oświetleniowych i związanej z nią mocy pasożytnej, sposoby określania czynnika wykorzystania światła dziennego, sposoby określania czynnika zależności od obecności czy określania czynnika stałego natężenia oświetlenia. Ponadto podano wymagania odnoszące się do gęstości mocy oświetlenia zainstalowanego w budynku i standardowe godziny rocznego działania instalacji oświetleniowych dla różnych typów budynków [5].

### 1.3. Wymagania dotyczące oświetlenia miejsc pracy w budynkach użyteczności publicznej na przykładzie pomieszczeń biurowych

Norma [1] dzieli pomieszczenia ze względu na czynności, jakie w nich są wykonywane na poszczególnych stanowiskach pracy i ustala dla nich minimalne wymagane poziomy, które muszą być przestrzegane przy eksploatacji tych pomieszczeń. W tabelicy 1 zestawiono przykładowe wymagania dotyczące oświetlenia dla typowych czynności wykonywanych w pomieszczeniach biurowych [1].

Tablica 1. Wymagania oświetleniowe dla typowych czynności w pomieszczeniach biurowych, na podstawie [1]

Table 1. Lighting requirements for common tasks in offices, based on [1]

Rodzaj wnętrza, zadania lub czynności	$E_m$ , lx	$UGR_L$	$U_0$	$R_a$
Segregowanie	300	19	0,4	80
Pisanie obsługiwane klawiatury, czytanie, przetwarzanie danych	500	19	0,6	80
Pokoje spotkań i konferencji	500	19	0,6	80

#### 1.4. Wymagania energetyczne dotyczące oświetlenia miejsc pracy w pomieszczeniach biurowych

Wymagania energetyczne odnoszące się do oświetlenia wbudowanego w pomieszczeniach biurowych określa norma [2] oraz rozporządzenie [3]. Z przepisów tych wynika, że moc jednostkowa oświetlenia wbudowanego, według klas kryteriów, nie może przekraczać dopuszczalnej wartości przedstawionej w tablicy 2. Rozporządzenie [3], które weszło w życie z dniem 01.01.2014 r., w § 329 wprowadza częściowe maksymalne wartości wskaźnika zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną  $\Delta EP_L$  (tablica 3) na potrzeby oświetlenia wbudowanego w przypadku budynków: użyteczności publicznej, zamieszkania zbiorowego, produkcyjnych, gospodarczych i magazynowych. Wartość wskaźnika  $\Delta EP_L$ , zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną na potrzeby oświetlenia wbudowanego, oblicza się wg przepisów dotyczących metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynków – zgodnie z [4].

Tablica 2. Maksymalna wartość mocy jednostkowej oświetlenia w pomieszczeniach biurowych w zależności od klas kryterium oświetlenia, na podstawie [3]

Table 2. The maximum power density depending on the class design criterion for lighting of office spaces, based on [3]

Typ budynku	Maksymalna wartość mocy jednostkowej, W/m <sup>2</sup>		
	Klasa kryteriów A	B	C
Biura	15	20	25
gdzie klasy kryteriów oznaczają: A – spełnienie kryteriów oświetlenia w stopniu podstawowym; B – spełnienie kryteriów oświetlenia w stopniu rozszerzonym; C – spełnienie kryteriów oświetlenia w stopniu pełnym z uwzględnieniem komunikacji wizualnej			

Tablica 3. Częstkowe maksymalne wartości wskaźnika  $\Delta EP_L$  na potrzeby oświetlenia, na podstawie [3]

Table 3. Partial maximum values of  $\Delta EP_L$  for lighting needs, based on [3]

Rodzaj budynku	Częstkowe maksymalne wartości wskaźnika $\Delta EP_L$ na potrzeby oświetlenia, kWh/(m <sup>2</sup> rok), w zależności od czasu działania oświetlenia w ciągu roku $t_0$		
	od 01.01.2014	od 01.01.2017	od 01.01.2021 <sup>*)</sup>
Budynek użyteczności publicznej:	dla $t_0 < 2500$ h/rok $\Delta EP_L = 50$ dla $t_0 \geq 2500$ h/rok $\Delta EP_L = 100$	dla $t_0 < 2500$ h/rok $\Delta EP_L = 50$ dla $t_0 \geq 2500$ h/rok $\Delta EP_L = 100$	dla $t_0 < 2500$ h/rok $\Delta EP_L = 25$ dla $t_0 \geq 2500$ h/rok $\Delta EP_L = 50$
<sup>*)</sup> Od 01.01.2019 r. w przypadku budynków zajmowanych przez władze publiczne oraz będących ich własnością.			

W normie [2] przyjęto, że za miarę wydajności energetycznej oświetlenia w budynku odpowiada „liczbowy wskaźnik energii na oświetlenie”, LENI (*Lighting Energy Numeric Indicator*) [5]. Współczynnik LENI w odniesieniu do rozporządzenia [4] odpowiada energii końcowej  $E_{K,L}$  i w przypadku budynków biurowych nie powinien przekraczać wartości podanych w tabelicy 4.

Tablica 4. Standardowe wartości porównawcze i kryteria projektowania oświetlenia w pomieszczeniach biurowych, na podstawie [2]

Table 4. The standard comparison values and criteria for design of lighting in office rooms, based on [2]

$P_N$ , W/m <sup>2</sup>	$t_D$ , h/rok	$t_N$ , h/rok	$F_C$	$F_0$		$F_D$		LENI, kWh/(m <sup>2</sup> rok)	
				R	A	R	A	R	A
15	2250	250	1	1	0,9	1	0,9	42,1	35,3
20	2250	250	1	1	0,9	1	0,9	54,6	45,5
25	2250	250	1	1	0,9	1	0,9	67,1	55,8

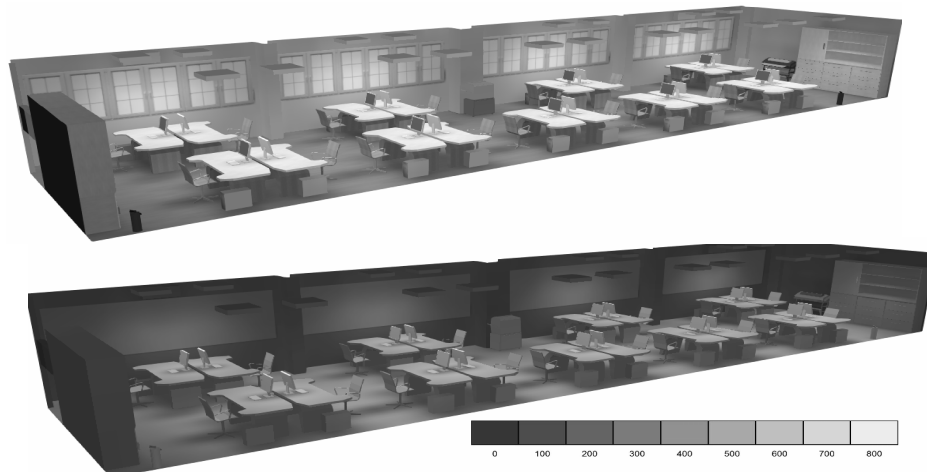
gdzie:  
 $P_N$  – moc jednostkowa opraw oświetlenia wbudowanego w pomieszczeniu  
 $t_D$  – czas użytkowania oświetlenia w ciągu dnia  
 $t_N$  – czas użytkowania oświetlenia w ciągu nocy  
 $F_C$  – współczynnik uwzględniający obniżenie natężenia oświetlenia do poziomu wymaganego  
 $F_0$  – współczynnik uwzględniający nieobecność użytkowników w miejscu pracy  
 $F_D$  – współczynnik uwzględniający wykorzystanie światła dziennego w oświetleniu  
R – ręczne sterowanie oświetleniem wbudowanym w pomieszczeniu  
A – sterowanie automatyczne oświetleniem w pomieszczeniu

## 2. Obliczenia parametrów oświetleniowych i charakterystyki energetycznej w przykładowym budynku biurowym

### 2.1. Wizualizacja i wyniki obliczeń oświetlenia w budynku biurowym

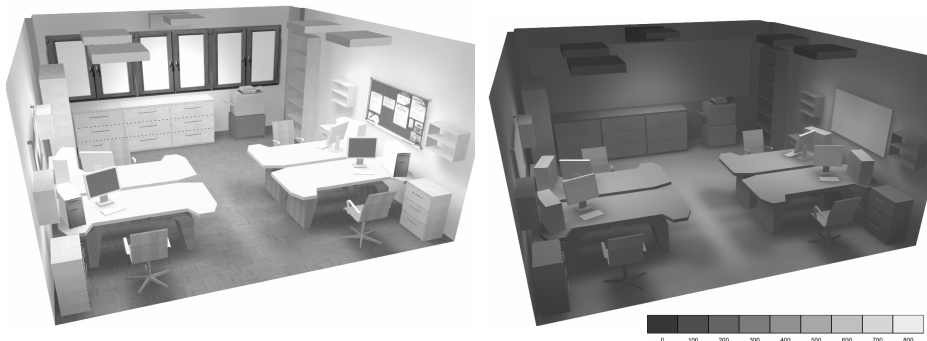
Wymagania podane w tabelicy 1 wymuszają na projektantach oświetlenia wykonanie wizualizacji rozkładu oświetlenia w pomieszczeniu, ponieważ tylko wtedy można ocenić czy prawidłowo zostały dobrane i rozmieszczone oprawy oświetleniowe oraz spełnione zostały wymagane parametry oświetlenia w pomieszczeniu. Wymaga to jednak przygotowania wcześniejszej aranżacji wnętrza przez architekta uwzględniającej: materiały i kolorystykę ścian, sufitów i podłóg oraz mebli, gdyż mają one wpływ na otrzymane wyniki [5, 6].

Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono przykładowe wizualizacje pomieszczeń oraz wyniki symulacji rozkładu natężenia oświetlenia wraz z rozmieszczeniem opraw w przykładowych pomieszczeniach biurowych. W analizach przyjęto parametry jarzeniowych źródeł światła. Oprawy i ich rozmieszczenie dobrano w taki sposób, aby spełnić wymagania odnoszące się do natężenia oświetlenia w miejscu pracy, otoczeniu miejsca pracy i tle, na ścianach, podłodze i suficie oraz aby zachować odpowiednią równomierność oświetlenia na wymienionych powierzchniach.



Rys. 1. Wizualizacja oraz wyniki symulacji rozkładu natężenia oświetlenia w pracowni komputerowej

Fig. 1. Visualization and simulation results of light intensity distribution in a computer lab



Rys. 2. Wizualizacja oraz wyniki symulacji rozkładu natężenia oświetlenia w pomieszczeniu biurowym

Fig. 2. Visualization and simulation results of light intensity distribution in a office room

W tablicach 5 i 6 przedstawiono otrzymane w wyniku symulacji: wartości eksploatacyjnego natężenia oświetlenia  $E_{\text{mobiczone}}$ , mocy jednostkowej  $P_N$  i równomierności natężenia oświetlenia na płaszczyźnie pracy  $U_{\text{obliczone}}$  w pomieszczeniach o powierzchni  $A_{fj}$  oraz wartości wymagane przez przepisy eksploatacyjnego natężenia oświetlenia  $E_{\text{mwymagane}}$  i równomierności natężenia oświetlenia na płaszczyźnie pracy  $U_{\text{wymagane}}$ . W tablicy 5 przedstawiono wyniki

symulacji przy zastosowaniu jarzeniowych źródeł światła a w tabeli 6 – z zastosowaniem LED-owych źródeł światła.

Tablica 5. Wymagane wartości i wyniki symulacji oświetlenia światłem fluorescencyjnym przestrzeni biurowej

Table 5. Required values and simulation result of lightning with fluorescent light of an office space

Opis	$A_{fj}$ $m^2$	$P_N$ $W/m^2$	$E_{mobiczone}$ lux	$E_{mwymagane}$ lux	$U_{oobliczone}$ -	$U_{owymagane}$ -
Przedsiónek	7,20	8,19	224	100	0,89	0,4
Korytarz	96,92	5,94	238	100	0,73	0,4
Pomieszczenie Socjalne	29,86	12,05	418	200	0,84	0,4
Pracownia projektowa	60,41	8,34	579-623	500	0,68-0,78	0,6
Sala posiedzeń	32,57	12,68	608	500	0,63	0,6
Serwerownia	30,97	10,17	607	500	0,84	0,6
Pracownia komputerowa	125,05	9,57	575-671	500	0,61-0,86	0,6
Administracja	30,10	9,93	536-601	500	0,77-0,80	0,6
BOK	30,39	11,65	581-614	500	0,83	0,6
WC korytarz	3,10	11,62	193	100	0,81	0,4
Łazienki i toalety	10,23	9,19	200	200	0,85	0,4

Tablica 6. Wymagane wartości i wyniki symulacji oświetlenia światłem LED-owym przestrzeni biurowej

Table 6. Required values and simulation result of lightning with LED light of an office space

Opis	$A_{fj}$ $m^2$	$P_N$ $W/m^2$	$E_{mobiczone}$ lux	$E_{mwymagane}$ lux	$U_{oobliczone}$ -	$U_{owymagane}$ -
Przedsiónek	7,20	3,75	130	100	0,88	0,4
Korytarz	96,92	3,71	186	100	0,79	0,4
Pomieszczenie Socjalne	29,86	8,64	282	200	0,93	0,4
Pracownia projektowa	60,41	5,33	505-544	500	0,72-0,79	0,6
Sala posiedzeń	32,57	9,12	554	500	0,71	0,6
Serwerownia	30,97	7,17	584	500	0,80	0,6
Pracownia komputerowa	125,05	6,05	516-600	500	0,61-0,89	0,6
Administracja	30,10	9,40	546-595	500	0,77-0,80	0,6
BOK	30,39	6,38	509-541	500	0,80	0,6
WC korytarz	3,10	11,62	193	100	0,81	0,4
Łazienki i toalety	10,23	9,19	200	200	0,85	0,4

Porównując otrzymane wartości w tablicach 5 i 6 można zauważyć, że zastosowanie LED-owych źródeł światła przy zachowaniu wymaganych parametrów oświetleniowych powoduje zmniejszenie mocy zainstalowanej na potrzeby oświetlenia wbudowanego w budynku o 32,3% w odniesieniu do jarzeniowych źródeł światła, jednak koszty LED-owych źródeł światła w porównaniu do ich odpowiedników jarzeniowych są kilkadziesiąt razy wyższe.

## 2.2. Wyniki obliczeń parametrów charakterystyki energetycznej na potrzeby oświetlenia wbudowanego w budynku biurowym

Na podstawie określonych w tablicach 5 i 6 mocy jednostkowych  $P_N$  oraz rozporządzenia [4] wyznaczono parametry charakterystyki energetycznej budynku związane z oświetleniem wbudowanym – roczne jednostkowe zapotrzebowanie na energię pierwotną na potrzeby oświetlenia wbudowanego  $\Delta EP_L$ . W tablicy 7 przedstawiono wyniki obliczeń wskaźnika rocznego jednostkowego zapotrzebowania na energię pierwotną na potrzeby oświetlenia wbudowanego dla budynków biurowych przy wartościach maksymalnych mocy jednostkowej opraw oświetleniowych w odniesieniu do różnych klas kryteriów projektowania oświetlenia.

Tablica 7. Parametry charakterystyki energetycznej oświetlenia wbudowanego dla różnych rozwiązań oświetlenia

Table 7. Parameters of the energy performance of the built-in lighting for a variety of lighting solutions

Sposób wykonania oświetlenia/ wymagania	$A_f$ m <sup>2</sup>	$P_N$ W/m <sup>2</sup>	$t_D$ h	$t_N$ h	$E_{K,L}+E_{el,pom.L}$ kWh/(m <sup>2</sup> rok)	$\Delta EP_L$ kWh/(m <sup>2</sup> rok)
Budynek z oświetleniem jarzeniowym	456,8	9,2	2250	250	23,25	69,25
Budynek z oświetleniem LEDowym	456,8	6,2	2250	250	15,82	47,46
Budynek wg WT 15	456,8	15	2250	250	37,50	112,50
Budynek wg WT 20	456,8	20	2250	250	50,00	150,00
Budynek wg WT 25	456,8	25	2250	250	62,50	187,50

$A_f$  – powierzchnia użytkowa budynku  
 $P_N$  – moc jednostkowa opraw oświetlenia wbudowanego w pomieszczeniu  
 $t_D$  – czas użytkowania oświetlenia w ciągu dnia  
 $t_N$  – czas użytkowania oświetlenia w ciągu nocy  
 $E_{K,L}+E_{el,pom.L}$  – energia końcowa i energia pomocnicza na potrzeby oświetlenia wbudowanego  
 $\Delta EP_L$  – wskaźnik rocznego jednostkowego zapotrzebowania na energię pierwotną na potrzeby oświetlenia wbudowanego

### 3. Podsumowanie

Obowiązująca norma PN-EN 12464: 2012 [1] wprowadziła wysokie wymagania ilościowe dotyczące oświetlenia wbudowanego, takie jak: eksploatacyjne natężenie oświetlenia oraz jakościowe: ograniczenie olśnienia, temperatura barwowa źródeł światła czy współczynnik oddawania barw. Stawia ona również wymagania ilościowe w odniesieniu do oświetlenia powierzchni pomieszczenia – ścian, sufitów i podłóg. Wprowadza również zalecenia określające wartości współczynników odbicia (kolorów) ścian, podłóg, sufitów czy mebli. Sprawdzenie czy wybrane oprawy oświetleniowe i ich rozmieszczenie spełniają kryteria ilościowe i jakościowe wymaga wykonania symulacji rozkładu oświetlenia. Symulacja pozwala również ocenić dotrzymanie wymagań energetycznych dotyczących oświetlenia zgodnych z normą PN-EN 15193: 2010 [2].

Porównując roczne zapotrzebowanie na energię pierwotną na potrzeby oświetlenia wbudowanego  $\Delta EP_L$  wyznaczone zgodnie z rozporządzeniem [4] (tablica 7) w przypadku dopuszczalnej wartości maksymalnej mocy jednostkowej oświetlenia, zgodnej z § 180a rozporządzenia [3] (tablica 2) oraz normy [2] (tablica 4), można zauważyć, że nie spełnia wymagań zawartych w § 329 rozporządzenia [3]. Zgodnie z obowiązującą metodyką obliczeń charakterystyki energetycznej budynku [4] bezpodstawne stają się wymagania stawiane w § 180a przepisów techniczno-budowlanych [3], mimo że wynikają one z normy europejskiej [2] powiązanej z dyrektywą dotyczącą eko-projektowania przy zasilaniu obiektu budowlanego z sieci elektroenergetycznej.

Zmniejszenie wartości współczynnika  $\Delta EP_L$  w projektowanych budynkach można osiągnąć między innymi poprzez zastosowanie automatyki budynkowej do sterowania oświetleniem, jednak wpływa to na podniesienie kosztów inwestycyjnych. Stopa zwrotu nakładów takiej inwestycji kształtuje się najczęściej w granicach od kilku do kilkunastu lat.

Spełnienie wymagań dotyczących nieprzekroczenia wskaźnika zapotrzebowania na energię pierwotną na potrzeby oświetlenia budowlanego  $\Delta EP_L$ , zawartych w przepisach techniczno-budowlanych [3] (tablica 3) w przypadku budynków, w których moc jednostkowa na potrzeby oświetlenia wbudowanego przekracza  $15 \text{ W/m}^2$  wydaje się możliwe jedynie w przypadku, gdy do zasilania instalacji oświetleniowych, bądź jej części, wykorzystane zostaną odnawialne źródła energii.

### Literatura

- [1] PN-EN 12464:2012 Światło i oświetlenie. Oświetlenie miejsc pracy – część 1.
- [2] PN-EN 15193:2010 Charakterystyka energetyczna budynków. Wymagania energetyczne dotyczące oświetlenia.



- [3] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. 2002 nr 75 poz. 690 z późniejszymi zmianami).
- [4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 6 listopada 2008 r. w sprawie metodologii obliczania charakterystyki energetycznej budynku stanowiącej samodzielną całość techniczno-użytkową oraz sposobu sporządzania i wzorów świadectw ich charakterystyki energetycznej (Dz. U. 2008 nr 201 poz. 1240 z późniejszymi zmianami).
- [5] Bąk J.: Wydajne energetycznie oświetlenie wnętrz. Wybrane zagadnienia. COSiW. Warszawa 2009.
- [6] Cierzniewski P., Kudła J., Paplicki P., Wardach M.: Wybrane aspekty efektywnego projektowania instalacji oświetleniowych w obiektach użyteczności publicznej. Przegląd Elektrotechniczny. - R. 88, nr 12a, 2012, s. 197-199.

## SELECTED PROBLEMS OF ENERGY EFFICIENT LIGHTING DESIGN BUILT IN OFFICE ROOMS

### Summary

Currently the member states of the European Union seek to reduce energy consumption for lighting purposes incorporated in public buildings testify to the regulations introduced. The article analyzes the legal acts linked with effective lighting design built-in utilities and published quantitative and qualitative requirements relating to the built-in lighting in public buildings. The basic parameters that are taken into account ambient light, artificial light and daylight are as follow: luminance distribution, illumination, directionality of light, lighting in the interior space, variability of light (light levels and color), color rendering and color appearance of the light or glare. The article presents some analysis of built-in light system of office space done in according with the standard PN -EN 12464:2012 [1]. There is also presented a lists of the energy requirements of workplace lighting in public buildings on the example of office space on the basis of the building regulations and the standard PN-EN 15193:2010 [2]. These requirements relate to: the maximum value of the power unit lighting, depending on the class criterion lighting; maximum values of  $\Delta EP_L$  or lighting design criteria in offices. It also contains the results obtained from the simulation using lighting luminaries with fluorescent and LED sources, and calculated on the basis of their energy performance parameters. In the summary compared the calculated annual energy demand for lighting purposes the built-in  $\Delta EP_L$  with the required values by the rules.

**Keywords:** illuminance, power density luminaries, lighting energy numeric indicator, class design criterion

DOI:10.7862/rb.2014.76

*Przesłano do redakcji: 11.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Krzysztof CZECH<sup>1</sup>  
Wojciech GOSK<sup>2</sup>

## WPŁYW SPOSOBU MOCOWANIA AKCELEROMETRÓW NA GRUNCIE NA WIARYGODNOŚĆ OCENY KOMFORTU WIBRACYJNEGO

Celem pracy była analiza wpływu sposobu mocowania akcelerometrów na poziom rejestrowanych drgań powierzchniowych ośrodka gruntowego. W pracy prezentowane są wyniki badań terenowych polegających na pomiarze przyspieszeń drgań w punktach pomiarowych znajdujących się na powierzchni gruntu. Przedmiotowe badania były realizowane w dwóch miejscach na terenie żwirowni zlokalizowanej w miejscowości Mince niedaleko Białegostoku. Źródłem drgań o wysokiej powtarzalności parametrów impulsu była lekka płyta dynamiczna ZFG-01. Przyrząd ten zasadniczo służy do oceny modułu sztywności podłoża gruntowego, jednakże w niniejszej pracy pełnił rolę wzbudnika drgań. Pomiar przyspieszeń drgań realizowano przy wykorzystaniu najwyższej klasy i dokładności układu pomiarowego firmy Brüel&Kjær. Akcelerometry montowano na powierzchni gruntu piaszczystego w punktach pomiarowych rozmieszczonych promiennie w odległości 5 m i 10 m od źródła drgań. W pracy analizowano wpływ sposobu mocowania akcelerometrów na gruncie na poziom rejestrowanych wartości przyspieszeń drgań. Czujniki przyspieszeń mocowano do podłoża na trzy sposoby – przy użyciu podstaw pierścieniowych zespalanych z gruntem za pomocą trzech prętów (typ *a*), podstaw z aluminiową głowicą przykręcaną do pojedynczego pręta zagłębianego w gruncie (typ *b*) i płyty betonowej z zamocowanymi do niej czujnikami (typ *c*). Wykazano, że sposób mocowania czujników do powierzchni terenu ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia wiarygodności realizowanych pomiarów. Analiza wykazała, że wyniki, które należy uznać za najbardziej wiarygodne uzyskano przy użyciu podstaw typu *a*.

**Słowa kluczowe:** geotechnika, drgania powierzchniowe, ośrodek gruntowy, propagacja drgań

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Krzysztof Czech, Politechnika Białostocka, 15-351 Białystok, Wiejska 45E, 604 662 660, email: k.czech@pb.edu.pl.

<sup>2</sup> Wojciech Gosk, Politechnika Białostocka, 15-351 Białystok, Wiejska 45E, 501 704 894, email: w.gosk@pb.edu.pl.

## 1. Wstęp

Jednym z wymogów współczesnej ochrony środowiska jest konieczność podejmowania działań mających na celu przeciwdziałanie i minimalizację negatywnych oddziaływań hałasu, drgań i wibracji propagowanych do otoczenia [1]. Istotnym elementem oceny wpływu któregokolwiek z wyżej wymienionych czynników na środowisko jest przeprowadzenie wiarygodnych pomiarów terenowych, które umożliwią dokonanie rzetelnej oceny ich szkodliwości. W przypadku propagacji drgań w gruncie i ich wpływu na urządzenia pracujące wewnątrz budynków, lub wpływu drgań na obiekty budowlane i ich użytkowników mierzonymi wielkościami są przyspieszenia, prędkości lub przemieszczenia drgań. O ile w przypadku oceny wpływu drgań na istniejące budynki i ich wyposażenie lub użytkowników i mieszkańców budynków kwestia realizacji pomiaru i sposobu mocowania czujników do budynków (fundamentów lub ścian nośnych budynków na poziomie terenu od strony źródła drgań - w przypadku oceny wpływu drgań na budynek [3] lub w miejscu przenoszenia się drgań na człowieka - zwykle w środku rozpiętości stropów - w przypadku oceny wpływu drgań na ludzi w budynkach [4]) jest dość jednoznaczna, gdyż realizowane połączenie ma zapewnić wierne odwzorowanie drgań elementu konstrukcyjnego, z którym powiązано czujniki - o tyle w przypadku prognozowania poziomu i wpływu istniejącego lub hipotetycznego źródła drgań na mający dopiero powstać w danej lokalizacji budynek sprawa się komplikuje, gdyż do wiarygodnej prognozy poziomu drgań i ich wpływu na nowo projektowaną konstrukcję wymagana jest znajomość rzeczywistych parametrów drgań zarejestrowanych na gruncie w miejscu planowanej inwestycji. I tutaj pojawia się problem, gdyż czujniki wykorzystywane do realizacji pomiarów drgań nie mogą po prostu być ustawione na gruncie. Takie rozwiązanie nie zapewnia odpowiedniego stopnia powiązania czujników z ośrodkiem gruntowym. Również umieszczanie czujników pomiarowych na pewnej głębokości w gruncie ma swoje wady, gdyż wiąże się ze znaczącym naruszeniem stopnia zagęszczenia ośrodka gruntowego w bezpośrednim otoczeniu czujnika - co może mieć m.in. wpływ na rzeczywiste tłumienie rejestrowanych parametrów drgań. Nie bez znaczenia jest także fakt, iż w gruncie umieszczany jest czujnik o stanowczo większym ciężarze objętościowym od ośrodka w którym się znajduje, oraz to, iż zgodnie z teorią i dotychczas przeprowadzonymi badaniami wraz z głębokością maleją wartości amplitud drgań powierzchniowych (propagowanych głównie w postaci fal Rayleigha). Z tego powodu w badaniach propagacji drgań w gruncie zwykle wykorzystywane są specjalnie konstruowane podstawy do mocowania czujników na gruncie z jednym lub kilkoma prętami zagłębionymi w gruncie. Autorzy pracy nie znaleźli jednakże opracowania, w którym byłyby zawarte szczegółowe wytyczne odnośnie jednoznacznie poprawnego sposobu mocowania czujników pomiarowych na gruncie. Brak tego typu wytycznych w tym zakresie może prowadzić do istotnych rozbieżności w wynikach pomiarów pro-

wadzonych w porównywalnych warunkach (rodzaj i stan gruntu, jego wilgotność, temperatura powietrza, itp.). Błędem jest również formułowanie tez lub wniosków bazujących na opracowaniach, w których w sposób niedostateczny opisano metodykę prowadzenia i rejestracji pomiarów dynamicznych, jak i pracach, w których bliżej nie sprecyzowano wykorzystanej w badaniach aparatury pomiarowej lub wykorzystano aparaturę o nieadekwatnych do prowadzonych badań zakresach pomiarowych. Dlatego też niektóre publikowane wyniki badań nie powinny być brane pod uwagę przy opracowywaniu zależności matematycznych związanych z propagacją, tłumieniem i absorpcją drgań w gruncie - nie powinny być również uwzględniane w prognozowaniu wpływu drgań na projektowane budynki i ich użytkowników.

Celem niniejszej pracy jest ocena wpływu sposobu mocowania akcelerometrów na gruncie na poziom amplitud rejestrowanych drgań powierzchniowych. Analizie będzie podlegał wpływ rodzaju podstaw pomiarowych i długości prętów wprowadzanych w grunt.

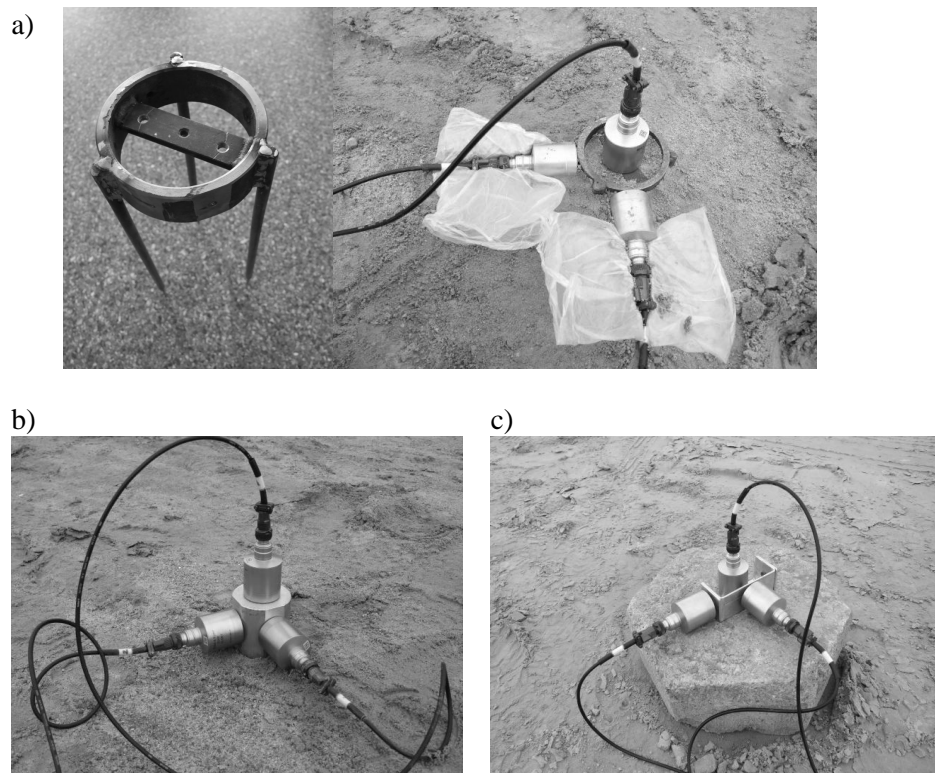
## 2. Realizacja pomiarów

### 2.1. Podstawy pomiarowe

W pracy przyjęto, że analiza wpływu sposobu mocowania czujników do gruntu na rejestrowane wartości amplitud drgań będzie dotyczyła następujących typów podstaw pomiarowych:

- a) podstawa pierścieniowa z trzema prętami zagłębianymi w gruncie;
- b) podstawa z aluminiową głowicą przykręcaną do pojedynczego pręta zagłębianego w gruncie;
- c) trylinka betonowa z przykręconymi do niej czujnikami.

W przypadku podstaw pomiarowych wyszczególnionych w podpunktach a) i b) założono, że badania terenowe będą prowadzone dla dwóch zróżnicowanych długości prętów zagłębianych w gruncie ( $L_1 = 15$  cm i  $L_2 = 30$  cm). W przypadku podstaw pierścieniowych dodatkowo przyjęto, że analizowany będzie również wpływ nieznaczonej zmiany średnicy pierścienia podstawy, do którego bezpośrednio mocowane są czujniki pomiarowe ( $D_1 = 11$  cm i  $D_2 = 12$  cm). Przykładową podstawę pierścieniową pokazano na rysunku 1:



Rys. 1. Podstawa pierścieniowa a) oraz podstawy a), b) i c) z zamontowanymi czujnikami

Fig. 1. Ring base a) and bases a), b) and c) with mounted accelerometers

## 2.2. Lokalizacja pomiarowa oraz przebieg badań terenowych

Realizacja wiarygodnych badań wpływu sposobu mocowania czujników do gruntu na poziom rejestrowanych amplitud drgań wymagała przyjęcia lokalizacji pomiarowej charakteryzującej się dużą jednorodnością rodzaju i stanu gruntu zalegającego do co najmniej kilkumetrowej głębokości, bez widocznych przewarstwień czy innego rodzaju wtrąceń. Ponadto teren powinien być odpowiednio płaski i wyrównany. Mając na uwadze powyższe na miejsce pomiarów wybrano żwirownię zlokalizowaną w województwie podlaskim w pobliżu miejscowości Mince.

Przyjęto, że podstawy pomiarowe będą rozmieszczone promieniście w stałych odległościach: 5.0 m i 10.0 m od powtarzalnego źródła drgań, a drgania będą rejestrowane w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach: radialnym  $x$  (prostopadłym do przyjętego profilu pomiarowego), promieniowym  $y$  (w kierunku przyjętego profilu pomiarowego) oraz w kierunku pionowym  $z$ .

Jako źródło drgań przyjęto lekką płytę dynamiczną typu ZFG-01 (zwaną również lekkim ugięciomierzem udarowym) generującą pojedyncze impulsy w wyniku kontrolowanego spadku masy 10 kg z wysokości 0.83 m. Tego typu urządzenia są powszechnie wykorzystywane w badaniach modułów sztywności podłoża gruntowego i kontroli zagęszczenia nasypów oraz stanowią odpowiednio stabilne i powtarzalne źródło drgań impulsowych.

Na potrzeby niniejszej pracy badania wykonano w dwóch różnych, oddalonych od siebie o około 200 m, lokalizacjach na terenie żwirowni (etapy: I i II). W pierwszym etapie badań dla każdej z testowanych podstaw pomiarowych generowano 5 impulsów. W drugim etapie badań generowano po 6 impulsów.

### 2.3. Aparatura pomiarowa

Wiarygodność i dokładność rejestrowanych sygnałów została zagwarantowana dzięki wykorzystaniu w badaniach najnowszej generacji, najwyższej klasy dokładności 24-bitowego układu pomiarowego typu *LAN-XI* firmy *Brüel&Kjær* (z dynamiką wejść na poziomie 160 dB i idealną liniowością oraz zgodnością fazową) współpracującego z układem sześciu najwyższej dokładności i czułości sejsmicznych piezoelektrycznych czujników przyspieszeń drgań typu 8340 firmy *Brüel&Kjær* (o czułości 10 V/g i zakresie pomiarowym  $\pm 0.5$  g w przedziale częstotliwości 0.1 Hz ÷ 1500 Hz). Układ pomiarowy pokazano na rys. 2:



Rys. 2. Układ pomiarowy typu *LAN-XI* firmy *Brüel&Kjær* i lekka płyta dynamiczna typu ZFG-01

Fig. 2. Measuring apparatus *Brüel&Kjær* LAN-XI and light falling weight deflectometer ZFG-01

### 3. Wyniki badań

Po badaniach wstępnych z wykorzystaniem podstaw typu *b*) i *c*) stwierdzono, iż podstawy tego typu nie zapewniają wymaganego powiązania czujników z gruntem. W przypadku podstaw typu *b*), zarówno w przypadku krótszego

jak i dłuższego pręta zagłębianego w gruncie (piasek drobny), każdorazowo stwierdzono nieznaczną podatność podstawy na ruch w płaszczyźnie poziomej - niezależnie od sposobu zagłębiania pręta w gruncie. Potwierdza to wzmiankowaną w literaturze [2] podatność tego typu podstaw do drgań charakterystycznych dla elementów wspornikowych. W przypadku pomiarów drgań powierzchniowych realizowanych z wykorzystaniem czujników mocowanych do masywnych elementów umieszczanych bezpośrednio na gruncie (w analizowanym przypadku była to betonowa płyta chodnikowa - tzw. trylinka) efekt jest zbliżony - układ trylinka-czujniki nie zapewnia odpowiedniego powiązania z gruntem. W zależności od intensywności i częstotliwości propagowanych w gruncie drgań tego typu podstawa może znacząco intensyfikować (tab. 1) jak i tłumić drgania. W związku z powyższym w dalszej części pracy wpływ podstaw typu *b*) i *c*) na rejestrowany poziom amplitud przyspieszeń drgań nie będzie analizowany.

Tabela 1. Amplitudy przyspieszeń drgań zarejestrowanych na masywnej betonowej płycie chodnikowej

Table 1. Acceleration amplitude of vibrations recorded on massive concrete plate

Nazwa pliku	Rodzaj podstawy	<i>L</i> = 5.0 m (1.p.p.)			<i>L</i> = 10.0 m (2.p.p.)			Ugięcie ( <i>L</i> = 0.0 m) [mm]
		1y	2x	3z	4y	5x	6z	
		[m/s <sup>2</sup> ]			[m/s <sup>2</sup> ]			
1B_trylinka-2	Czujniki zamontowane na trylince	1,580	0,434	0,654	0,572	0,165	0,279	0,50
1B_trylinka-4		1,460	0,415	0,685	0,544	0,188	0,305	0,48
1B_trylinka-5		1,580	0,434	0,693	0,589	0,215	0,290	0,48
1B_trylinka-8		1,610	0,412	0,683	0,576	0,173	0,301	0,47
<b>Średnia arytm.</b>		<b>1,558</b>	<b>0,424</b>	<b>0,679</b>	<b>0,570</b>	<b>0,185</b>	<b>0,294</b>	<b>0,48</b>
<i>Odchyl. stand.</i>		<i>0,067</i>	<i>0,012</i>	<i>0,017</i>	<i>0,019</i>	<i>0,022</i>	<i>0,012</i>	<i>0,01</i>

Przykładowe dane zarejestrowane za pośrednictwem podstaw pierścieniowych zestawiono w tabeli 2.

Dla każdego rodzaju analizowanych w pracy podstaw pierścieniowych dokonano uśrednienia wartości amplitud oraz wyznaczono wartości odchyłeń standardowych, które najlepiej obrazują rozrzuty rejestrowanych wartości wokół wartości średnich. Uśrednienia dokonano niezależnie dla każdego punktu pomiarowego (1.p.p. - 5 m od źródła drgań i 2.p.p. - 10 m od źródła drgań) i kierunku pomiaru drgań (*x*, *y* i *z*). Uzyskane dane zestawiono w poniższych tabelach - tab. 3 (etap I) i tab. 4 (etap II).

Tabela 2. Amplitudy przyspieszeń drgań zarejestrowanych za pośrednictwem podstawy pierścieniowej o średnicy  $D_2$  i długości prętów  $L_2$  - etap I

Table 2. Acceleration amplitude of vibrations recorded by ring base with the diameter  $D_2$  and length of the rods  $L_2$  - stage I

Nazwa pliku	Rodzaj podstawy i długość prętów	$L = 5.0 \text{ m (1.p.p.)}$			$L = 10.0 \text{ m (2.p.p.)}$			Ugięcie ( $L = 0.0 \text{ m}$ ) [mm]
		1y	2x	3z	4y	5x	6z	
		[m/s <sup>2</sup> ]			[m/s <sup>2</sup> ]			
2B_PDD-2	Pierścień $D_2$ + 3 pręty $L_2$	0,560	0,127	0,788	0,338	0,128	0,329	0,46
2B_PDD-3		0,584	0,130	0,836	0,353	0,135	0,346	0,46
2B_PDD-4		0,591	0,128	0,859	0,339	0,129	0,346	0,46
2B_PDD-5		0,589	0,128	0,848	0,359	0,146	0,344	0,46
2B_PDD-6		0,597	0,141	0,870	0,362	0,147	0,356	0,47
<b>Średnia arytm.</b>		<b>0,584</b>	<b>0,131</b>	<b>0,840</b>	<b>0,350</b>	<b>0,137</b>	<b>0,344</b>	<b>0,46</b>
<i>Odchyl. stand.</i>	<i>0,014</i>	<i>0,006</i>	<i>0,032</i>	<i>0,011</i>	<i>0,009</i>	<i>0,010</i>	<i>0,00</i>	

Tabela 3. Zestawienie uśrednionych wartości amplitud przyspieszeń drgań i odpowiadających im odchyleń standardowych - etap I

Table 3. Average values of acceleration amplitude and adequate standard deviations - stage I

Rodzaj podstawy i długość prętów	$L = 5.0 \text{ m (1.p.p.)}$			$L = 10.0 \text{ m (2.p.p.)}$			Ugięcie $L = 0.0 \text{ m}$
	1y	2x	3z	4y	5x	6z	
	Uśrednione amplitudy przyspieszeń [m/s <sup>2</sup> ] przyrost (+) / spadek (-) w stosunku do wartości średniej [%]						śr.arytm. [mm] przyrost [%]
Wartość średnia	<b>0,567</b>	<b>0,198</b>	<b>0,769</b>	<b>0,307</b>	<b>0,117</b>	<b>0,312</b>	<b>0,45</b>
<i>Odchylenie stand.</i>	<i>0,046</i>	<i>0,063</i>	<i>0,059</i>	<i>0,053</i>	<i>0,051</i>	<i>0,079</i>	<i>0,01</i>
Pierścień $D_1$ + 3 pręty $L_1$	0,520	0,238	0,766	0,230	0,074	0,238	0,44
	<b>-8,2%</b>	20,1%	-0,3%	<b>-25,0%</b>	<b>-37,3%</b>	<b>-23,9%</b>	-1,6%
Pierścień $D_1$ + 3 pręty $L_2$	0,623	0,159	0,773	0,329	0,078	0,258	0,45
	<b>10,0%</b>	-19,6%	0,6%	7,5%	-33,7%	-17,3%	-0,7%
Pierścień $D_2$ + 3 pręty $L_1$	0,539	0,265	0,695	0,317	0,181	0,409	0,45
	-4,9%	<b>33,6%</b>	<b>-9,6%</b>	3,3%	<b>54,3%</b>	<b>31,0%</b>	-0,2%
Pierścień $D_2$ + 3 pręty $L_2$	0,584	0,131	0,840	0,350	0,137	0,344	0,46
	3,1%	<b>-34,0%</b>	<b>9,3%</b>	<b>14,3%</b>	16,7%	10,2%	2,4%



Tabela 4. Zestawienie uśrednionych wartości amplitud przyspieszeń drgań i odpowiadających im odchyłeń standardowych - etap II

Table 4. Average values of acceleration amplitude and adequate standard deviations - stage II

Rodzaj podstawy i długość prętów	L = 5.0 m (1.p.p.)			L = 10.0 m (2.p.p.)			Ugięcie L = 0.0 m
	1y	2x	3z	4y	5x	6z	
	Uśrednione amplitudy przyspieszeń [m/s <sup>2</sup> ] przyrost (+) / spadek (-) w stosunku do wartości średniej [%]						śr.arytm. [mm] przyrost [%]
Wartość średnia	<b>0,794</b>	<b>0,417</b>	<b>0,735</b>	<b>0,245</b>	<b>0,140</b>	<b>0,217</b>	<b>0,31</b>
Odchylenie stand.	0,187	0,095	0,217	0,020	0,039	0,021	0,01
Pierścień D <sub>1</sub> + 3 pręty L <sub>1</sub>	0,764 -3,8%	0,393 -5,6%	0,607 -17,3%	0,228 <b>-6,9%</b>	0,096 <b>-31,4%</b>	0,242 <b>11,8%</b>	0,30 -3,7%
Pierścień D <sub>1</sub> + 3 pręty L <sub>2</sub>	0,705 -11,3%	0,433 3,8%	0,752 2,3%	0,268 <b>9,5%</b>	0,191 <b>36,9%</b>	0,205 -5,3%	0,30 -2,6%
Pierścień D <sub>2</sub> + 3 pręty L <sub>1</sub>	1,065 <b>34,1%</b>	0,535 <b>28,3%</b>	1,034 <b>40,7%</b>	0,229 -6,5%	0,138 -1,5%	0,225 3,8%	0,31 1,8%
Pierścień D <sub>2</sub> + 3 pręty L <sub>2</sub>	0,644 <b>-18,9%</b>	0,306 <b>-26,5%</b>	0,546 <b>-25,7%</b>	0,254 3,8%	0,134 -3,9%	0,195 <b>-10,2%</b>	0,32 4,5%

#### 4. Analiza porównawcza wyników badań

Wyniki przeprowadzonych badań, pomimo wysokiej powtarzalności pomiarów w ramach poszczególnych rodzajów podstaw pierścieniowych i kierunków pomiaru (na co wskazują małe wartości odchyłeń standardowych w stosunku do wartości średnich m.in. w tab.2), wskazują na ich zróżnicowanie. Wartości zarejestrowanych amplitud przyspieszeń drgań wydają się zależeć zarówno od długości prętów kotwiących, jak i lokalizacji pomiarowych.

W celu przeprowadzenia analizy porównawczej i wyboru podstawy najkorzystniejszej pod względem wiarygodności rejestrowanych za jej pośrednictwem wartości amplitud przyspieszeń drgań powierzchniowych, niezbędne było przyjęcie odpowiedniego kryterium porównawczego. W związku z bardzo niskim poziomem tłumieniem materiałowego (stal) oraz równie niskim poziomem tłumienia konstrukcyjnego zaproponowanego układu podstaw pomiarowych, którego łączne tłumienie nie może przekraczać kilku procent, oraz tendencją podstaw pomiarowych sztywno połączonych z prętami kotwiącymi w gruncie do intensyfikacji drgań - charakterystycznej dla układów wspornikowych (szczególnie widoczną w przypadku podstaw z jednym prętym kotwiącym [2] – jak w podstawie typu „b”), za najbardziej wiarygodne uznano najniższe wartości amplitud przyspieszeń drgań powierzchniowych. Powyższe założenie wyda-

je się być zasadne pod warunkiem zapewnienia odpowiedniego stopnia „związania” podstaw pomiarowych z ośrodkiem gruntowym - co z pewnością miało miejsce w przypadku podstaw pierścieniowych kotwionych trzema prętami.

Analizując dane zamieszczone w tab. 3 i 4 pod kątem powyżej przyjętego kryterium należy stwierdzić, iż w przypadku obu przeprowadzonych etapów badań w 2.p.p. ( $L = 10$  m), w którym mieliśmy do czynienia ze znacznie mniej intensywnymi wartościami przyspieszeń drgań, najniższe wartości średnie z poszczególnych serii pomiarów uzyskano w przypadku podstawy pierścieniowej o mniejszej średnicy ( $D_1$ ) i krótszych prętach ( $L_1$ ) – za wyjątkiem kierunku pionowego w II. etapie badań.

W przypadku 1.p.p. ( $L = 5$  m) - zlokalizowanego znacznie bliżej źródła drgań impulsowych sytuacja nie jest już tak jednoznaczna. W II. etapie badań najniższe wartości uśrednionych przyspieszeń drgań uzyskano w przypadku większej podstawy pierścieniowej ( $D_2$ ) i o dłuższych prętach kotwiących ( $L_2$ ), podczas gdy w I. etapie badań najniższe wartości uśrednionych amplitud przyspieszeń drgań stwierdzono dla trzech różnych podstaw - w trzech różnych kierunkach pomiarowych. Może to także wskazywać na istotny wpływ intensywności propagowanych w ośrodku gruntowym drgań na mierzone wartości.

Biorąc pod uwagę, iż w 2.p.p. poziom rejestrowanych przyspieszeń drgań jest znacznie bliższy poziomowi drgań powierzchniowych propagowanych do otoczenia w przypadku drgań z jakimi najczęściej obecnie mamy do czynienia w praktyce inżynierskiej – tj. drgań komunikacyjnych, należy uznać, iż w analizowanym przypadku, w przyjętych lokalizacjach pomiarowych, optymalną podstawą ze względu na poziom rejestrowanych przyspieszeń drgań jest podstawa pierścieniowa o mniejszej średnicy ( $D_1$ ) i krótszych prętach kotwiących ( $L_1$ ).

## 5. Wnioski

Opisane w niniejszej pracy badania i analizy porównawcze propagacji drgań powierzchniowych w ośrodku gruntowym wskazują na konieczność kontynuacji na szerszą skalę badań in-situ z wykorzystaniem najnowszej generacji, precyzyjnych i wiarygodnych układów pomiarowych. Istnieje potrzeba dalszych prac w obszarze konstrukcji elementów kotwiących umożliwiających właściwe zespolenie akcelerometrów z gruntem. Uzyskane wyniki wskazują jednakże na kierunek właściwych rozwiązań w tym zakresie. Prace powinny objąć optymalizację proporcji w zakresie wymiarów i mas elementów składowych odpowiedniej „kotwy” gruntowej, jak również opracowanie rozwiązania charakteryzującego się stosunkowo prostym i jednocześnie precyzyjnym sposobem montażu podstaw pomiarowych na gruncie w trakcie prowadzenia prac w terenie.

## Literatura

- [1] Kawecki J., Stypuła K.: Zapewnienie komfortu wibracyjnego ludziom w budynkach narażonych na oddziaływania komunikacyjne. Politechnika Krakowska, Kraków 2013.
- [2] Maciąg E., Tataro T., Chełmecki J.: Badania drgań gruntu i niskich budynków od wpływu komunikacji miejskiej. Inżynieria i Budownictwo, nr 3/2005, s. 135-140.
- [3] PN-85/B-02170 – Ocena szkodliwości drgań przekazywanych przez podłozę na budynki.
- [4] PN-88/B-02171 – Ocena wpływu drgań na ludzi w budynkach.

## THE INFLUENCE OF ACCELEROMETER MOUNTING METHODS ON RELIABILITY OF EVALUATION OF VIBRATION COMFORT

### Summary

The aim of this work was the analysis the impact of accelerometer mounting on the level of recorded surface vibrations of the ground. The paper presents the results of field research based on the measurements of accelerations recorded at points located on ground surface. The research was carried out in two places in a gravel pit in the village of Mince near Białystok. The source of the vibration characterized by high repetition rate of pulse parameters was light falling weight deflectometer ZFG-01. This device generally is used for the determination of the stiffness modulus of the ground, however in this study it was used as source of vibration. Measurements of vibration have been carried out using top quality high-precision measuring system produced by Brüel&Kjær. Accelerometers were mounted on a sandy soil surface at measuring points located radially at 5 m and 10 m distance from the source of vibration. The paper analyses the influence of accelerometers mounting methods on the level of the recorded acceleration values of vibrations. Acceleration sensors were mounted on the subsoil in three ways – by ring bases fixing with ground by three rods (type a), bases with aluminium head screwed to a single rod driven into the ground (type b) and concrete plate with fixed on it sensors (type c). It has been shown that the sensors mounting method to the surface of the ground is crucial for the credibility of the performed measurements. The analysis showed that the results which could be considered as the most reliable, were obtained using a type bases.

**Keywords:** geotechnics, surface vibrations, ground, vibration measurement

DOI:10.7862/rb.2014.77

*Przesłano do redakcji: 12.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 16.12.2014 r.*

Aneta M. CZECHOWSKA-KOSACKA<sup>1</sup>

Robert KOSACKI<sup>2</sup>

Daniel BANCER<sup>3</sup>

Jan M. OLCHOWIK<sup>4</sup>

## **ZASTOSOWANIE OSADÓW ŚCIEKOWYCH JAKO KOMPONENTU PALIWA ALTERNATYWNEGO**

Streszczenie: Podczas oczyszczania ścieków miejskich powstają znaczne ilości osadów ściekowych. Jedną z metod jest ich wykorzystanie na cele nieprzemysłowe, a więc zagospodarowanie osadów do celów nawożenia, ulepszenia gleb oraz rekultywacji. Często jednak na przeszkodzie rolniczego wykorzystania stoi zbyt wysoka zawartość metali ciężkich. Wówczas należy rozważyć bardziej radykalne metody np. spalanie. Podstawą procesu jest maksymalne wykorzystanie ciepła spalania osadu oraz zmniejszenie tego typu odpadu. Przy prawidłowym doborze technologii osad może być spalony bez znacznego dodatku paliwa. W pracy podjęto próbę wykorzystania osadów ściekowych z mechaniczno biologicznej oczyszczalni ścieków jako paliwa alternatywnego i przeprowadzono próby uzyskania mieszaniny osadów ściekowych z odpadowym olejem powalcowniczym przy użyciu ogólnie dostępnych niejonowych substancji powierzchniowo czynnych. W trakcie badań określono następujące parametry decydujące o przydatności mieszaniny: wartość opałowa, trwałość oraz lepkość. Wyniki przeprowadzonych badań pozwoliły stwierdzić, że sporządzenie trwałej mieszaniny osadów ściekowych z olejem powalcowniczym o odpowiedniej wartości opałowej nie stanowi problemu, a wartość opałowa najkorzystniejszych mieszanin wynosi 18,62 - 25,71 MJ/kg co jest wyższe od zalecanej minimalnej wartości opałowej wynoszącej 16 MJ/kg. Badania wykazały, że sporządzenie trwałej mieszaniny osadów ściekowych z odpadowym olejem powalcowniczym o odpowiedniej wartości opałowej nie stanowi większego problemu. Zastosowanie tego rodzaju paliwa wymaga jednak modernizacji obiegu gazów odlotowych zapobiegających emisji odorów do atmosfery.

**Słowa kluczowe:** spalanie, olej odpadowy, immobilizacja, mieszanki paliwowe

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji/corresponding author: Aneta M. Czechowska-Kosacka, Politechnika Lubelska, Instytut Inżynierii Ochrony Środowiska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, +48 81 538 4700, a.czechowska-kosacka@pollub.pl

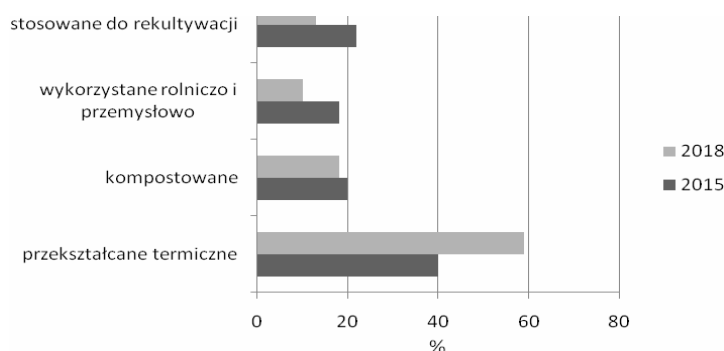
<sup>2</sup> Robert Kosacki, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin

<sup>3</sup> Daniel Bancer, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin

<sup>4</sup> Jan M. Olchowik, Politechnika Lubelska, Instytut Inżynierii Odnowialnych Źródeł Energii, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, +48 81 538 4700, j.olchowik@pollub.pl

## 1. Wstęp

Problem osadów ściekowych, który od zawsze towarzyszy procesom oczyszczania zawsze był marginalizowany i nie traktowany równorzędnie z problemem oczyszczania ścieków. Przyjmowane były proste metody przeróbki osadów, które później w znaczący sposób wpływały na ich późniejsze wykorzystanie (Rys. 1).



Rys. 1. Prognozowane zmiany w postępowaniu z komunalnymi osadami ściekowymi w Polsce [8]

Fig. 1. Forecasts concerning changes in municipal sewage sludge management in Poland [8]

Jedną z metod wykorzystywania właściwości energetycznych osadów jest wykorzystanie go jako biomasy, wówczas mógłby być on wykorzystany jako odnawialne źródło energii. Podczas fermentacji beztlenowej z osadów powstaje biogaz, który można wykorzystać do celów grzewczych, do napędzania silników gazowych i produkcji energii elektrycznej.

Osady ściekowe, powstające w oczyszczalniach ścieków są odpadami, które skutecznie, mogą być również unieszkodliwiane i zagospodarowane w rekultywacji gleb, produkcji kompostów czy też w rolnictwie [5]. Z uwagi jednak na ograniczenia związane z przyrodniczym wykorzystaniem spowodowane zawartością metali ciężkich i ryzyka przedostawania się ich do środowiska gleby, wód gruntowych i podziemnych należy rozważyć wykorzystanie termicznych metod przekształcania osadów [3,6]. W Polsce pracuje ponad 3900 oczyszczalni ścieków w tym 2200 oczyszczalni ścieków komunalnych, które produkują rocznie ok. 450 tys. Mg suchej masy (s.m.) osadów ściekowych, z której aż 188 tys. Mg s.m. kierowane jest na składowiska oraz do spalania. Produkty spalania osadów ściekowych kierowane są również na składowiska [2].

O realności stosowania termicznych metod unieszkodliwiania osadów ściekowych decydują w głównej mierze: ciepło spalania, zawartość substancji lotnych oraz mineralnych. Wymienione powyżej czynniki wpływają głównie na przebieg procesu oraz bilans energetyczny. Zawartość substancji organicznej w osadzie jest wskaźnikiem informującym o właściwościach paliwowych przy wykorzystaniu osadów w procesach termicznych. Wartość opałowa osadów ściekowych zależy od rodzaju osadów ściekowych i wynosi dla osadu surowego zawierającego 70% substancji lotnych 16 750-17 170 kJ/kg, dla osadu czynnego 14 650- 15 490 kJ/kg, a osadu przefermentowanego o zawartości 50% substancji palnych ok. 10 470 kJ/kg. W przypadku, gdy jedna trzecia masy osadów ściekowych stanowi część niepalną wartość opałowa suchego osadu wynosi około 14 MJ/kg. Wartość opałowa osadu przefermentowanego jest zwykle niższa od osadów przed fermentacją o około 2 MJ/kg [4]. W przypadku, kiedy wartość opałowa związków organicznych zawartych w osadach ściekowych nie zawsze wystarcza do odparowania wody w nich zawartej, wówczas osady ściekowe mogą być stosowane jako paliwo wspólnie z innym paliwem np. węglem, olejem opałowym, biogazem czy słomą.

W Polsce można wytworzyć kilka milionów ton paliwa alternatywnego, które zgodnie z szacunkami ma wartość opałową równą około 2 mln Mg węgla, czyli około 5% paliwa potrzebnego dla systemu energetycznego.

Termiczna utylizacja osadów ściekowych nabiera również większego znaczenia mając w perspektywie 2016 r., od początku którego nie będzie można składować osadów ściekowych zawierających w swoim składzie ponad 6% masy organicznej.

Jednym ze sposobów wykorzystania osadów ściekowych jest ich spalanie w piecach cementowych m. in. do produkcji eko-cementu [7].

Doświadczenia techniczne, zwłaszcza przeprowadzone w Niemczech, wskazują, że możliwe jest bezpieczne współspalanie wysuszonych osadów ściekowych stosując je jako paliwo uzupełniające strumień paliwa pierwotnego, w piecach cementowych, elektrowniach, elektrociepłowniach czy innych kotłowniach. Należy jednak pamiętać, że systemy oczyszczania gazów spalinyowych w elektrowniach, ciepłowniach czy kotłowniach nie są przystosowane do usuwania wielu zanieczyszczeń emitowanych w procesie spalania czy współspalania osadów ściekowych w stopniu wymaganym dla bezpiecznej emisji.

Bardzo ważnym zagadnieniem dotyczącym współspalania osadów ściekowych jest oczyszczanie spalin i emisja zanieczyszczeń mieszczących się w wyznaczonych prawem standardach. W krajach Unii Europejskiej obowiązującym aktem prawnym jest Dyrektywa 2000/76/WE w sprawie spalania odpadów [1]. Nie mniej ważna jest również dyrektywa o odnawialnych źródłach energii, która narzuca interpretację, że odpady biodegradowalne stanowią źródło energii odnawialnej.

W artykule 3 ramowej dyrektywy o odpadach odzysk definiowany jest jako „proces, którego głównym wynikiem jest to, aby odpady służyły użytecznemu

zastosowaniu, poprzez zastąpienie innych materiałów, które w przeciwnym wypadku zostałyby użyte do spełnienia danej funkcji, lub w wyniku którego odpady są przygotowywane do spełnienia takiej funkcji w danym zakładzie lub w szerszej gospodarce”. W załączniku II do dyrektywy zapisane jest, że odpady należy używać głównie jako środka generującego energię.

## 2. Materiały

W badaniach wykorzystano osady ściekowe pochodzące z mechaniczno-biologicznej oczyszczalni ścieków o ciepłe spalania wysuszonego osadu 14,50 MJ/kg i zawartości suchej masy 250,00 g/kg. Wysuszony osad jest więc paliwem porównywalnym energetycznie z drewnem, którego wartość opałowa waha się w granicach 14-19 MJ/kg. Należy jednak zwrócić uwagę na wartość opałową mokrego osadu, która wynosi 1606,57 kJ/kg. Trudno zatem uznać mechanicznie odwodniony osad ściekowy za atrakcyjne paliwo, jednak połączenie jego utylizacji z innym paliwem uzyskuje ekonomiczne uzasadnienie.

W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny osadów ściekowych wykorzystanych w badaniach.

Tabela 1. Skład chemiczny osadów ściekowych

Table 1. Chemical composition of sewage sludge

Parametr	Jednostka	Zawartość	W przeliczeniu na metal
CaO	g/kg s.m.	385	275
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		189	132
SiO <sub>2</sub>		135	67,5
S		19,3	-
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>		95	41,5
K <sub>2</sub> O		18,2	15,1
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		22,3	11,8
C		-	482
H		-	61,8
H <sub>2</sub> O		%	76
Pozostałość po prażeniu		6,81	-

Należy zwrócić uwagę na znaczącą zawartość siarki w osadzie ściekowym (w suchej masie) porównywalną z zawartością w węglu kamiennym nie najlepszej jakości, która w procesie spalania może uwolnić się do fazy gazowej i wraz z gazami odlotowymi przedostać się do atmosfery.

W badaniach użyto odpadowy olej powalcowniczy powstający w dawnej Hucie im. Sendzimira obecnie ArcelorMittal Poland S.A. Oddział w Krakowie, w ilości 50-120 Mg/m-c, którego wartość opałowa wynosi ok. 35 MJ/kg.

Porównując wartości opałowe oleju powalcowniczego z olejem opałowym (ok. 43 MJ/kg) należy stwierdzić, że jest on o klasę gorszy od oleju opałowego. Posiada on również szereg zanieczyszczeń (Tabela 2.) w postaci siarki (0,5-4,0%) i metali ciężkich takich jak: Pb, Cd, Cr, Zr, Mo, Ni i Cu. Biorąc pod uwagę wykorzystanie osadów ściekowych jako paliwa alternatywnego w picach cementowych z literatury wiadomo, że wszystkie te metale doskonale wiążą się z klinkierem w warunkach jego wytwarzania.

Tabela 2. Wyniki badań fizykochemicznych odpadowych olejów powalcowniczych

Table 2. Results of the physic-chemical analysis of waste rolling oil

Parametr	Jednostka	Wynik
Gęstość	kg/m <sup>3</sup>	930-1080
Lepkość w 80 <sup>o</sup> C	<sup>o</sup> E	6,5-7,9
Zawartość wody	%	18,2-21,3
Zawartość siarki	%	0,5-4,1
Zawartość substancji stałych	%	5,3-8,1
Pozostałość po prażeniu	%	6,8-7,3
Zawartość:		
Cu	mg/kg	420-640
Cd		<5
Cr		89-112
Pb		23-48
Ni		110-150
Zn		205-355
Mo		19-25
Wartość opałowa	MJ/kg	34,8-35,6

## 2.1. Wytwarzanie i spalanie mieszaniny osadów ściekowych z odpadowym olejem powalcowniczym

Z wielu metod otrzymywania emulsji zawierających wodę i ciekłe węglowodory wybrano najprostszą metodę zapewniającą realizację doświadczenia.

Mieszanina osadów z olejami nie musi być bardzo trwała, powinna jednak zapewniać podawanie do pieca w miarę jednorodnej mieszaniny paliwowej. Dlatego też przeprowadzono badania nad otrzymywaniem zhomogenizowanych mieszanin przy użyciu ogólnie dostępnych niejonowych substancji powierzchniowo czynnych: Rokafenol N-8 i Rokacet S-7.

Parametrami, które wydają się decydować o przydatności mieszaniny jako paliwa są: wartość opałowa, trwałość oraz lepkość.



Wytwarzanie mieszanin prowadzono w homogenizatorze laboratoryjnym przy obrotach noży tnących wynoszącym 500 obr/min i czasie homogenizacji 10 min.

Przeprowadzono również próby otrzymywania trwałych mieszanin przy użyciu sprężonego powietrza, jednak nie dały one oczekiwanego efektu.

Biorąc pod uwagę wartość opałową oleju powalcowniczego wyznaczono minimalną granicę oleju odpadowego na ok. 50%

Wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Podstawowe parametry mieszanin osadów ściekowych i odpadowego oleju powalcowniczego

Table 3. Basic parameters of sewage sludge and waste rolling oil mixtures

Zawartość osadu ściekowego [%]	Zawartość substancji powierzchniowo czynnej		Trwałość [d]	Lepkość [ <sup>0</sup> E]	Wartość opałowa MJ/kg
	Rokafenol N-8	Rokacet S-7			
27,5	-	5	nietrwały	237	25,23
37,5	-	5	nietrwały	256	22,46
47,5	-	5	nietrwały	284	18,94
27,5	5	-	nietrwały	225	25,64
37,5	5	-	nietrwały	238	22,49
47,5	5	-	nietrwały	251	18,61
27,5	2,5	2,5	4	113	25,71
37,5	2,5	2,5	4	123	22,73
47,5	2,5	2,5	4	149	18,62
48,5	1	2	1	183	18,97
48,0	1	3	1	196	18,46
47,0	1	5	2	194	19,28
48,5	2	1	1	184	17,56
48,0	3	1	2	193	19,88
4,0	5	1	2	174	18,19

Najkorzystniejsze parametry posiadają mieszaniny osadów ściekowych i oleju odpadowego zawierające po 2,5% obu substancji powierzchniowo czynnych. Mieszaniny te są trwałe przez 4 dni co umożliwia ich dłuższe przechowywanie. Mieszaniny te posiadają znaczną lepkość, jednak nie stanowi to przeszkody w podawaniu ich do pieca obrotowego.

Próby otrzymania trwałej mieszaniny osadów ściekowych i oleju odpadowego za pomocą sprężonego powietrza nie dały oczekiwanego efektu.

Spalanie otrzymanej mieszanki paliwowej przeprowadzono w temperaturach 1200, 1400, 1600°C przy nadmuchu powietrza do pieca rurowego wielokrotnie przekraczającym stechiometryczne jego zapotrzebowanie. Czas spalania próbki wynosił 35-55 sekund. W gazach odlotowych oznaczono zawartość SO<sub>2</sub> metodą jodometryczną i NO<sub>2</sub> metodą kolorymetryczną po uprzedniej sorpcji gazów w roztworze NaOH.

Przeprowadzono również próby wypalania klinkieru w piecu rurowym ze szlamu portlandzkiego wymieszanego z mieszanką paliwową zawierającą po 47,5% osadów ściekowych i oleju odpadowego oraz po 2,5% obu substancji powierzchniowo czynnych.

Do próbki 19 g szlamu dodawano 1 g mieszanki, homogenizowano i wypalano w temperaturach 1200, 1400, 1600°C. Czas wypalania próbki po szybkim wysuszeniu (1 min) wynosił 120 min. Uzyskane rezultaty przedstawiono w tabelach 4 i 5.

Tabela 4. Wyniki spalania 1 g paliwa (po 47,5% osadów ściekowych i oleju oraz po 2,5% substancji powierzchniowo czynnych)

Table 4. Results obtained while combusting 1 g of fuel (containing 47.5% of sewage sludge, 47.5% of oil and 2.5% of each of the surfactants)

Temperatura procesu [°C]	Ilość powstałego SO <sub>2</sub> [g/kg paliwa]	Ilość powstałego NO <sub>2</sub> [g/kg paliwa]
1200	23,6	2,2
1400	23,2	2,6
1600	23,5	4,1

Tabela 5. Wyniki wypalania klinkieru w piecu laboratoryjnym - wsad surowcowy z dodatkiem 5% (1g) paliwa (po 47,5% osadów ściekowych i po 2,5% substancji powierzchniowo czynnych)

Table 5. Results obtained in clinker burning process in a laboratory furnace – raw materials input with the additive of 5% (1g) of fuel (containing 47.5% of sewage sludge, 47.5% of oil and 2.5% of each of the surfactants).

Temperatura procesu [°C]	Ilość powstałego SO <sub>2</sub> [g/kg paliwa]	Ilość powstałego NO <sub>2</sub> [g/kg paliwa]
1200	3,3	3,2
1400	3,7	3,6
1600	3,5	3,9

Przeprowadzone próby dowodzą, że ilość powstającego NO<sub>2</sub> nie zależy od rodzaju procesu wysokotemperaturowego a jedynie od wysokości temperatury. Wartość emisji dwutlenku azotu wzrasta wraz ze wzrostem temperatury nawet dwukrotnie tab. 4. Ilość dwutlenku siarki powstającego podczas spalania paliwa jest wynikiem całkowitego utlenienia siarki obecnej w mieszaninie. Wymiesza-

nie paliwa ze szlaczem portlandzkim powoduje jej związanie w 70-80%, przypuszczalnie w postaci siarczanów.

Piece cementowe są jedynymi z najlepszych urządzeń przystosowanych do współspalania odpadów w sposób przyjazny dla środowiska, przede wszystkim ze względu na wysoką temperaturę.

Kolejnym argumentem przemawiającym za spalaniem osadów ściekowych w cementowniach, to alkaliczne środowisko wsadu do pieca. Dzięki takim warunkom - przewadze tlenku wapna możliwe jest doskonałe wiązanie składników o charakterze kwaśnym. Ponadto popiół powstały w wyniku spalania odpadów wbudowuje się w całości w strukturę klinkieru bez szkody dla jego jakości – nie ma więc odpadów po spalaniu. Należy jednak zaznaczyć, że w piecu cementowym nie ma możliwości spalania wszystkich odpadów ponieważ paliwo alternatywne musi być dobrej jakości. Poza zutylizowaniem odpadów, wykorzystanie materiałów odpadowych w cementowniach pozwala na redukcję emisji dwutlenku węgla.

### 3. Podsumowanie

Zgodnie z wymogami ustawy Prawo wodne z dnia 18 lipca 2001 r. oraz zapisami Traktatu Akcesyjnego Polska została zobligowana do redukcji ładunków zanieczyszczeń biodegradowalnych poprzez osiągnięcie do 2015 r. 100% redukcji związków azotu i fosforu. Konieczność osiągnięcia powyższych wymagań implikuje konieczność budowy nowych i modernizacji starych oczyszczalni ścieków. Konsekwencją rozbudowy i modernizacji ciągów oczyszczania ścieków jest również konieczność nowoczesnego podejścia do procesów przeróbki i zagospodarowania osadów, których prognozowany jest ogólny wzrost o około 62%.

Krajowy Program Gospodarki Odpadami 2014 przewiduje do roku 2020 następujące sposoby zagospodarowania osadów m.in.: wykorzystanie do rekultywacji, wykorzystanie rolnicze i przyrodnicze, produkcję kompostu oraz metody termiczne. W ostatnich latach wśród wymienionych koncepcji zagospodarowania osadów ściekowych dominującą rolę odgrywał będzie kierunek termicznego przekształcania osadów.

Przeprowadzone badania wykazały, że najkorzystniejsze parametry posiadają mieszaniny osadów ściekowych z odpadowym olejem powalcowniczym zawierające po 2,65% substancji powierzchniowo czynnych. Wartość opałowa tych mieszanin wynosi od 18,62 do 25,71 MJ/kg co jest wyższe od zalecanej minimalnej wartości opałowej przyjętej przez Europejskie Stowarzyszenie Termicznego przekształcania odpadów (EURITS) wynoszącej minimum 15 MJ/kg.

Sporządzenie trwałej mieszaniny osadów ściekowych z odpadowym olejem powalcowniczym o odpowiedniej wartości opałowej nie stanowi większego problemu. Z ekonomicznego punktu widzenia godne polecenia wydają się spo-

rzędzenie mieszanki paliwowej w miejscu spalania. Zastosowanie jednak tego rodzaju paliwa wymaga modernizacji obiegu gazów odlotowych zapobiegających emisji odorów do atmosfery.

Pomimo, że nie przeprowadzono analizy ekonomicznej nie ma wątpliwości, że koszty energii uzyskanej z mieszaniny osadów ściekowych z olejem powalcowniczym przekraczają koszt energii otrzymywanej z pyłu węglowego.

Z punktu widzenia ochrony środowiska przed odpadami, utylizacja osadów ściekowych i odpadowych olejów powalcowniczych powinna być rozważona jako jedna z alternatywnych metod wykorzystania i unieszkodliwiania tego typu odpadów.

## Literatura

- [1] Dyrektywa 2000/76/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 4 grudnia 2000 r. w sprawie spalania odpadów.
- [2] Kosturkiewicz B.: Metoda zagospodarowania osadów ściekowych w przemyśle energetycznym. Monografie Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH, 32, 2006, 249-259.
- [3] Murakami T., Suzuki Y., Nagasawa H., Yamamoto T., Koseki T.: Combustion characteristic of sewage sludge in an incineration plant for energy recovery, *Fuel Processing Technology*, 90, 2009, 778-783.
- [4] Schubering A.: Kompleksowe rozwiązanie problemu odwadniania szlamu, aż do uzyskania suchego granulatu, *Symp. Nauk.-Tech. nt. Nowoczesne technologie ochrony środowiska w Austrii*, Warszawa 1992.
- [5] Siuta J.: Rekultywacyjna efektywność osadów ściekowych na składowiskach odpadów przemysłowych. *Acta Agrophysica*, 5(2), 2005, 417-425.
- [6] Werther J., Ogada T.: Sewage sludge combustion, *Progress in Energy and Combustion Science*, 25, 1995, 55-119.
- [7] Yiming L., Shaoqi Z., Fuzhen L., Yixia L.: Utilization of municipal sewage sludge as additives for the production of eco-cement, *Journal of Hazardous Materials*, 213 - 214, 2012, 457- 465.
- [8] <http://www.kierunekenergetyka.pl/artykul,3029,doswiadczenia-i-potencjal-termicznego-zagospodarowania-osadow-sciekowych.html> [dostęp 10 maja 2014 r.]

## APPLICATION OF SEWAGE SLUDGE AS A COMPONENT OF ALTERNATIVE FUEL

### Summary

Significant amounts of sewage sludge are generated in the process of municipal wastewater treatment. One of the methods of its disposal is its reuse for the non-industrial purposes such as fertilization, soil improvement and land reclamation. However, too high content of heavy metals often makes the agricultural use of sewage sludge impossible. In such cases more radical disposal methods, one of which is combustion, should be considered. The basis for the combustion process is the maximum use of the sludge combustion heat and further reduction of this type of waste.

With proper application of the combustion technology sewage sludge can be combusted with no significant additive of fuel. The aim of this research was to analyze the possibilities for the use of sewage sludge produced in the mechanical-biological wastewater treatment plant as an alternative fuel. The authors of the study made attempts to obtain a mixture of sewage sludge and waste rolling oil with the use of commonly available non-ionic surfactants. During the experiments the following parameters decisive for the mixture usefulness were determined: the mixture calorific value, stability and viscosity. The results of the experiments proved that it is not a major problem to obtain a stable mixture of sewage sludge and waste rolling oil with adequate calorific value and the calorific value of the optimal mixtures reaches the level of 18.62 to 25.71 MJ/kg, which is higher than the recommended minimum calorific value of 16 MJ/kg.

**Keywords:** combustion, waste oil, immobilization, fuel mixture

DOI:10.7862/rb.2014.78

*Przesłano do redakcji: 11.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 16.12.2014 r.*

Bernardeta DĘBSKA<sup>1</sup>  
Lech LICHOLAŃ<sup>2</sup>

## BADANIA NAD WYKORZYSTANIEM MODYFIKOWANYCH ŻYWIC EPOKSYDOWYCH JAKO GŁÓWNEGO SKŁADNIKA KLEJÓW STOSOWANYCH W BUDOWNICTWIE

Swoiste właściwości żywic epoksydowych umożliwiają zaliczenie tych polimerów do grupy najlepszych materiałów klejowych. O wyższości klejów epoksydowych decyduje m.in. ich doskonała przyczepność do łączonych powierzchni oraz bardzo dobra odporność chemiczna. Ich stosowanie jest ułatwione poprzez możliwość prowadzenia procesu utwardzania z zastosowaniem jedynie nacisku zapewniającego dokładne przyleganie powierzchni łączonych. Złącze epoksydowe może niekiedy zastąpić takie sposoby łączenia, jak nitowanie lub spawanie. Fakt ten jest szczególnie ważny w tych zastosowaniach, gdzie wymagana jest duża gładkość powierzchni. Istotna jest także możliwość łączenia ze sobą różnych materiałów np. metali, szkła, ceramiki, betonu, tworzyw sztucznych oraz gumy. Modyfikowane kleje epoksydowe o zwiększonej elastyczności stanowią doskonałe rozwiązanie w przypadku różnic we współczynnikach rozszerzalności materiałów łączonych i utwardzonej żywicy. W pracy opisano przeprowadzone badania żywicy epoksydowej Epidian 5 oraz kompozycji tej samej żywicy częściowo zastąpionej przez glikolizat odpadowego poli(tereftalanu etylenu) (PET). Porównano wybrane właściwości otrzymanych kompozycji, pod kątem możliwości ich aplikacji jako głównego składnika klejów budowlanych. Wykazano, że zaproponowana kompozycja epoksydowa odznacza się korzystnymi właściwościami mechanicznymi, a jednocześnie zastosowany modyfikator pełni rolę substancji poprawiającej elastyczność spoiny klejowej. Dodatkowo, modyfikator obniża koszty produkcji klejów, które postrzegane są za stosunkowo drogie. Wykorzystanie materiałów pochodzących z recyklingu (odpadowy PET) jako modyfikatorów klejów epoksydowych stwarza możliwości udoskonalenia cech technicznych tych materiałów, dając jednocześnie znaczące korzyści środowiskowe.

**Słowa kluczowe:** odpady PET, właściwości mechaniczne, elastyczność spoiny, kleje epoksydowe

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Bernardeta Dębska, Politechnika Rzeszowska, Zakład Budownictwa Ogólnego, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów, tel. 178651323, bdebska@prz.edu.pl.

<sup>2</sup> Lech Licholań, Politechnika Rzeszowska, Zakład Budownictwa Ogólnego, ul. Poznańska 2, 35-959 Rzeszów, tel. 178651327, Lech.Licholai@prz.edu.pl

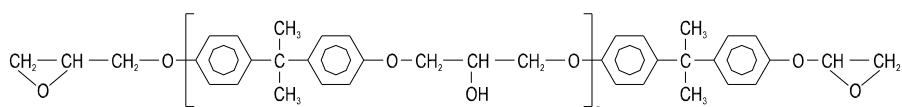
## 1. Wprowadzenie

Kleje są to substancje, będące w stanie ciekłym które po wprowadzeniu pomiędzy dwie powierzchnie wykazują zdolność do trwałego połączenia tych elementów. Proces łączenia zachodzi w wyniku działania sił adhezji kleju do powierzchni klejonej oraz sił spójności wewnętrznej działających w warstwie kleju (kohezja). Klej powinien charakteryzować się dużą przyczepnością do podłoża i trwałością złącza, jednocześnie nie powodując zmian kształtu ani innych właściwości materiałów łączonych [1].

W budownictwie pierwsze substancje klejące stosowano do łączenia różnych materiałów już kilka tysięcy lat temu. Wykorzystywano wtedy siłę klejącą naturalnych substancji „kleistych”, m.in. białka, kazeiny zawartej w mleku, czy żywicy wydzielanej przez niektóre rośliny. Obecnie, ogromne znaczenie klejów wynika przede wszystkim z szerokiego rozpowszechnienia substancji wielkocząsteczkowych, czyli polimerów [2]. Polimer jako podstawowy składnik kleju nadaje mu unikalną budowę wewnętrzną, a tym samym zdolność do klejenia. Jednocześnie dzięki obecności polimerów uzyskuje się pożądaną przyczepność kleju do sklejaných powierzchni. Polimery nadają także spoinie odpowiednią wytrzymałość mechaniczną, którą osiąga się po zakończeniu procesu utwardzania oraz dobrą odporność na działanie różnych czynników korozyjnych [1].

W ostatnich latach w wielu gałęziach przemysłu można było zauważyć bardzo szerokie zastosowanie klejenia jako sposobu łączenia różnych materiałów. Z uwagi na duże możliwości stosowania substancji klejących w budownictwie, żywice i kleje z nich wytworzone próbowano już od dawna używać do łączenia najczęściej spotykanych materiałów budowlanych, takich jak beton, materiały ceramiczne, drewno, metale itp. Proces klejenia materiałów budowlanych prowadzony zarówno przy ich produkcji jak też na placu budowy, wymusza na inżynierach konieczność rozwiązania specyficznych problemów, odmiennych od tych, które zwykle występują, gdy stosuje się kleje w innych przypadkach. [3]. Wszystkie substancje pochodzenia naturalnego i syntetycznego o właściwościach klejących mają jedną wspólną cechę: są zbudowane ze stosunkowo dużych cząsteczek, których masa cząsteczkowa jest najczęściej większa niż 10 000. Dzięki temu osiąga się nie tylko pożądaną przyczepność do powierzchni klejonych, lecz także dużą wytrzymałość na rozerwanie spoiny klejowej, ponieważ przy oddzieraniu lub odrywaniu poszczególnych makrocząsteczek polimeru trzeba przezwyciężyć tym większe siły międzycząsteczkowe, im dłuższe są łańcuchy polimerowe w tych cząsteczkach. W zasadzie wszystkie substancje wielkocząsteczkowe można uważać za potencjalne kleje. Jednakże zastosowanie praktyczne znalazły tylko te polimery, które są rozpuszczalne lub topliwe, to znaczy tylko takie, które mogą zwilżać powierzchnie stałe, gdyż jest to podstawowa cecha warunkująca przyczepność materiału do podłoża.

Do najpopularniejszych substancji stanowiących bazę dla klejów zaliczyć można obecnie żywice epoksydowe [4-7]. Są to związki zawierające w cząsteczce więcej niż jedną grupę epoksydową, dla których można przeprowadzić reakcję utwardzania, w wyniku której otrzymuje się usieciowane, nierozpuszczalne i nietopliwe tworzywa [8]. Żywice epoksydowe otrzymuje się z *p,p*-dihydroksydifenylopropanu (bisfenol A lub dian) i 1,2-epoksy-3-chloropropanu (epichlorohydryny). Reakcja przebiega w środowisku alkalicznym. Wzór ogólny żywicy epoksydowej przedstawia rysunek 1.



Rys.1. Wzór ogólny żywicy epoksydowej

Fig. 1. The general formula of epoxy resin

Żywice epoksydowe oparte na bisfenolu A charakteryzuje m.in.:

- duża wytrzymałość mechaniczna, twardość, odporność chemiczna,
- doskonała przyczepność do różnych materiałów,
- odporność na: słabe kwasy, alkalia, alkohole, naftę, benzen, oleje, tłuszcze, rozpuszczalniki organiczne, gorącą wodę [9].

To właśnie te unikalne właściwości czynią żywice epoksydowe idealną bazą do produkcji klejów. Kleje te nie wnikają zbyt głęboko w materiał, mają one jednak silne powinowactwo chemiczne do klejonego materiału a warstwa samego utwardzonego kleju jest bardzo odporna mechanicznie. Kleje epoksydowe najlepiej sprawdzają się podczas łączenia m.in. takich materiałów jak metale, szkło, czy drewno [7, 10]. Obok cechującej je wysokiej wytrzymałości mechanicznej oraz właściwości adhezyjnych, od klejów wymaga się też zadowalającej odporności na pękanie i udarności. Utwardzone materiały epoksydowe na ogół są dość kruche i odznaczają się małą odpornością na pękanie. Stąd też często żywice epoksydowe poddaje się modyfikacji uelastyczniającej za pomocą kauczuków lub modyfikatorów termoplastycznych [10]. Opisane w tym artykule wyniki przeprowadzonych badań wykazują, że podobną rolę może pełnić glikolizat otrzymany z glikolu propylenowego i odpadowego poli(tereftalanu etylenu).

## 2. Użyte surowce i metody otrzymywania kompozycji żywicznej

W badaniach wykorzystano handlową żywicę epoksydową Epidian 5 o wybranych właściwościach przedstawionych w tabeli 1 oraz kompozycję, w której 9% wag. żywicy Epidian 5 zastąpiono glikolizatem. Modyfikator ten uzyskano w procesie glikolizy, w którym zastosowano glikol propylenowy oraz odpadowy poli(tereftalan etylenu) (PET). Krótką charakterystykę warunków,



w których przebiegał proces otrzymywania glikolizatu stosowanego w badaniach, zawiera tabela 2. W przypadku kompozycji epoksydowej żywicy epoksydową i modyfikator po wymieszaniu wygrzewano w temp. 85°C w ciągu 1 godziny. Zawartość modyfikatora w mieszaninie została dobrana w oparciu o przeprowadzone wcześniej badania kompozytów żywicznych [11]. W obydwu przypadkach jako utwardzacz zastosowano trietylenotetraaminę (Z-1).

Tabela 1. Właściwości fizyczno-chemiczne Epidianu 5, na podstawie [12]

Table 1. Physicochemical properties of Epidian 5, based on [12]

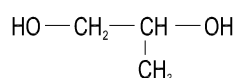
Rodzaj żywicy	Gęstość [g/cm <sup>3</sup> ]	Lepkość 25°C [mPa s]	Ciężar cząsteczkowy [g/mol]	Liczba epoksydowa LE [mol/100g]
Epidian 5	1,17	30000	450	0,49

Tabela 2. Krótka charakterystyka warunków procesu uzyskiwania glikolizatu stosowanego w badaniach

Table 2. Brief characteristics the process of obtaining glycolysate used in research

Rodzaj glikolu stosowanego w procesie glikolizy	Udział molowy		Temperatura	Katalizator
	PET	Glikol	[°C]	–
propylenowy	1	1,7	210	octan cynku

Wzór chemiczny glikolu wymienionego w tabeli 2 przedstawiono na rysunku 2.



Rys.2. Wzór strukturalny glikolu propylenowego (propano-1,2-diol)

Fig. 2. Structural formula of propylene glycol (propane-1,2-diol)

### 3. Metodyka i wyniki badań

Oznaczenia najważniejszych parametrów charakteryzujących czystą żywicę epoksydową oraz jej kompozycję, w której 9% wagowych żywicy zastąpiono glikolizatem PET opartym na glikolu propylenowym przeprowadzono w oparciu o obowiązujące normy dotyczące badań tworzyw sztucznych, których numery podano w tabeli 3. Także, uzyskane wyniki badań zestawiono w tabeli 3.

Tabela 3. Porównanie wartości wybranych parametrów charakteryzujących żywicę epoksydową Epidian 5 (EP5) oraz kompozycję żywicy epoksydowej Epidian 5 (EP5) i glikolizatu PET

Table 3. Comparison of the values of selected parameters characterizing the epoxy resin Epidian 5 (EP5) and composition epoxy resin Epidian 5 (EP5) and glycolysate of PET

Lp.	Oznaczone parametry żywicy utwardzonej	Metoda oznaczenia (numer normy PN-EN ISO)	Żywica EP 5	Kompozycja EP 5 i 9% wag. glikolizatu PET	Względna zmiana parametru, %
1	Wytrzymałość na zginanie, MPa	178: 2006	133	153	15,04
2	Moduł sprężystości przy zginaniu, MPa	178: 2006	3230	3690	14,24
3	Strzałka ugięcia, mm	178: 2006	8,1	8,8	8,64
4	Naprężenie przy zerwaniu, MPa	527-1: 1998 527-2: 1998	86,3	95,1	10,20
5	Moduł sprężystości przy rozciąganiu, MPa	527-1: 1998 527-2: 1998	3430	3800	10,79
6	Wydłużenie względne przy zerwaniu, %	527-1: 1998 527-2: 1998	5,6	5,2	-7,14
7	Wytrzymałość na ściskanie, MPa	604: 2006	121	127	4,96
8	Udarność bez karbu, kJ/m <sup>2</sup>	179-1: 2004	30	39	30,00
9	Twardość metodą wciskania kulki, MPa	2039-1:2002	124	136	9,68
10	Temp. ugięcia pod obciążeniem, °C	75-1: 2006 75-2: 2006	107,8	77,3	-28,29

#### 4. Analiza wyników i wnioski

Analizując uzyskane wyniki badań (Tab. 3) można zauważyć, że modyfikator wpływa korzystnie na większość przebadanych właściwości utwardzonej kompozycji. Stwierdzono, że dodatek glikolizatu PET poprawia właściwości mechaniczne, w tym szczególnie wytrzymałość na zginanie i moduł sprężystości przy zginaniu, których wartości w stosunku do czystej żywicy wzrosły o ok. 15% (1 i 2 wiersz, tab. 3). Zauważalny jest również istotny wzrost naprężenia przy zerwaniu oraz modułu sprężystości przy rozciąganiu, który charakteryzuje odkształcalność materiału odpowiednio o 10,2% i 10,79%. Wprawdzie zmalało wydłużenie względne przy zerwaniu o ok. 7%, ale zwiększeniu uległy strzałka ugięcia o 8,64% i wytrzymałość na ściskanie o 4,96%. Bardzo istotnym para-

metrem jest tutaj udarność. Definiuje się ją jako miarę kruchości materiałów określoną przez energię potrzebną do dynamicznego złamania próbki, odnoszoną do wielkości poprzecznego przekroju kształtki. Wzrost wartości dla tej właściwości wyniósł aż 30% w porównaniu do udarności zbadanej dla żywicy niemodyfikowanej. Kompozycję zawierającą modyfikator cechują więc lepsze parametry wytrzymałościowe, a dodatkowo jest ona bardziej elastyczna w porównaniu do standardowej żywicy.

Żywice epoksydowe utwardzane aminami to materiały o wysokich parametrach wytrzymałościowych, jednocześnie jednak sztywne i stosunkowo kruche, co skutkuje powstawaniem naprężeń wewnętrznych, odpowiedzialnych za pękanie wyrobów uzyskanych na bazie żywic epoksydowych. Fakt ten ma szczególne znaczenie podczas procesu łączenia żywicy epoksydowej z innymi sztywnymi materiałami, takimi jak metale, szkło, beton (np. przy nakładaniu powłok epoksydowych na beton). Na podstawie uzyskanych wyników badań można wnioskować, że modyfikator pełni w kompozycji żywicznej rolę środka uelastyczniającego kompozyt poprzez wbudowanie w strukturę żywicy dostatecznie długiego i giętkiego łańcucha. Obecność elastycznych łańcuchów hydroksyalkilowych o różnej długości w strukturze żywic epoksydowych stanowiących spoiwo w otrzymanywanych kompozytach żywicznych, zmniejsza ich kruchość. Glikolizat PET może więc zostać wykorzystany jako dodatek uelastyczniający do handlowych żywic epoksydowych. Działanie uelastyczniające modyfikatora ma duże znaczenie w przypadku wykonania z klejów epoksydowych spoin klejowych. Poprawa parametrów wytrzymałościowych kompozycji żywicznych otrzymanych po dodaniu modyfikatora może być także konsekwencją występowania wolnego glikolu w produktach glikolizy. Parametr ten decyduje o długości fragmentów oligomerów tereftalowych wbudowanych w strukturę usieciowanej kompozycji, charakteryzujących się mniejszą sztywnością budowy niż fragmenty pochodzące od dianu.

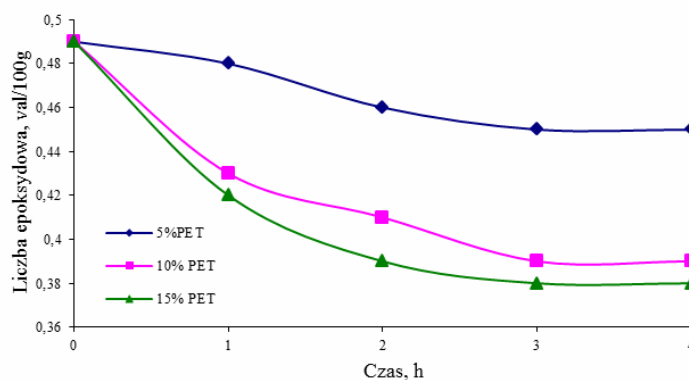
W przypadku kompozycji epoksydowej żywicę epoksydową i modyfikator wygrzewano, umożliwiając tym samym przebieg reakcji między grupą epoksydową a grupą hydroksylową glikolizatu PET według schematu przedstawionego na rysunku 3.



Rys.3. Schemat reakcji między grupą epoksydową żywicy a grupą hydroksylową glikolizatu PET

Fig. 3. Scheme of the reaction between an epoxy resin and a hydroxyl group of PET glycolysate

Fakt ten potwierdzają wyniki zmian liczby epoksydowej modyfikowanych kompozycji obserwowane podczas monitorowania procesu wygrzewania (Rys. 4).



Rys.4. Zależność wartości liczby epoksydowej od czasu wygrzewania w temp.  $85 \pm 1^\circ\text{C}$  dla kompozycji EP-PET

Fig. 4. The dependence the epoxy number of the soak time at  $85 \pm 1^\circ\text{C}$  for the composition EP-PET

Obniżanie się wartości liczby epoksydowej świadczy o tym, że modyfikator chemicznie wbudowuje się w żywicę, zmieniając jednocześnie jej strukturę, a tym samym również wpływając na zmianę właściwości otrzymanego produktu.

W konsekwencji zastąpienia w kompozycji 9% wagowych żywicy epoksydowej przez glikolizat otrzymany na bazie odpadów PET, uzyskuje się tańszy produkt o lepszych parametrach wytrzymałościowych. Jednocześnie, dzięki temu, otwierają się możliwości wykorzystania do produkcji klejów materiałów odpadowych, które stanowią zazwyczaj duży problem środowiskowy, co jest szczególnie ważne w kontekście projektów, w których zachowane powinny być zasady zrównoważonego rozwoju. Prowadzenie badań w tej dziedzinie wydaje się więc obiecujące, a uzyskane wyniki warte szerszego rozpowszechnienia.

## Literatura

- [1] Czarnecki L., Broniewski T., Henning O.: Chemia w budownictwie, Wydawnictwo Arkady, Warszawa 1994.
- [2] Dimter L.: Kleje do tworzyw sztucznych, WNT, Warszawa 1971.
- [3] Cagle Ch. V. [red.]: Kleje i klejenie. Poradnik inżyniera i technika, WNT, Warszawa 1977.
- [4] Lettieri M., Frigione M.: Effects of humid environment on thermal and mechanical properties of a cold-curing structural epoxy adhesive, *Construction and Building Materials*, vol. 30, 2012, pp. 753–760.
- [5] Prolongo S. G., Del Rosario G., Urena A.: Comparative study on the adhesive properties of different epoxy resins, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 26, 2006, pp. 125–132.

- [6] Zhou J., Lucas J. P.: Hygrothermal effects of epoxy resin. Part II: Variations of glass transition temperature, *Polymer*, vol. 40, 1999, pp. 5513–5522.
- [7] Custódio J., Broughton J., Cruz H.: Rehabilitation of timber structures – Preparation and environmental service condition effects on the bulk performance of epoxy adhesives, *Construction and Building Materials*, vol. 25, 2011, pp. 3570–3582.
- [8] Czub P., Bończa-Tomaszewski Z., Pęczek P., Pieliowski J.: *Chemia i technologia żywic epoksydowych*, WNT, Warszawa 2002.
- [9] Szlezyngier W.: *Tworzywa sztuczne*, Wydawnictwo Oświatowe FOSZE, Rzeszów 1998.
- [10] Pilawka R., Spychaj T.: Kleje epoksydowe z nanocząstkami do łączenia metali, *Kompozyty (Composites)*, nr 4, 2004, s. 33–35.
- [11] Lichołai L., Dębska B.: The multidimensional response function exemplified by epoxy mortars: Looking for the global extreme, *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol.14, no.3, 2014, pp. 466–475.
- [12] *Informator wyrobów Zakładów Chemicznych „Organika-Sarżyna” w Nowej Sarżynie*, 2007.

## RESEARCH INTO THE USE OF MODIFIED EPOXY RESINS AS THE MAIN COMPONENT OF ADHESIVES IN BUILDING INDUSTRY

### Summary

The unique properties of epoxy resins allow rating these polymers among the best gluing materials. Their superiority results, among other things, from their perfect adhesion to surfaces to be glued and their good chemical resistance. Their use is made easier by the possibility of carrying out the curing process only by applying pressure ensuring tight fitting of the glued surfaces. An epoxy joint can sometimes replace such joining methods as riveting or welding. This seems to be particularly important where great surface smoothness is required. The possibility of joining together different materials, e.g. metals, glass, ceramics, concrete, plastics and rubber is also essential. Modified epoxy adhesives of increased elasticity are a perfect solution in the case of expansion coefficient differences of joined materials and cured resin. The paper describes the research on Epidian 5 epoxy resin and a compound of the same resin partially replaced by the glycolisate of waste poly(ethylene terephthalate)(PET). Chosen properties of the compounds obtained were compared with a view to their application as the main component of adhesives used in building industry. It was demonstrated that the recommended epoxy compound shows good mechanical properties and at the same time the modifier that was applied works as a substance upgrading the elasticity of the adhesive joint. Additionally, the modifier reduces the production cost of the adhesives which are thought to be relatively expensive. The use of materials from recycling (waste PET) as epoxy adhesive modifiers creates a chance to improve the technical properties of adhesives and is at the same time beneficial to the environment.

**Keywords:** PET waste, mechanical properties, weld flexibility, epoxy adhesives

DOI:10.7862/rb.2014.79

*Przesłano do redakcji: 24.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 16.12.2014 r.*

**Jolanta FIEDUCIK<sup>1</sup>**  
**Adam GAWROŃSKI<sup>2</sup>**  
**Ryszard MATUSZCZAK<sup>3</sup>**

## **OSADY ŚCIEKOWE I ICH UTYLIZACJA W PRZEDSIĘBIORSTWIE WODOCIĄGÓW I KANALIZACJI W OLSZTYNIE**

W artykule przedstawiono rozwiązanie aktualnego problemu utylizacji osadów ściekowych na przykładzie Oczyszczalni Ścieków „Łyna” w Olsztynie. Dokonano opisu budowy oraz zasady działania oczyszczalni. Proces oczyszczania ścieków został przedstawiony od momentu przyjęcia ścieków w budynku krat, do momentu zrzucenia oczyszczonej wody do rzeki Łyny. Zgodnie z ustawą o odpadach, która nakazuje przetworzyć m. osady ściekowe, w miejscu ich powstania, na terenie oczyszczalni zdecydowano się na pięciostopniowe unieszkodliwianie osadów ściekowych. W pierwszej kolejności osad kierowany jest do zamkniętych komór fermentacyjnych, w których zachodzi fermentacja w obecności bakterii metanowych i saprofitycznych. Procesowi temu towarzyszy wydzielanie się biogazu, który jest zagospodarowywany na cele energetyczne. Następnie w otwartych basenach fermentacyjnych w warunkach tlenowych zachodzi dalsza fermentacja i proces stabilizacji wpływający na zmniejszenie objętości osadów. Kolejnym etapem jest mechaniczne odwodnienie osadu do zawartości suchej masy na poziomie około 20%. Oczyszczalnia ścieków „Łyna” w Olsztynie podążając za nowymi trendami ekologicznymi, i realizując z wyprzedzeniem obowiązujące w przyszłości przepisy prawne zdecydowała się na budowę nowoczesnej instalacji do termicznego przetwarzania osadów. Zatem odwodniony osad kierowany jest do instalacji termicznego przekształcania osadów składającej się z suszarni i spalarni osadów. Na wstępie tego procesu technologicznego osad poddawany jest termicznemu suszeniu, po uzyskaniu odpowiednich parametrów zostaje spaletyzowany. Kolejnym etapem utylizacji osadu jest jego spalanie. Przedstawiono analizę energetyczną procesu termicznej utylizacji osadu. Masa popiołu powstałego w procesie spalania osadu, stanowi zaledwie 10% masy odwodnionego osadu. Zatem na przykładzie Oczyszczalni ścieków „Łyna” możemy wnioskować, że jest możliwe w pełni utylizowanie osadów na terenie oczyszczalni.

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Jolanta Fieducik, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych, 10-900 Olsztyn ul. Oczapowskiego 11, telefon 89 523 3621, jolanta.fieduci@uwm.edu.pl

<sup>2</sup> Adam Gawroński, Zespół Szkół Elektronicznych i Telekomunikacyjnych w Olsztynie, Olsztyn ul. Bałtycka 37a, adamgaw@wp.pl

<sup>3</sup> Ryszard Matuszczak, Przedsiębiorstwo Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. w Olsztynie, 10-218 Olsztyn ul. Oficerska 16a

**Słowa kluczowe:** utylizacja osadów ściekowych, wytwarzanie biogazu, przetwarzanie termiczne osadów

## 1. Wstęp

Wody pochodzące z wodociągów lub opadów, zanieczyszczone substancjami stałymi, płynnymi lub gazami oraz drobnoustrojami, na skutek działalności człowieka, nazywają się ściekami. Ścieki to także wody chłodnicze i słone wody kopalniane wprowadzane do wód powierzchniowych. Ze względu na źródło pochodzenia, ścieki dzielimy na [1]:

- ścieki bytowo-gospodarcze,
- ścieki przemysłowe,
- ścieki opadowe.

Niejednokrotnie, ze względu na ograniczoną infrastrukturę kanalizacyjną, w tym także istnienie tylko jednej oczyszczalni ścieków na danym terenie, ścieki wszystkich rodzajów są odprowadzane do wspólnego systemu kanalizacyjnego. W takiej sytuacji, mieszanina ścieków nosi nazwę ścieków komunalnych.

Według obecnych przepisów i trendów ochrony środowiska, ścieki należy bezwzględnie oczyszczać. Nowoczesne oczyszczalnie ścieków mają zdolności ich oczyszczania ze skutecznością przekraczającą 90%, a produkt finalny - oczyszczoną wodę, można wprowadzać bezpośrednio do wód powierzchniowych.

Procesowi oczyszczania ścieków zawsze towarzyszy powstawanie osadów ściekowych, stanowiących zagrożenie dla środowiska naturalnego, a także pod względem epidemiologicznym dla mieszkańców.

Zgodnie z definicją zaproponowaną przez Europejski Komitet Normalizacyjny – CEN, osadem ściekowym nazywa się mieszaninę wody i ciał stałych oddzielonych z różnych typów wody w rezultacie procesów naturalnych lub sztucznych [4].

Osady powstające w procesie oczyszczania ścieków ze względu na pochodzenie podzielono na:

- osad wstępny, powstający podczas mechanicznego oczyszczania ścieków we wstępnych komorach osadowych,
- osad wtórny, powstający w osadnikach wtórnych w procesie biologicznego oczyszczania ścieków,
- osad mieszany, czyli mieszanina osadu wstępnego i wtórnego [2].

Przetwarzanie osadów ściekowych w sposób ograniczający ich negatywny wpływ na środowisko jest dzisiaj koniecznością. Ustawa o Odpadach z dnia 14 grudnia 2012 określa dopuszczalne metody utylizacji i zagospodarowania osadów ściekowych. W niedalekiej przyszłości, przewiduje się jednak zmianę regulacji prawnych, które całkowicie zakażą zagospodarowania osadów ściekowych, a dopuszczą jedynie całkowite unieszkodliwianie osadów ściekowych. Zatem problem utylizacji osadów jest obecnie bardzo ważny i aktualny.

## 2. Charakterystyka Oczyszczalni ścieków „Łyna” w Olsztynie

Mechaniczno-biologiczna oczyszczalnia ścieków Łyna w Olsztynie, oddana do użytku w 1983 roku, zmodernizowana w latach 2002 – 2004, należy do grupy nowoczesnych oczyszczalni miejskich. Do oczyszczania ścieków wykorzystuje się w niej metodę osadu czynnego, ze wspomaganie chemicznym PIX. Obiekt zlokalizowany jest w pobliżu granic administracyjnych miasta w odległości około 4 kilometrów od centrum. Zakład zajmuje 22 ha powierzchni. Oprócz urządzeń służących do oczyszczania ścieków, na terenie oczyszczalni znajdują się obiekty związane z unieszkodliwianiem i utylizacją osadów ściekowych oraz kotłownia.

Odbiornikiem oczyszczonych ścieków jest rzeka Łyna, największy lewo-brzeżny dopływ Pregoty, rzeki uchodzącej do Zalewu Wiślanego [3].

Zgodnie z założeniami projektowymi, oczyszczalnia może przyjąć średnio 60000 m<sup>3</sup>, a maksymalnie 72000 m<sup>3</sup> ścieków na dobę. W pierwszym półroczu 2013r, średni dopływ ścieków do oczyszczalni „Łyna”, kształtował się na poziomie od 30000 m<sup>3</sup> do 36500 m<sup>3</sup> na dobę. Dla analizowanego okresu, osiągnięto średnią skuteczność usuwania zanieczyszczeń ze ścieków na poziomie 95,4%.

W roku 2013, we wstępnej fazie oczyszczania ścieków poprzez precedzanie ich na kratkach powstało 250 ton skratek. W tym samym roku, w piaskownikach wydzielono ze ścieków 500 ton piasku.

W procesie oczyszczania ścieków w okresie od lipca 2012r do czerwca 2013r wytworzono 200750 m<sup>3</sup> surowego osadu ściekowego, co daje średni dobowy odpływ surowego osadu na poziomie 550 m<sup>3</sup>/d. Średni dobowy odpływ osadu w miesiącach od stycznia do marca oraz od października do grudnia kształtuje się na poziomie 650 m<sup>3</sup>/d. W pozostałych miesiącach wynosi 450 m<sup>3</sup>/d.

## 3. Metody unieszkodliwiania osadów ściekowych, stosowane w Oczyszczalni ścieków „Łyna”

Ustawa o Odpadach z dnia 14 grudnia 2012r nakazuje w pierwszej kolejności przetworzyć odpady, w tym osady ściekowe, w miejscu ich powstania. Dopiero odpady, które nie mogą być przetworzone w miejscu ich powstania, przekazuje się do najbliższych położonych miejsc, w których mogą być przetworzone.

W celu sprostania wymaganiom stawianym przez ustawę o odpadach, na terenie Oczyszczalni Ścieków „Łyna” w Olsztynie, prowadzi się pięciostopniowe unieszkodliwianie osadów ściekowych.





Rys.1. Zamknięte komory fermentacyjne (ZKF)

Fig.1. Closed digesters (ZKF)

W pierwszej kolejności osad kierowany jest do zamkniętych komór fermentacyjnych (ZKF), w których zachodzi fermentacja w obecności bakterii metanowych i saprofitycznych. Procesowi temu towarzyszy wydzielanie się biogazu, który jest zagospodarowywany na cele energetyczne. Po zakończeniu fermentacji metanowej, osad kierowany jest do otwartych basenów fermentacyjnych (OBF), gdzie w warunkach tlenowych zachodzi dalsza fermentacja. Podczas dwóch pierwszych etapów, osad ulega ustabilizowaniu, a jego objętość i masa zostają zredukowane [5].

Kolejnym etapem unieszkodliwiania osadu, jest jego mechaniczne odwodnienie do zawartości suchej masy na poziomie około 20%. Następnie osad kierowany jest do instalacji termicznego przekształcania osadów (ITPO), składającej się z suszarni i spalarni osadów. Osad poddawany jest tu suszeniu i spalaniu. Masa popiołu powstałego w procesie spalania osadu, stanowi zaledwie 10,6% masy odwodnionego osadu. Popiół może być zagospodarowany na cele budowlane, np. w drogownictwie.

### 3.1 Fermentacja w zamkniętych komorach fermentacyjnych

Zagęszczony osad powstały w procesie oczyszczania ścieków wraz z osadem wstępnym pompowany jest wspólnym rurociągiem do dwóch równolegle pracujących zamkniętych komór fermentacyjnych, w których osad jest przerabiany na drodze fermentacji. Fermentacja polega na beztlenowym rozkładzie substancji organicznych, jest to upłynnienie i hydroliza związków nierozpuszczalnych oraz zgazowanie powstałych produktów pośrednich. Fermentacja prowadzona jest przez populacje bakterii saprofitycznych i metanowych przy zachowanych stabilnych, optymalnych warunków w komorach, na które składają się: temperatura w granicach 33-35 °C, odczyn pH w granicach 6,8-7,5, obciążenia substancjami organicznymi 10-25 dni, uwodnienie i intensywne mieszanie osadu [3,5].

Przejsiecie w stan ciekły i hydroliza zachodzą pod wpływem działalności bakterii saprofitycznych. Produktami rozkładu są organiczne kwasy tłuszczowe, głównie octowy, masłowy i propionowy. W wyniku pierwszej fazy rozkładu nie zachodzi prawie żadna zmiana ilości substancji organicznych.

Najważniejszym czynnikiem w procesie fermentacji jest aktywność bakterii metanowych. Przy ich prawidłowej pracy obserwuje się ubytek substancji organicznych oraz wytwarzanie gazu fermentacyjnego. Redukcję substancji lotnych na poziomie 50% uważa się za zadowalającą. Wytwarzany w zamkniętych komorach fermentacyjnych ZKF biogaz jest ujmowany w kopule komory i odprowadzany do zbiornika gazu.

ZKF zbudowany jest w kształcie walca, który od dołu i od góry zakończony jest stożkiem. Wewnątrz zamkniętej komory fermentacyjnej osad jest mieszany za pomocą mieszadła recyrkulacyjnego o pionowej osi obrotu, oraz pomp recyrkulacyjnych pozwalających na pięciokrotną wymianę osadu w ciągu doby. Osad do recyrkulacji pobierany jest z dolnej części cylindra i jest natryskiwany z kopuły stropu, z wysokości około 4 m, co ma zapewnić natryskowe rozbijanie kożucha. Podgrzewanie osadu realizowane jest poprzez wymienniki ciepła typu rura w rurze, zainstalowanych w obiegach recyrkulacyjnych. Osad po fermentacji samoczynnie odpływa pod naporem nowo wprowadzanego do komory osadu surowego. Odpływ następuje przez przelew do zbiornika na kopule komory i dalej do pompowni osadu fermentującego. Osad surowy jest pompowany do zamkniętej komory fermentacyjnej w sposób ciągły lub cyklicznie trzy razy na dobę. Rurociąg tłoczny osadu przebiega przez halę pomp recyrkulujących, znajdującą się w podziemiu budynku.

### 3.2 Fermentacja w otwartych basenach fermentacyjnych OBF

Do zadań OBF-ów należą:

- prowadzenie procesów fermentacji tak zwanego drugiego stopnia,
- zagęszczenie przefermentowanego osadu i oddzielenie wód nadosadowych,

- magazynowanie osadu przefermentowanego w okresie awarii stacji mechanicznego odwadniania.

Po zakończeniu procesu fermentacji w ZKF, osad przepompowywany jest za pośrednictwem pompowni osadu fermentującego do OBF, w których panują warunki odmienne niż w ZKF pod względem:

- temperatury, która jest zależna od warunków pogodowych,
- mniejszej intensywności cyrkulacji, spowodowanej brakiem mieszania,
- zmniejszonego uwodnienia osadu, w wyniku oddawania wód nadosadowych.

W OBF proces fermentacji prowadzony jest przez inne kultury bakterii niż w ZKF, dlatego ważne jest, aby „nowo dostarczany” osad miał bezpośredni kontakt z osadem już fermentującym. Ma to na celu przyspieszenie procesu fermentacji. Na terenie oczyszczalni znajdują się trzy otwarte baseny fermentacyjne, o łącznej objętości 42000 m<sup>3</sup>, co przy średnim poziomie wytwarzania osadu 550 m<sup>3</sup>/d pozwala zmagazynować osad wytworzony w okresie dwóch miesięcy [5].

### 3.3 Stacja mechanicznego odwadniania osadów

Zmineralizowany w procesie dwustopniowej fermentacji osad kierowany jest do stacji mechanicznego odwadniania osadów, zlokalizowanej poniżej OBF, za pośrednictwem zbiornika osadu przefermentowanego. Stacja składa się z dwóch pras taśmowych i urządzeń im towarzyszących, stacji przygotowania polielektrolitu, przenośników ślimakowych i dwóch mieszarek osadu z wapnem. Silosy z wapnem zlokalizowano poza budynkiem stacji mechanicznego odwadniania osadów. Ze zbiornika osadu przefermentowanego osad jest podawany pompami śrubowymi na prasy taśmowe. Po mechanicznym odwodnieniu osad jest mieszany z wapnem. Z mieszarek osad podawany jest przenośnikami ślimakowymi do znajdującego się na zewnątrz silosu, stanowiącego część składową suszarni.

### 3.4. Suszarnia osadu ściekowego

Głównym elementem suszarni osadu jest turbosuszarka, zbudowana w formie nieruchomej cylindrycznej komory, pokrytej z zewnątrz płaszczem grzejnym, wewnątrz którego przepływa czynnik grzewczy – olej termiczny. Zgodnie z projektem temperatura oleju wynosi 210 °C. Wewnątrz cylindra znajduje się turbina składająca się z wału i zamontowanych na nim ostrzy, będących jedynym elementem bezpośrednio stykającym się z osadem w procesie suszenia. Wał napędzany jest silnikiem elektrycznym o mocy 110 kW.

Praca turbiny zapewnia transport osadu w postaci cienkiej warstwy wzdłuż gorących ścian cylindra. Przepływ ten jest wysoko turbulentny. Osad jest ogrzewany i suszony poprzez kontakt z gorącymi ścianami suszarki oraz gorącym gazem procesowym, będący mieszaniną odparowanej wody oraz powietrza. Gaz przemieszcza się wewnątrz cylindra w przeciwnym kierunku do

kierunku przemieszczania osadu. Powietrze ogrzewane jest w wymienniku, z którego za pomocą wentylatora podawane jest do układu suszenia. W cylindrze turbosuszarki wykonane są dwa otwory zaopatrzone w kołnierze, z których pierwszy służy do wprowadzenia podgrzanego gazu procesowego oraz suszonego materiału, a drugi to wyjście gazu procesowego, oparów oraz wysuszonego osadu.

Gaz procesowy przemieszcza się w układzie zamkniętym z kondensacją odcieków, dzięki czemu nie powoduje emisji odorów do atmosfery, co jest zgodne z obowiązującymi przepisami ochrony środowiska.

W ciągu jednego cyklu suszenia wewnątrz cylindra znajduje się 120 kg produktu z czego 24 kg to sucha masa, a 96 kg woda zawarta w osadzie. Zatrzymanie osadu w suszarni kształtuje się na poziomie 6% godzinowej wydajności. Cykl suszenia trwa od 2 do 3 minut.

Każda porcja osadu wewnątrz suszarni jest poddawana obróbce termicznej jako osobna partia. Ma to na celu uniknięcie styku ze sobą osadu wysuszonego z mokrym, co mogłoby skutkować przegrzaniem suchego osadu, a w konsekwencji jego samozapłonem lub nawet eksplozją. W czasie suszenia osad nie jest narażony na długotrwałe przebywanie w podwyższonej temperaturze, która w procesie nigdy nie przekracza 75-90 °C.

Do podgrzewania oleju termicznego krążącego w układzie suszarni służy kocioł gazowy o mocy 930 kW. W przypadku równoczesnej pracy linii suszenia i spalania osadu, energia cieplna wytwarzana jest w procesie spalania osadu, i pobierana jest z sekcji odzysku ciepła, zaś kocioł gazowy pełni funkcję dodatkowego źródła energii.

### **3.5. Spalarnia osadu ściekowego**

Spalarnia zaprojektowana została w celu całkowitego spalania wysuszonego osadu ściekowego o niskiej zawartości wilgoci do 20% objętości osadu. Linia spalania składa się z trzech sekcji:

- - sekcja spalania,
- - sekcja oczyszczania gazów odlotowych,
- - sekcja odzysku ciepła.

Sekcja spalania, a w niej jednostka spalania składa się z dwóch, podstawowej i drugorzędnej komory spalania. Ściany pierwszej, adiabatycznej komory spalania wyłożone są cegłami ogniotrwałymi o dużej zawartości tlenku glinu na poziomie 60%, podwójną warstwą cegieł izolacyjnych oraz powłoką ceramiczną. Górne sklepienie komory spalania jest wykonane z cegieł ogniotrwałych. Taka budowa zapewnia najlepsze odbicie promieniowania ciepłego. Pojemność komory spalania została tak dobrana, aby zapewnić dwu sekundowe przetrzymywanie gazów odlotowych w temperaturze 850 – 950 °C. W procesie spalania zawartość węgla organicznego zredukowana jest do poziomu poniżej 3%.

Przemieszczanie się wysuszonego osadu wewnątrz komory spalania realizowane jest poprzez niklowo-chromową ruchomą kratę z prętami trzonowymi. Trzon ma budowę odwracalną z ruchomymi naprzemianległymi rzędami. Trzon spalania podzielony został na kilka sekcji, z których każda ma swój własny mechanizm napędowy oraz system kontroli powietrza.

Kąt nachylenia trzonu spalania wynosi ok.  $10^\circ$ , co zapewnia odpowiedni czas wygrzania osadu w komorze spalania, zabezpieczenie przed dostaniem się niepożądanych materiałów do paleniska oraz eliminuje konieczność okresowego zatrzymywania spalarni w celu przeprowadzenia prac serwisowych.

Od dołu paleniska wdmuchiwane jest powietrze ogrzane w wymienniku ciepła, znajdującym się w sekcji odzysku ciepła gazów odlotowych.

W komorze spalania zastosowano przeciwprądowy przepływ powietrza względem osadu, co zapewnia całkowite spalanie osadu. Spalanie w tym układzie gwarantuje dłuższy kontakt powietrza ze spalonym osadem, co skutkuje utlenieniem węgla organicznego.

Zgarnianie i usuwanie popiołu z paleniska realizowane jest poprzez olejowo dynamiczną jednostkę wrzuszania paleniska i usuwania popiołów. Składa się ona ze schładzanego przenośnika taśmowego transportującego popiół do urządzenia workującego lub zewnętrznego układu odzysku popiołów oraz systemu zgarniania popiołu i transportu do przenośnika śrubowego. Popiół usuwany jest na bieżąco.

Drugorzędna komora spalania służy do niekatalitycznej redukcji zawartych w gazach odlotowych związków  $\text{NO}_x$ . Gazy odlotowe z komory spalania poddawane są dopalaniu w temperaturze od 850 do 1050 °C przy jednoczesnym dozowaniu roztworu mocznika bezpośrednio do komory spalania. W obydwu komorach urządzenia spalającego zainstalowane są palniki gazowe. Modulacja odbywa się poprzez sterowanie zaworem ograniczającym dopływ powietrza lub gazu, napędzanych jednym napędem. Każdy z palników zbudowany jest z kołnierza sprzęgającego, rury ochronnej, regulatora płomienia i systemu detekcji, świecy zapłonowej oraz służącego do rozruch palnika oszczędnościowego.

Każdy palnik wyposażony jest w:

- ręcznie sterowany zawór gazowy,
- filtr gazu.
- złączkę zapobiegającą drganiom,
- stabilizator ciśnienia,
- elektrozawór gazowy,
- elektrozawór bezpieczeństwa,
- elektrozawór palnika oszczędnościowego,
- manometr,
- urządzenie kontrolujące maksymalne ciśnienie gazu,
- urządzenie kontrolujące minimalne ciśnienie gazu.

Regulacja współczynnika nadmiaru powietrza realizowana jest poprzez:

- automatyczne zawory do regulacji ilości gazu,

- ręcznie sterowane zawory do regulacji ilości spalanego powietrza,
- przełączniki kontroli ciśnienia atmosferycznego z trójdrogowymi elektrozaworami.

Tabela 1. Dane techniczne palników

Tabela 1. Burners technical specification

Palniki	ilość	3
	moc minimalna	22 kW
	moc maksymalna	220 kW
	rodzaj	modulacyjny
	oznaczenie kołnierza PN	DN 50
	poziom hałasu	< 75 dba
	rodzaj	gaz ziemny
	wartość opałowa	34,44 MJ/m <sup>3</sup>
	ciężar właściwy	0,72 kg/ Nm <sup>3</sup>
	dostępne ciśnienie	300 mbar
Zasilanie	napięcie międzyfazowe	400 V
	częstotliwość	50 Hz

Ponadto z palnikami współpracują transformatory rozruchowe wraz z urządzeniami pomocniczymi oraz urządzenia do kontroli płomienia, zamontowane w szafie sterowniczej Gazy odlotowe powstałe w piecu są przesyłane do wymiennika wchodzącego w skład sekcji odzysku ciepła.

#### 4. Energetyczne zagospodarowanie biogazu

W biogazowni wchodzącej w skład kompleksu Oczyszczalni ścieków „Łyna” wytwarza się 6100 m<sup>3</sup> biogazu na dobę, przy średnim przepływie 255 m<sup>3</sup>/h i maksymalnym przepływie 300 m<sup>3</sup>/h. Ciepło spalania biogazu wynosi 24,7 MJ/m<sup>3</sup>. Surowy gaz fermentacyjny wytworzony w ZKF zostaje poddany odsiarczeniu w odsiarczalni wyposażonej w trzy odsiarczalniki, wykorzystujące metodę suchą na złożu rudy darniowej. Proces ten obniża zawartość siarkowodoru do ilości przewidywanej normą, tj. 0,013% objętości. Inne własności gazu pozostają bez zmian. Oczyszczony gaz gromadzony jest w powłokowym zbiorniku gazu o objętości  $V = 1350 \text{ m}^3$ , skąd za pomocą dmuchaw przetłaczany jest pod ciśnieniem  $p = 25 \text{ kPa}$  do zakładowej sieci gazowej. Dmuchawy umożliwiają przetłoczenie 350 Nm<sup>3</sup>/h gazu.

Z funkcjonowaniem oczyszczalni związane są pośrednio kotłownia biogazowa o mocy  $P = 2,16 \text{ MW}$  oraz zasilana biogazem siłownia elektryczna o mocy zainstalowanej generatorów  $P = 700 \text{ kW}$ . Wytworzony w ZKF biogaz jest zużywany do zasilania wyżej wymienionych obiektów, zaś ewentualny jego nadmiar jest spalany w pochodni gazowej, zlokalizowanej w pobliżu kotłowni. Wyposażona w trzy kotły gazowe o mocy 720 kW każdy, kotłownia służy do wytworzenia ciepłej wody procesowej wykorzystywanej między innymi do

podgrzewania osadu w ZKF-ach, ciepłej wody użytkowej oraz do zasilania instalacji centralnego ogrzewania w budynkach oczyszczalni. Kotłownia zużywa 303,5 m<sup>3</sup>/h gazu przy zapotrzebowaniu na moc do celów grzewczych  $P_{co}=664,4\text{kW}$  i technologicznych  $P_T = 1000,6\text{ kW}$  oraz stratach na sieci sięgających 15%.

Funkcję siłowni elektrycznej, pełnią trzy pracujące równolegle kogeneracyjne agregaty prądotwórcze, w tym 2 o mocy elektrycznej  $P = 225\text{ kW}$  oraz jeden o mocy elektrycznej  $P = 252\text{ kW}$ . Przy równoczesnej pracy wszystkich trzech agregatów z mocą znamionową, siłownia zużywa około 300 m<sup>3</sup>/h gazu. Przy osiągnięciu pełnej mocy elektrycznej, agregaty zapewniają około 1000 kW mocy cieplnej, która może zostać przekazana do zakładowej sieci ciepłowniczej i tym samym odciążać pracę kotłowni lub w przypadku braku zapotrzebowania na ciepło, zostać oddana do otoczenia, poprzez system chłodziń zlokalizowanych w pobliżu agregatów. Równoczesny odbiór energii cieplnej i elektrycznej zwiększa sprawność agregatów kogeneracyjnych, co obniża koszty eksploatacyjne oraz ma korzystny wpływ na środowisko naturalne.

Stężenie substancji szkodliwych w spalinach przy 5% zawartości tlenu wynosi poniżej 500 mg/Nm<sup>3</sup> NO<sub>x</sub> oraz CO poniżej 300 mg/Nm<sup>3</sup> [6].

## 5. Podsumowanie

Utylizacja osadów ściekowych na drodze pięciostopniowego przekształcania jest zgodna z najnowszymi trendami ekologicznymi oraz Dyrektywą unijną. Cały proces utylizacji osadu przeprowadzany jest w stosunkowo krótkim czasie, na terenie oczyszczalni, czyli tam gdzie odpad został wytworzony. Jest to zgodne z wymaganiami ustawy o odpadach z dnia 14 grudnia 2012r.

Zastosowana metoda pozwala na znaczne ograniczenie szkodliwego wpływu procesu oczyszczania ścieków na środowisko naturalne, ponieważ spełnia normy emisji zanieczyszczeń do atmosfery.

Oczyszczalnia jest niezależna logistycznie od zewnętrznych firm zajmujących się utylizacją odpadów.

Eksploatacja pięciostopniowej instalacji do utylizacji osadów wyeliminowała odory powstające podczas suszenia osadu na poletkach i w legunach. Poprawiło to w znaczącym stopniu komfort życia mieszkańców znajdującego się nieopodal osiedla mieszkalnego Redykajny. Wpłynęło też pozytywnie na walory rekreacyjne Lasu Miejskiego w Olsztynie, na którego terenie częściowo zlokalizowana jest oczyszczalnia.

W procesie utylizacji osadu wytwarzany jest biogaz, który w całości przeznaczony jest na cele energetyczne. Zasila on kogeneratory elektryczne oraz kotłownię. Wytwarzanie biogazu daje podwójne korzyści, redukuje masę osadu i prowadzi do jego sanityzacji oraz umożliwia pozyskanie darmowej energii pochodzącej ze źródła odnawialnego. Wytworzona z biogazu energia cieplna jest w całości wykorzystywana na terenie oczyszczalni, zaś energia elektryczna

może być sprzedawana do systemu elektroenergetycznego lub zużywana na potrzeby zasilania urządzeń oczyszczalni ścieków.

### Literatura

- [1] Anielak A. M., Chemiczne i fizykochemiczne oczyszczanie ścieków, Wydawnictwo PWN, Warszawa 2000 r.
- [2] Wierzbicki K., Możliwości stosowania nowoczesnych systemów kanalizacyjnych na terenach wiejskich, Wydawnictwo IBMER, Warszawa 1997
- [3] Gawroński A., Suszenie i spalanie osadów ściekowych jako metoda ich utylizacji, na przykładzie olsztyńskiej Oczyszczalni Ścieków „Łyna”, UWM 2009
- [4] <http://www publikacje.hdwo.pl>
- [5] Dokumentacja techniczna Oczyszczalni Ścieków „Łyna” w Olsztynie, 2012
- [6] Instrukcja obsługi zespołu ko generacyjnego - Horus Energia, 2011

## SEWAGE SLUDGE AND ITS UTILIZATION IN WATER AND WASTE WATER IN OLSZTYN

### Summary

The article presents a solution of the current problem of sludge disposal in wastewater based on the example of Łyna treatment plant in Olsztyn, Poland. It describes the construction and operation of the sewage treatment plant. Wastewater treatment process has been presented since the adoption of the waste water in the grid building until the purified water is thrown into the river Łyna. In accordance with the Law on waste, which imposes sewage sludge processing, in the place of their creation, it was decided to apply 5-step sewage sludge disposal in the treatment plant. At first sediment is led to the closed septic tanks where fermentation takes place with the presence of saprophytic and methyl bacteria. This process is accompanied by the biogas emission, which is utilized for energetic purposes. Then, further fermentation in oxygen conditions and stabilisation process influencing deposits volume reduction. The next step is mechanical sludge dehydration to the dry weight content of around 20%. Sewage treatment plant Łyna in Olsztyn, following new ecological trends and implementing in advance future legislation requirements decided to build a modern thermal processing installation. Thus dehydrated sludge is directed to the installation of the thermal sediments transformation consisting of drying and incineration of sludge.

At the very beginning of this technological process sludge is subjected to thermal drying, after obtaining the relevant parameters it is palletised. The next stage of sludge disposal is its incineration. Energy analysis of the thermal sludge treatment was presented. The weight of the ash arising during the process of sludge incineration represents only 10% of the weight of the dehydrated sludge. Then, based on the example of the wastewater treatment plant Łyna we can conclude that full disposal of sludge in the sewage treatment plant is possible.

**Keywords:** disposal of sewage sludge, biogas, thermal processing of sludge

DOI:10.7862/rb.2014.80

*Przesłano do redakcji: 26.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*





Jolanta FIEDUCIK<sup>1</sup>  
Jan GODLEWSKI<sup>2</sup>

## ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA SŁONECZNYCH KOLEKTORÓW POWIETRZNYCH DO OGRZEWANIA DOMÓW JEDNORODZINNYCH ORAZ PODGRZEWANIA WODY

W artykule przedstawiono analizę możliwości wykorzystania słonecznych kolektorów powietrznych do uzyskania energii cieplnej dla energooszczędnego domu jednorodzinnego w celach grzewczych oraz ciepłej wody użytkowej dla mieszkańców. Przedstawiono rodzaje, budowę i zasadę działania kolektorów powietrznych oraz sprawność. Rozpatrzono ich zalety i wady. Kolektory powietrzne dodatkowo oprócz ogrzewania budynku mogą zapewniać jego całoroczną wentylację. Zaprezentowano parametry domu energooszczędnego i normy zużycia ciepłej wody użytkowej na mieszkańca. Analizę zapotrzebowania ciepła na ogrzewanie budynku energooszczędnego przez kolektory powietrzne przeprowadzono przy pomocy programu GetSolar. Program GetSolar Profesjonal służy do symulacji instalacji kolektorów słonecznych w różnych warunkach klimatycznych. Rozważania przeprowadzono dla warunków klimatycznych miasta Olsztyna, uwzględniając napromieniowanie w warunkach północnej Polski. Określono usytuowanie budynku względem stron świata, wyznaczono powierzchnię i lokalizację kolektorów słonecznych na dachu, oraz uwzględniono ich optymalne pochylenie względem padających promieni słonecznych. Przedstawiono bilans energii uwzględniając wartość energii napromieniowania słonecznego dla kolejnych miesięcy w roku oraz energii potrzebnej na ogrzanie energooszczędnego domu jednorodzinnego i ciepłej wody użytkowej. 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 możliwość ogrzania budynku i zaspokojenia potrzeb ciepłej wody dla mieszkańców poza dwoma miesiącami zimowymi. Wtedy należy zastosować alternatywne źródła ogrzewania.

**Słowa kluczowe:** napromieniowanie słoneczne, słoneczne kolektory powietrzne, system grzania w budynku, dom energooszczędny, program GetSolar.

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Jolanta Fieducik, Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie, Wydział Nauk Technicznych, 10-900 Olsztyn ul. Oczapowskiego 11, telefon 89 523 3621, jolanta.fieducik@uwm.edu.pl.

<sup>2</sup> Jan Godlewski, Politechnika Gdańska, Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, 80-233 Gdańsk, ul. Gabriela Narutowicza 11/12, telefon 58 347 16 87, photooptics@pg.gda.pl.

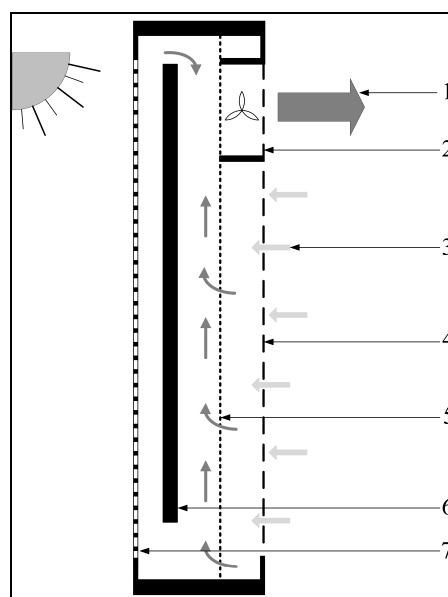
## 1. Wstęp

Wykorzystanie energii słonecznej w celach grzewczych budynków i zapewnienia ciepłej wody jest wciąż aktualną kwestią, ponieważ zasoby paliw konwencjonalnych wraz z czasem wyczerpują się [1, 2]. Zagadnienie to jest szczególnie aktualne i ważne dla niewielkich obiektów budowlanych. Przedmiotem rozważań są takie obiekty w których padająca energia słoneczna całkowicie zapewnia potrzeby energetyczne. Obiektami urzeczywistniającymi te wymagania są domy jednorodzinne. Powyższe zadanie zapewnienia energii cieplnej dla domów jednorodzinnych może być realizowane na różne sposoby [1, 2, 3, 4]. Celem tego artykułu jest analiza dotycząca możliwości wykorzystania kolektorów powietrznych dla uzyskania energii cieplnej w energooszczędnym domu jednorodzinnym w celach grzewczych oraz zapewnienia ciepłej wody użytkowej. Dodatkowo, przeprowadzona będzie analiza dotycząca jednoczesnego wykorzystania kolektorów dla celów chłodzenia obiektu. Analiza powyższa będzie dokonana na przykładzie warunków klimatycznych miasta Olsztyna, przy zastosowaniu komercyjnych kolektorów powietrznych. W ramach analizy zostanie dokonana ocena bilansu energetycznego obiektu. Niektóre warunki techniczne, jakim powinny odpowiadać budynki oraz ich usytuowanie, dotyczące efektywności energetycznej wynikają z unijnej Dyrektywy 2010/3/UE, która nakłada na państwa członkowskie obowiązek obniżania zużycia energii, aż do poziomu bliskiego zero z początkiem 2021 roku. Polski ustawodawca rozłożył te wymogi na trzy etapy, pierwszy zaczął obowiązywać już od 1 stycznia 2014 roku i zmienił dotychczasowe wskaźniki przenikania ciepła  $U$  dla różnych przegród budynku oraz wartości parametru  $Ep$ , mierzącego poziom zapotrzebowania na nieodnawialną energię pierwotną. Ważną rangę ze względu na nowe przepisy zyskuje parametr mówiący o zapotrzebowaniu budynku na nieodnawialną energię pierwotną, który ocenia go pod względem zużycia energii oraz wpływu na środowisko naturalne. O jego wartości decydują m.in. materiały izolacyjne, stosowane do ocieplenia przegród oraz sposób ogrzewania (ważne są zarówno urządzenia, jak i rodzaj paliwa). Maksymalna wartość wskaźnika  $Ep$  ujęta w nowym rozporządzeniu określa zapotrzebowanie na energię do ogrzewania, wentylację i przygotowanie ciepłej wody użytkowej ( $Ep_{h+w}$ ). W kolejnych latach będzie obowiązywać następujący standard dla wskaźnika  $Ep$  w budownictwie jednorodzinnym – nie więcej niż 120 kWh/m<sup>2</sup> od 2014, 95 kWh/m<sup>2</sup> od 2017 i 70 kWh/m<sup>2</sup> od 2021 roku.

## 2. Budowa i parametry kolektorów powietrznych

Słoneczne kolektory powietrzne mogą być zbudowane z obudowy i absorbera, występują jako odkryte w których promieniowanie słoneczne pada bezpośrednio na absorber lub zakryte w których absorber znajduje się pod przezroczystą osłoną. W kolektorach powietrznych energia promieniowania słoneczne-

go przekazywana jest do absorbera od którego ogrzewa się przepływające w kolektorze powietrze. Strumień powietrza w zależności od budowy kolektora może przepływać nad absorberem lub pod absorberem, a w kolektorach bardziej rozbudowanych nad i pod absorberem lub przez absorber. W kolektorze strumień powietrza przepływa przez specjalnie wyprofilowane kanały. Wyróżniamy kanały o przekroju prostokątnym, trójkątnym, owalnym. Absorber może być płaski, chropowaty lub porowaty przez co znacznie wzrasta powierzchnia a to wpływa na sprawność wymiany ciepła między absorberem a przepływającym powietrzem. Poniżej na rysunku 1 przedstawiono schemat budowy i działania kolektora powietrznego.



Rys. 1. Schemat budowy oraz zasada działania słonecznego kolektora powietrznego[6]. 1. Świeże ogrzane powietrze tłoczone przez wentylator; 2. Wentylator; 3. Powietrze zasysane przez perforowaną pokrywę płytę; 4. Perforowana pokrywa aluminiowa; 5. Mata z czarnego filcu; 6. Absorber; 7. Ogniwo fotowoltaiczne

Fig.1. A diagram and the working principles of an air collector [6]

Kolektory powietrzne charakteryzują się dużą sprawnością przetwarzania energii słonecznej na energię cieplną [1- 4] oraz tym, że czynnikiem roboczym jest powietrze. W temperaturach typowych dla klimatu na Ziemi, powietrze jest niepodatne na zmiany fazowe czynnika roboczego. Jednocześnie, powietrze ogrzane w kolektorze może być bezpośrednio używane do ogrzania obiektu, bez czynników pośrednich. Wykorzystanie przepływu ciepłego powietrza z kolektora może także zapewnić bardzo dobrą wentylację i osuszanie odpowiednich

pomieszczeń. Niewątpliwą zaletą kolektorów powietrznych jest łatwość sterowania strumieniem powietrza, szybkiej zmiany temperatury oraz monitorowania stanu termodynamicznego pomieszczeń. Poniżej przedstawiono na rysunku 2 schemat działania kolektora powietrznego podczas ogrzewania.



Rys. 2. Schemat działania kolektora powietrznego SolarVenti w cyklu ogrzewania [7]

Fig. 2. A working diagram of a SolarVenti air collector during a heating cycle [7].

Pewną wadą kolektorów powietrznych jest to, że przy zmianie czynnika roboczego, z powietrza na dowolną ciecz, w celu ogrzewania domu lub innego obiektu muszą być bardziej rozbudowane wymienniki ciepła niż ma to miejsce w przypadku wymienników typu ciecz-ciecz [4].

Istnieje szereg producentów kolektorów powietrznych różnego typu i przeznaczenia. Poniżej przedstawiono parametry techniczne typowego kolektora słonecznego w wersji do ogrzewania budynku i w wersji hybrydowej z możliwością podłączenia do układu zbiornika w celu ogrzewania wody.

Tabela 1. Wybrane parametry kolektora powietrznego SolarVenti SV30X i SV30 Hybrid [6]

Table 1. Chosen parameters of the air collector SolarVenti SV30X and SV30 Hybrid [6]

Typ kolektora powietrznego	SolarVenti SV30X	SolarVenti SV30 Hybrid
Powierzchnia kolektora powietrznego	3 m <sup>2</sup>	3 m <sup>2</sup>
Przepływ powietrza	200 m <sup>3</sup> /h	100-150 m <sup>3</sup> /h
Czas całkowitej wymiany powietrza w pomieszczeniu	2 godziny	3 godziny
Sprawność przetwarzania energii słonecznej	70%	70%
Średnia produkcja energii	2100 kWh/rok	2100 kWh/rok
Wzrost temperatury w kolektorze w stosunku do temperatury zewnętrznej	ok. 40°C (np. 10°C do 50°C)	ok. 30-40°C
Wymiary kolektora w mm: dł. x szer. x grubość.	3000 x 1020 x 75 mm	3000 x 1020 x 105 mm
Dodatkowe wyposażenie		
Ogniwo słoneczne PV – moc	38 W	24 W
Moc wentylatora	5,1 W	6,2 W
Waga (panel)	22,5 kg	31,3 kg
Bezobsługowe (liczba lat)	do 15 lat	do 15 lat
Gwarancja na produkt	5 lat	5 lat
Obudowa kolektora	aluminium	aluminium
Pokrywa (przezroczysta)	poliwęglan	poliwęglan
Zestaw z możliwością do chłodzenia pomieszczeń	tak	tak
Zbiornik na wodę	nie	100-150 l

### 3. Warunki energetyczne

W rozdziale tym dokonano analizy warunków energetycznych związanych z zapotrzebowaniem na energię ciepłą dla celów grzewczych w energooszczędnym domu jednorodzinnym i zapotrzebowania na ciepłą wodę użytkową dla trzech mieszkańców. Założono, że powierzchnia użytkowa domu wynosi 150 m<sup>2</sup>, natomiast wymiary domu w podstawie wynoszą 10 x 10 metrów. Uwzględniono dom zbudowany w standardzie energooszczędnym, którego zapotrzebowanie na ciepło według norm kształtuje się na poziomie 40 kWh/m<sup>2</sup>/rok. Natomiast dla ogrzania ciepłej wody użytkowej założono 8,37 kWh przeliczając na dzień dla 3 osób zużycie 160 litrów wody nagrzewanej od 10°C do 55°C. Do analizy zapotrzebowania domu na energię i możliwości jej uzyskania przyjęto, że dach domu jest usytuowany pod kątem 45°, a jednostronna powierzchnia dachu od strony słonecznej ma powierzchnię 60 m<sup>2</sup> i jest cała pokryta powietrznymi kolektorami słonecznymi.

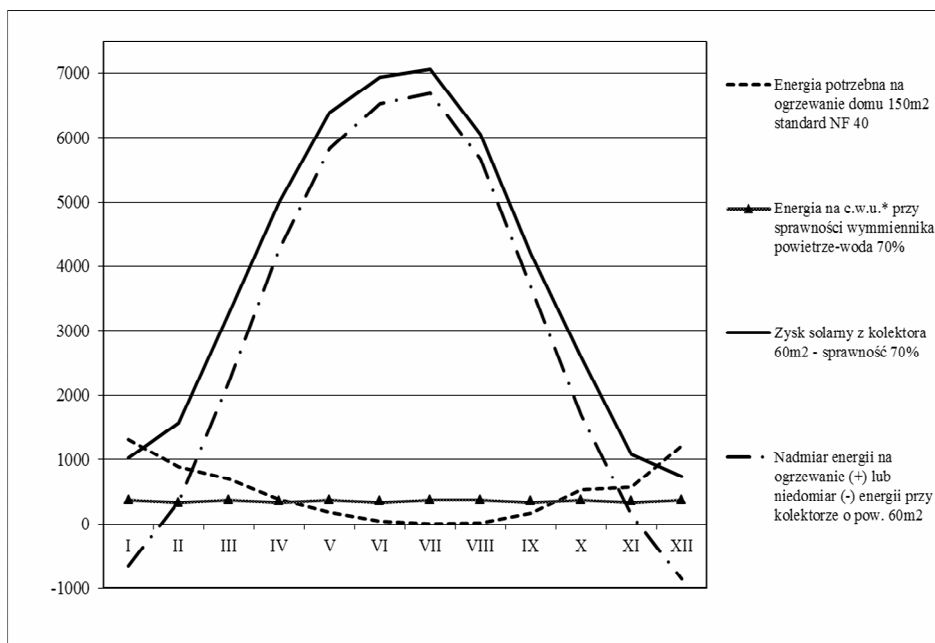
Na podstawie danych meteorologicznych dla miasta Olsztyna, z wykorzystaniem programu GetSolar Professional [5] w poszczególnych miesiącach otrzymujemy następującą wartość energii słonecznej padającej na 1 m<sup>2</sup> kolektora ( tzw. energia napromieniowania – kolumna 2 w tabeli 2). W tabeli 2 są także podane inne istotne wielkości dla zapewnienia ogrzewania domu i uzyskania ciepłej wody użytkowej.

Tabela 2. Bilans energetyczny dotyczący energii napromieniowania pochodzącej od Słońca oraz energii niezbędnej na cele grzewcze dla domu jednorodzinnego i c.w.u. w różnych miesiącach roku.

Table 2. The energy balance for solar energy obtained from the sun and energy necessary for heating purposes for a single family house and hot water in during the individual months of the year.

Mie- siąc	Napromieniowanie na 1m <sup>2</sup> kolektora	Energia potrzebna na ogrzewanie domu 150m <sup>2</sup> standard NF 40	Energia na c.w.u.* przy sprawności wymiennika powietrze-woda 70%	Napromieniowanie całkowite kolektora powietrznego o pow. 60m <sup>2</sup>	Zysk solar-ny z kolektora 60m <sup>2</sup> - sprawność 70%	Nadmiar energii na ogrzewanie (+) lub niedomiar (-) energii przy kolektorze o pow. 60m <sup>2</sup>
1	2	3	4	5	6	7
	[kWh/m2]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]	[kWh]
I	24,4	1310	370	1464	1025	-655
II	37,2	886	334	2232	1562	342
III	77,9	700	370	4674	3272	2202
IV	119	379	359	7140	4998	4260
V	152	184	370	9120	6384	5830
VI	165	45	359	9900	6930	6526
VII	168	0	370	10080	7056	6686
VIII	144	13	370	8640	6048	5665
IX	100	160	359	6000	4200	3681
X	61,6	532	370	3696	2587	1685
XI	25,6	575	359	1536	1075	142
XII	17,4	1217	370	1044	731	-856
Razem	1092	6000	4359	65520	45864	35505

Tabela została utworzona w oparciu o dane uzyskane z programu GetSolar dla lokalizacji Olsztyna o szer. geograficznej 53,5 i długości geograficznej 20,3. Wyniki z tabeli 2 przedstawiono w formie graficznej na wykresie 1.



Wykres 1. Bilans energii uzyskanej z kolektorów słonecznych i energii potrzebnej na ogrzewanie domu i c.w.u.

Graph 1: Energy balance obtained from collectors solar and the energy necessary to heat the house and hot water in

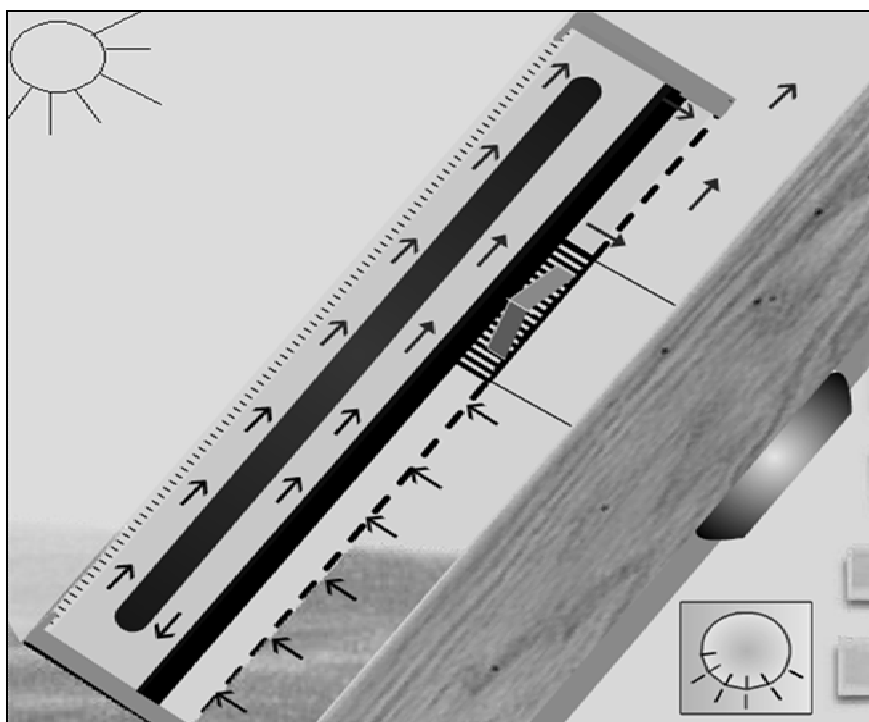
Jak już podkreślono przyjęto, że promieniowanie słoneczne pada na kolektor powietrzny o powierzchni  $60\text{m}^2$ . Podczas obliczeń uwzględniono zapotrzebowanie na energię cieplną do ogrzewania domu o powierzchni  $150\text{m}^2$  na poziomie  $6000\text{ kWh/rok}$ , zgodnie z zapotrzebowaniem na tą energię określoną przez normę dla domu energooszczędnego wynoszącą  $40\text{ kWh/m}^2$  na rok.

Z tabeli 2 i wykresu 1 wynika, że przy parametrach domu energooszczędnego, zastosowanych kolektorach powietrznych o powierzchni  $60\text{m}^2$  i zużyciu ciepłej wody użytkowej według norm istnieje nadmiar ciepła w wielu miesiącach, szczególnie letnich. Braki ciepła do ogrzewania domu istnieją tylko w dwóch miesiącach zimowych, a mianowicie w grudniu i styczniu. W miesiącach w których jest zdecydowany nadmiar energii, zgodnie z obliczeniami, całkowita jej wartość wynosi około  $35505\text{ kWh}$ . Relatywnie, w miesiącach zimowych niedomiar energii cieplnej jest niewielki i wynosi  $1511\text{ kWh}$ . Brakującą w miesiącach zimowych ilość energii należy zabezpieczyć przy pomocy innych źródeł energii, jeżeli nie dokonuje się magazynowania energii. W pracy [8] pokazano, że można z łatwością zmagazynować latem energię niezbędną do ogrzewania domu w miesiącach zimowych.



#### 4. Wykorzystanie kolektorów słonecznych dla uzyskania chłodu

Kolektory słoneczne mają także, choć w ograniczonym zakresie, możliwość chłodzenia obiektów. Wybrane typy kolektorów mają specjalnie przystosowane systemy wylotowe dla powietrza, aby uzyskać efekt chłodzenia.



Rys. 3. Schemat działania kolektora powietrznego SolarVenti w cyklu chłodzenia [7]

Fig. 3. A working diagram of the SolarVenti sun collector during a cooling cycle [7]

Uzyskanie efektu chłodzenia domu wymaga jednak dostosowania całego obiektu do tego celu. W przypadku domu jednorodzinnego kolektorami powietrznymi należy pokryć tę część budynku, którą oświetla Słońce, a pozostała część budynku powinna posiadać powierzchnie istotnie odbijającą promieniowanie słoneczne o różnej długości (np. folie metaliczne). Z oświetlonej części budynku pokrytej kolektorami należy odpompować nagrzane powietrze na zewnątrz lub użyć do magazynowania ciepła. Można oczekiwać, że w wyniku takich zabiegów temperatura wewnątrz obiektu może przekraczać tylko o kilka stopni temperaturę podłoża i wynosić około 20° Celsjusza. System chłodzenia za pomocą kolektora powietrznego jest stosunkowo prostą i taną instalacją. Taki układ nie zapewni wystarczającego chłodzenia w klimacie ciepłym.

W warunkach ciepłego klimatu należy zastosować bardziej złożone systemy chłodzenia w oparciu o kolektory słoneczne. Systemy tego typu były opisane w pracy [2].

## 5. Podsumowanie

Przedstawiono nowe możliwości zastosowania powietrznych kolektorów słonecznych w warunkach klimatycznych Polski. Ze względu na prostotę konstrukcji, względną tanią oraz fakt, że czynnikiem roboczym jest powietrze, kolektory te nadają się doskonale do ogrzewania domów, ogrzewania wody użytkowej a także do chłodzenia domów w klimacie umiarkowanym. Zastosowanie kolektorów powietrznych prowadzi także do właściwej wentylacji budynku, co szczególnie przy budownictwie energooszczędnym ma istotne znaczenie. Zastosowanie kolektorów powietrznych w budownictwie mieszkaniowym, dla zapewnienia energii cieplnej budynku i wody użytkowej, chłodu oraz odpowiedniej wentylacji budynku, powinno być przewidziane już w fazie projektowania obiektu.

## Literatura

- [1] Kalogirou S. A.: Solar thermal collectors and applications, *Progress in Energy and Combustion Science* 30, 2004, 231-295.
- [2] Kim D. S., Infante Ferreira C.A.: Solar refrigeration options – a state –of-the-art review, *International Journal of Refrigeration*, 31, 2008, 3-15.
- [3] Smolec W.: Fototermiczna konwersja energii słonecznej, PWN, Warsaw, Poland, 2000.
- [4] Timilsina G. R., Kurdgelashvili L, Narbel P. A.: A review of solar energy; Markets, economics and policie, *Polisy Research Working Paper 5845, Soc. Sci. Res. Netw.* 2011,49 pages.
- [5] GetSolar software Autor: Dipl.-ing Markus Maier. version 10.1.1. 21.12.2009.
- [6] <http://www.solarventi.com> [dostęp: 1 maja 2014 r.]
- [7] <http://www.galileaenergy.com/kolektory-powietrzne-systemy-solar-venti.php> [dostęp: 1 maja 2014 r.]
- [8] Fieducik J., Godlewski J.: Storing thermal energy from solar collectors for the needs of a detached house, *Polish Journal of Environment Studies*, 2014, (in print)

## ANALYSIS OF THE POSSIBILITY OF USING SOLAR AIR COLLECTORS FOR DETACHED HOUSES HEATING AND TO WATER PREHEATING

### Summary

The article gives an analysis of the possibility of using solar air collectors for acquiring thermal energy in energy-efficient detached house for heating purpose throughout the whole year

as well as domestic hot water for residents. Types, construction and principles of operation of air collectors and their efficiency were described. Consideration was also given to their advantages and disadvantages. In addition to heating, systems air collectors can provide year-round ventilation of building. The parameters and standards for energy-efficient home and hot water consumption per capita were presented. Analysis of the heat demand for heating of energy efficient building by air collectors were carried out using GetSolar software. The program is designed for the purposes of simulating of solar panels installations in different climatic conditions. Consideration was made for the climatic conditions of the city of Olsztyn, having regard to the solar radiation in the North Poland. The location of the building in relation to the quarters of the globe, and the location of the solar panel on the roof, as well as their optimum tilt relative to the falling sunlight were also specified. The energy balance, taking into account the value of the energy of the solar radiation for consecutive months of the year, the energy needed for heating of energy efficient house and domestic hot water preheating, was shown. For the considerations purposes, SolarVenti Hybryd solar air collectors sets were used. Based on an analysis of the results, it was found that using the appropriate surface of solar air collectors, it is possible to heat the building and meet the needs of hot water for residents in North Poland, excluding two months of winter, when alternative sources of heating should be used.

**Keywords:** solar radiation, solar air collectors, house heating systems, energy-efficient home, GetSolar software.

DOI:10.7862/rb.2014.81

*Przesłano do redakcji: 24.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Diana FIJAŁKOWSKA<sup>1</sup>  
Leszek STYSZKO<sup>2</sup>

## WPŁYW SEZONOWANIA WIERZBY POZYSKA- NEJ RÓŻNYMI TECHNOLOGIAMI NA WARTOŚĆ OPAŁOWĄ BIOMASY<sup>3</sup>

Celem pracy była ocena sezonowanej biomasy wierzbowej na otwartej przestrzeni przez 4-6 miesięcy w aspekcie jej wilgotności, ciepła spalania i wartości opałowej, pozyskanej z doświadczenia polowego z uprawą dziewięciu klonów wierzby wiciowej, gdzie stosowano zróżnicowane nawożenie kompostem z osadów komunalnych i nawożenie mineralne w latach 2008-2010. Zastosowano nawożenie: (a) obiekty bez nawożenia, (b) nawożone kompostem z osadów komunalnych ( $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ s. m.}$ ), (c) nawożone kompostem z osadów komunalnych ( $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ s. m.}$ ) i azotem w ilości  $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$  oraz (d) nawożone kompostem z osadów komunalnych ( $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ s. m.}$ ) i azotem w ilości  $180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$ . Podblokami I rzędu były cztery kombinacje nawozowe, a II rzędu – dziewięć klonów wierzby wiciowej uprawianych przy wysadzeniu 32100 zrzców na hektarze. W doświadczeniu uczestniczyły klony wierzby: 1047, 1054, 1023, 1013, 1052, 1047D, 1056, 1018 i 1033. Poletko do zbioru miało powierzchnię  $11,5 \text{ m}^2$ , zastosowano trzy powtórzenia. Biomasa zbierana w terminie późnowiosennym miała przeciętną wilgotność 29,0% z wahaniami w latach 13,4%–50,3%, a w terminie letnim 26,5% z wahaniami w latach 22,2%–33,5%. Największy wpływ na wilgotność i wartość opałową sezonowanej biomasy miały zmiany pogody w latach sezonowania wierzby i współdziałanie lat z terminami poboru prób, a przy ciepłe spalania – lata odrastania pędów, klony i interakcje klonów z kombinacjami nawożenia oraz klonów z kombinacjami nawożenia i latami. Wpływ kombinacji nawożenia na zawartość wody w sezonowanej biomacie, jej ciepło spalania i wartość opałową był istotny, ale wyjaśniał tylko małą część zmienności. Wartość opałowa biomasy pobrana do analiz w terminie późnowiosennym wyniosła przeciętnie  $12300 \text{ kJ} \cdot \text{kg s.m.}$  z wahaniami w latach  $7867\text{--}15521 \text{ kJ} \cdot \text{kg s.m.}$ , a w terminie letnim –  $12801 \text{ kJ} \cdot \text{kg s.m.}$  z wahaniami w latach  $11311\text{--}13728 \text{ kJ} \cdot \text{kg s.m.}$

**Słowa kluczowe:** wierzba, klony, nawożenie, biomasa, sezonowanie, zawartość wilgoci, ciepło spalania, wartość opałowa

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Diana Fijałkowska, Politechnika Koszalińska, 75-453 Koszalin, 94 3486714, fijałkowska@wilsig.tu.koszalin.pl

<sup>2</sup> Leszek Styszko, Politechnika Koszalińska, 75-453 Koszalin, ul. Śniadeckich 2, 94 3478-557, lstyszko@wbiis.tu.koszalin.pl

<sup>3</sup> Praca była finansowana przez MNiSW ze środków na naukę w latach 2010-2013

## 1. Wstęp

W latach 2005-2011 zużycie biomasy w Polsce w elektroenergetyce wzrosło z 9641 ton do 65470 ton [6]. W 2012 roku udział biomasy stałej jako nośnika energii odnawialnej w łącznym pozyskaniu energii OZE wyniósł 82,16% [8]. Największymi odbiorcami energii z biomasy w Polsce w 2010 roku były gospodarstwa domowe (45,9%), elektrownie i elektrociepłownie zawodowe (22,3%) oraz rolnictwo i leśnictwo (8,6%) [7]. Uprawa wierzby w Polsce zajmuje jeszcze małe powierzchnie. Do jej uprawy można z powodzeniem stosować nawożenie osadami ściekowymi i kompostami z osadów komunalnych [11]. Niedogodnością biomasy wierzby zużytkowanej jako paliwo stałe jest jej duża wilgotność, niska gęstość energetyczna oraz mała jednorodność [9].

Celem pracy była ocena wilgotności biomasy wierzbowej, jej ciepła spalania i wartości opałowej dziewięciu klonów wierzby wiciowej, pozyskanej z doświadczenia polowego, gdzie stosowano zróżnicowane nawożenie organiczne i mineralne w latach 2008-2010, a pozyskana biomasa poddana długotrwałemu sezonowaniu na otwartej przestrzeni.

## 2. Materiał i metody

Zawartość wilgoci w biomase, jej ciepło spalania i wartość opałową określono na próbach pobranych z doświadczenia polowego założonego w Kościerznicy pod Koszalinem metodą losowanych podbloków w układzie zależnym, w trzech powtórzeniach. Gleba pod doświadczeniem oznaczona została jako biellicowa właściwa - pseudobiellicowa o składzie piasku gliniastego lekkiego do głębokości 50-100 cm, a głębiej - gliny lekkiej, należy do RIVa klasy bonitacyjnej zaliczonej do kompleksu żyniego dobrego. Referowane doświadczenie składało się z okresu przygotowawczego (2005 rok) oraz okresu odrastania pędów (2006-2009). Na dużych poletkach (podbloki I rzędu) rozlosowano dziewięć klonów wierzby (1047, 1054, 1023, 1013, 1052, 1047D, 1033 i 1018). Zręzy wysadzono w zagęszczeniu 32100 karp na hektarze. Podblokami I rzędu były kombinacje nawożenia: (a) obiekty bez nawożenia, (b) nawożone kompostem z osadów komunalnych ( $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ s. m.}$ ), (c) nawożone kompostem z osadów komunalnych ( $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ s. m.}$ ) i azotem w ilości  $90 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$  oraz (d) nawożone kompostem z osadów komunalnych ( $10 \text{ t} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ s. m.}$ ) i azotem w ilości  $180 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \text{ N}$ . W kwietniu 2006 roku wysiano na kombinacjach doświadczenia „b” „c” i „d” kompost z osadów komunalnych oraz nawóz Hydrofoska 16 na kombinacjach „c” i „d”. Nawóz azotowy na kombinacjach „c” i „d” zastosowano także w latach 2007-2009. Poletko do zbioru miało  $11,5 \text{ m}^2$ . Przyrosty pędów koszono w trzech terminach: po II roku (8.02.2008 r.), po III roku (25.02.2009 r.) i po IV roku przyrastania (26.11.2009 r.). Próbki biomasy do badań pobrano w czterech terminach (I - w dniu koszenia, tj. zimowy, oraz po sezonowaniu na polu: II - wczesnowiosenny, III - późnowiosenny i IV - letni.

Próby biomasy pobrano w dniach w terminach: wczesnowiosennym - 11.04.2008 roku, 20.04.2009 roku i 24.03.2010 roku, późnowiosennym - po upływie ok. 2 miesięcy od II terminu (5.06.2008, 15.06.2009 i 19.05.2010) i letni - po upływie ok. 2 miesięcy od III terminu (20.08.2008, 20.08.2009 i 31.07.2010). Wilgotność biomasy oznaczono w laboratorium analiz biomasy Wydziału Analiz Chemicznych Południowego Koncernu Energetycznego S.A. przy Elektrowni Siersza w Trzebini, zgodnie z procedurą Q/ZK/05/A:2010, a analizy ciepła spalania i wartości opałowej - według procedury Q/ZK/P/15/12/A:2005 [1]. Dla badanych cech wykonano analizę wariancji oraz określono znaczenie komponentów wariancyjnych, a istotność efektów oceniono testem F.

### 3. Wyniki i dyskusja

Dane o rozkładzie opadów i temperatur w latach 2008-2010, zaczerpnięto z pracy Styszki i in. [16] i na tej podstawie wyliczono wskaźnik hydrotermiczny Sielianinowa (K) dla okresów sezonowania biomasy pomiędzy II a III terminem poboru prób (tab. 1) oraz pomiędzy III a IV terminem poboru prób (tab. 2). Dane charakteryzujące warunki pogodowe podczas sezonowania biomasy na otwartej przestrzeni w okresie pomiędzy I (zimowy) a II (wczesnowiosenny) terminem poboru prób zamieszczono w innej pracy autorów [3]. Warunki pogodowe w okresie sezonowania biomasy wierzby pomiędzy II terminem poboru prób (wczesnowiosenny) a III (późnowiosenny) były różne w latach badań (tab. 1 i 2). Najniższą wilgotnością (13,4%) charakteryzowała się biomasa zebrana w dniu 5 czerwca 2008 roku (III termin), kiedy w okresie jej sezonowania spadły najmniejsze ilości opadów, a największą wilgotność miała biomasa zebrana w dniu 19 maja 2010 roku (50,3%) (tab. 1, 2 i 5). Okres pomiędzy zbiorem wczesnowiosennym (24 marca) w 2010 roku a późnowiosennym (19 maja), mimo że charakteryzował się małą ilością opadów (tab. 1), to wilgotność powietrza była bardzo wysoka przy jednocześnie niskiej temperaturze powietrza. W ciągu 5 dni przed poborem prób w III terminie 2010 roku codziennie padał deszcz. Przedłużając sezonowanie biomasy w 2008 roku z 5 czerwca do 20 sierpnia (IV termin poboru prób) uzyskano biomasę o wyższej wilgotności, a w przypadku 2010 roku – o niższej wilgotności (tab. 2 i 5). W 2009 roku biomasa sezonowana do 19 maja (III termin) oraz do 20 sierpnia (IV termin) miały zbliżoną wilgotność (tab. 1, 2 i 5).

Tabela 1. Warunki pogodowe w Boninie k. Koszalina w okresie pomiędzy II a III terminem poboru prób biomasy w latach 2008-2010 według IHAR

Table 1. Meteorological conditions in Bonin near Koszalin during period between II and III date of biomass sampling in the years 2008-2010 according to IHAR

Parametr	Charakterystyka pogody w okresie pomiędzy II a III terminem poboru prób biomasy		
	2008	2009	2010
Liczba dni	56	57	56
Średni opad dobowy [mm]	0,8	3,7	1,4
Temperatura dobową [°C]	11,7	12,2	7,8
Współczynnik Sielianiowa	0,68	3,03	1,82
Wilgotność powietrza [%]	75,5	77,5	83,1
Średni opad dobowy z 14 dni przed poborem prób [mm]	0,1	10,1	3,1
Wilgotność biomasy [%]	<b>13,4</b>	23,3	<b>50,3</b>

Tabela 2. Warunki pogodowe w Boninie k. Koszalina w okresie pomiędzy III a IV terminem poboru prób biomasy w latach 2008-2010 według IHAR

Table 2. Meteorological conditions in Bonin near Koszalin during period between III and IV date of biomass sampling in the years 2008-2010 according to IHAR

Parametr	Charakterystyka pogody w okresie pomiędzy III a IV terminem poboru prób biomasy		
	2008	2009	2010
Liczba dni	76	66	73
Średni opad dobowy [mm]	3,4	2,4	2,3
Temperatura dobową [°C]	17,2	17,8	16,7
Współczynnik Sielianiowa	1,95	1,35	1,38
Wilgotność powietrza [%]	78,2	82,7	80,8
Średni opad dobowy z 14 dni przed poborem prób [mm]	6,8	1,7	5,2
Wilgotność biomasy [%]	23,7	22,2	33,5

W analizach statystycznych wykazano, że na zawartość wilgoci w biomacie sezonowanej i wartość opałową największy wpływ miały lata przyrastania pędów oraz współdziałanie lat odrastania (wieku pędów) z terminami poboru prób. Natomiast przy analizach ciepła spalania największy efekt wykazano dla lat przyrastania pędów, klonów, współdziałań odmian z dawkami azotu i odmian z dawkami azotu oraz latami odrastania pędów (tab. 3). Wyniki tych analiz są zgodne z innymi badaniami autorów [1, 2, 3, 17].

Przeciętnie po długim okresie sezonowania biomasy (tab. 4) uzyskano prawie 2-krotnie niższą zawartość wilgoci w biomacie wierzby niż miało to miejsce przy poborze prób w dniu zbioru lub też po 2 miesięcznym okresie sezonowania [3].

Tabela 3. Wpływ badanych czynników na zawartość wilgoci, ciepło spalania i wartość opałową biomasy  
 Table 3. Effect of studied factors on the water content, gross calorific value and net calorific value of biomass

Komponent wariancyjny	Poziomy czynnik	Struktura procentowa komponentów wariancyjnych		
		Zawartość wilgoci	Ciepło spalania	Wartość opałowa
Termin poboru prób [A]	2	1,2***	0,7***	1,5***
Liczba lat przyrastania pędów [B]	3	59,1***	56,6***	79,1***
Kombinacje nawozowe [C]	4	0,1*	1,2***	0,1**
Klony wierzby [D]		0,2**	12,9***	0,1
Suma współdziałań		39,4	28,6	19,2
AxB		35,2***	0,0	13,7***
AxC		0,1	0,3*	0,1
AxD		1,0***	0,0	1,3***
BxC		0,2*	1,8***	0,2*
BxD		0,7***	3,2***	0,9***
CxD		0,0	8,9***	0,0
CxBxA		0,4**	0,4	0,6**
DxCxB		0,0	10,7***	0,0
AxBxCxD		1,5	3,2	2,0
Pozostałe współdziałania		0,3	0,1	0,4
Suma		100,0	100,0	100,0

Istotność różnic przy: \* $\alpha=0,05$ ; \*\* $\alpha=0,01$ ; \*\*\* $\alpha=0,001$ ;

Najniższą zawartością wilgoci charakteryzowała się biomasa z obiektów: IV termin poboru prób, po 2 roku przyrastania pędów, na obiektach z nawożeniem kompostem z osadów komunalnych („b”) oraz przy klonach 1047 i 1018 (tab. 4). Najwyższe wartości dla ciepła spalania, uzyskano przeciętnie dla poziomu czynników: III termin poboru prób, dla 3 roku przyrastania pędów na obiektach bez nawożenia („a”) i klonu 1033 (tab. 4).

Przeciętnie najwyższe wartości opałowej nie otrzymano dla tych samych czynników, co przy ciepłe spalania. Najwyższymi wartościami opałowymi charakteryzowała się biomasy z obiektów: IV termin poboru prób, dla 2 roku przyrastania pędów na obiektach z nawożeniem kompostem z osadów komunalnych („b”) i przy klonie 1018 (tab. 4).

W stosunku do badań biomasy pobranej w dniu zbioru w okresie zimowym i w terminie wczesnowiosennym po 2-miesięcznym okresie sezonowania [3], to przy sezonowaniu dłuższym (4 i 6 miesięcznym), jak to miało miejsce w referowanych badaniach, uzyskano przeciętnie duże zmniejszenie wilgotności biomasy z 51,1% do 27,7% oraz zwiększenie wartości opałowej tej biomasy z 7680 kJ·kg<sup>-1</sup> do 12550 kJ·kg<sup>-1</sup>, tj. o 63,4%, a tylko nieznaczne zwiększenie



ciepła spalania biomasy przeciętnie z  $18528 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$  do  $18556 \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$ , tj. o 0,2% (tab. 4).

Tabela 4. Wpływ badanych czynników na zawartość wilgoci w biomacie, ciepło spalania i wartość opałową biomasy

Table 4. Effect of studied factors on water content in biomass, gross and net calorific value of biomass

Czynniki	Poziomy czynnik	Zawartość wilgoci w biomacie	Ciepło spalania [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1} \text{ s. m.}$ ]	Wartość opałowa [ $\text{kJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ ]
Termin poboru prób [A]	III	29,0	18584	12300
	IV	26,5	18548	12801
	NIR <sub>0,05</sub>	0,6***	14***	117***
Liczba lat przyrastania pędów [B]	2	18,5	18351	14442
	3	22,8	18793	13620
	4	41,9	18553	9589
	NIR <sub>0,05</sub>	0,7***	18***	142***
Kombinacje nawozowe [C]	„a”	27,7	18596	12572
	„b”	27,1	18594	12706
	„c”	28,3	18539	12408
	„d”	27,8	18536	12515
	NIR <sub>0,05</sub>	0,8*	20***	164**
Klony wierzby [D]	1047	26,9	18458	12687
	1054	27,1	18503	12642
	1023	27,4	18512	12609
	1013	28,0	18599	12486
	1052	28,2	18537	12432
	1047D	27,8	18553	12480
	1056	27,9	18575	12504
	1018	26,9	18532	12723
	1033	29,4	18828	12389
	NIR <sub>0,05</sub>	1,2**	30***	245 n.i.

Istotność różnic przy: \* $\alpha=0,05$ ; \*\* $\alpha=0,01$ ; \*\*\* $\alpha=0,001$ ; n.i. – brak istotności

Wykazano istotność współdziałania terminów poboru prób wierzby z liczbą lat przyrastania pędów w odniesieniu do wilgotności biomasy i jej wartości opałowej (tab. 5). Wilgotność biomasy po czwartym roku przyrastania pędów zebrana w III terminie (późnowiosenny) była taka sama jak zebrana w terminie wczesnowiosennym (II), a w inne lata – przy dłuższym sezonowaniu była niższa niż przy zbiorze zimowym i wczesnowiosennym [3].

Wilgotność biomasy miała wpływ na jej wartość opałową (tab. 5). Wydłużając sezonowanie biomasy skoszonej zimą na okres 4 miesięcy (do III terminu poboru prób) uzyskano wyższą wartość opałową o 157% przy zbiorze po drugim roku, o 115% przy zbiorze po trzecim roku i o 5% przy zbiorze po czwartym roku. W stosunku do sezonowania 2-miesięcznego (wczesno wiosenny poboru prób – II), również były znaczne przyrosty wartości opałowej tej bioma-

sy i wyniosły one odpowiednio: po drugim roku – 101%, po trzecim roku – 25% i po czwartym roku 2%. Wydłużając sezonowanie pędów wierzby z 4 miesięcy (późnowiosenny termin poboru – III) do 6 miesięcy (letni termin poboru prób – IV) nastąpiło zmniejszenie jej wartości opałowej o 14% po drugim roku, a zwiększenie – po trzecim roku o 2% i po 4 roku – o 44%.

Tabela 5. Wpływ interakcji terminów poboru prób z liczbą lat przyrastania pędów na wilgotność i wartość opałową biomasy [kJ·kg<sup>-1</sup>]

Table 5. Effect of interaction between dates of biomass sampling and number of years of willow shoots growth on water content in shoots and net calorific value of biomass [kJ·kg<sup>-1</sup>]

Liczba lat przyrastania pędów [B]	Wilgotność biomasy w terminach poboru prób <sup>1</sup>		Wartość opałowa biomasy w terminach poboru prób [kJ·kg <sup>-1</sup> ] <sup>1</sup>	
	III	IV	III	IV
2	13,4	23,7	15521	13363
3	23,3	22,2	13511	13728
4	<b>50,3</b>	33,5	<b>7867</b>	11311
NIR <sub>0,05</sub>	1,0***		200***	

<sup>1</sup> Termin poboru prób: III - późno wiosenny, IV - letni; \*\*\*Istotność różnic przy  $\alpha=0,001$ ;

Tabela 6. Wpływ interakcji terminów poboru prób z klonami wierzby na wilgotność i wartość opałową biomasy [kJ·kg<sup>-1</sup>]

Table 6. Effect of interaction between dates of biomass sampling and willow clones on water content in shoots and net calorific value of biomass [kJ·kg<sup>-1</sup>]

Klony wierzby	Wilgotność biomasy w terminach poboru prób <sup>1</sup>		Wartość opałowa biomasy w terminach poboru prób [kJ·kg <sup>-1</sup> ] <sup>1</sup>	
	III	IV	III	IV
1047	27,8	25,9	12517	12858
1054	27,4	26,9	12608	12677
1023	29,1	25,7	12273	12944
1013	30,6	25,5	11955	13016
1052	27,4	29,1	12618	12247
1047D	28,1	27,5	12422	12537
1056	30,5	25,3	11977	13031
1018	28,5	25,2	12407	13040
1033	31,7	27,1	11923	12856
NIR <sub>0,05</sub>	1,7***		347***	

<sup>1</sup> Termin poboru prób: III - późno wiosenny, IV - letni; \*\*\*Istotność różnic przy  $\alpha=0,001$ ;

W III terminie poboru prób (późnowiosenny) najniższą zawartością wilgoci charakteryzowała się biomasa z klonów 1054 i 1952, a najwyższą – z klonu 1033 (tab. 6).

W IV terminie poboru prób (letni) najniższą wilgotność miały pędy klonu 1018, a najwyższą – klonu 1052. Wartość opałowa biomasy tych klonów była w odwrotnej zależności do zawartości wilgoci w niej (tab. 6).

Tabela 7. Wpływ interakcji klonów wierzby z nawożeniem na ciepło spalania biomasy [kJ·kg<sup>-1</sup> s.m.]

Table 7. Effect of interaction between clones and fertilization on gross calorific value of biomass [kJ·kg<sup>-1</sup> s.m.]

Klony wierzby	Kombinacje nawozowe <sup>1</sup>			
	„a”	„b”	„c”	„d”
1047	15519	18385	18398	18532
1054	18544	18476	18558	18432
1023	18429	18615	18484	18522
1013	18523	18748	18640	18484
1052	18499	18648	18501	18501
1047D	18704	18477	18521	18511
1056	18565	18672	18503	18558
1018	18635	18403	18527	18565
1033	18947	18919	18722	18723
NIR <sub>0,05</sub>	60***			

<sup>1</sup> Termin poboru prób: III - późno wiosenny, IV - letni; \*\*\*Istotność różnic przy  $\alpha=0,001$ ;

W analizach miała miejsce istotna interakcja klonów wierzby z nawożeniem w odniesieniu do ciepła spalania biomasy (tab.7). We wszystkich kombinacjach nawozowych najwyższe ciepło spalania uzyskano przy klonie 1033, a najniższe przy klonach: 1023 na obiektach bez nawożenia („a”), 1047 na obiektach nawożonych samym kompostem oraz z uzupełniającym nawożeniem azotem w dawce 90 kg·ha<sup>-1</sup> N (kombinacje nawozowe „b” i „c”) i u klonu 1054 na obiektach nawożonych kompostem i azotem w dawce 180 kg·ha<sup>-1</sup> N („d”).

W literaturze mało jest danych o wpływie sezonowania na otwartej przestrzeni na wilgotność biomasy wierzby i jej wartość opałową. Najczęściej spotyka się analizy wilgotności biomasy zebranej w okresie zimy [14, 15, 18, 19].

Wilgotność biomasy wierzby zbieranej w okresie zimowym (listopad 2005, marzec 2006) zawierała się w przedziale 54,1% do 49,8% [12]. W badaniach własnych biomasa z zimowego zbioru miała wilgotność od 54,3% do 58,2%, a z wczesnowiosennego od 43,3% do 49,6% [3].

Doniesienia o obniżeniu wilgotności biomasy wierzby po sezonowaniu spotkano w pracach Giglera i in. [5], Frączka i Mudryka [4] oraz Stolarskiego i in. [15]. Cytowane badania wskazują, że biomasa pędów wierzby poddana sezonowaniu w stercie przy wilgotności początkowej 50%, w okresie od marca do czerwca zmniejszając wilgotność przeważnie o połowę. W badaniach Frączka i Mudryka [14] obniżenie wilgotności sezonowanych pędów miało miejsce głównie w okresie wiosennym i to niezależnie od tego czy były sezonowane pod dachem czy na wolnym powietrzu.

W stosunku do ciepła spalania w literaturze podaje się wyniki dotyczące spalania biomasy niesezonowanej [10, 13]. Badania własne wykazały, że ciepło spalania w biomacie sezonowanej nieznacznie wzrasta w stosunku do niesezo-

nowanej (o 0,2%), a natomiast radykalnie wzrasta wartość opałowia takiej biomasy (o 63,4%). W badaniach własnych stwierdzono także, że sezonowanie biomasy wierzby na wolnym powietrzu na Pomorzu Środkowym nie zawsze skutkuje zmniejszeniem jej wilgotności, co było spowodowane jest to dużą ilością opadów w tym okresie [16].

#### 4. Wnioski

1. Biomasa wierzby wiciowej zbierana w terminie późnowiosennym miała przeciętną wilgotność 29,0% z wahaniami w latach 13,4%–50,3%, a w terminie letnim 26,5% z wahaniami w latach 22,2%–33,5%.
2. Największy wpływ na wilgotność i wartość opałowia sezonowanej biomasy wierzby miał przebieg pogody w latach i okresach sezonowania wierzby oraz współdziałanie lat z terminami poboru prób, a przy ciepłe spalania – lata odrastania pędów, klony i interakcje klonów z kombinacjami nawożenia oraz klonów z kombinacjami nawożenia i latami.
3. Wartość opałowia biomasy pobrana do analiz w terminie późnowiosennym wyniosła przeciętnie 12300 kJ·kg s. m. z wahaniami w latach 7867–15521 kJ·kg s. m., a w terminie letnim – 12801 kJ·kg s. m. z wahaniami w latach 11311–13728 kJ·kg s. m.
4. Wpływ kombinacji nawożenia na zawartość wilgoci w sezonowanej biomasy wierzby, jej ciepło spalania i wartość opałowia był istotny, ale wyjaśniał tylko małą część zmienności.

#### Literatura

- [1] Fijałkowska D.: Zmienność parametrów energetycznych wierzby krzewiastej w zależności od jej uprawy. Politechnika Koszalińska. Maszynopis rozprawy doktorskiej, Koszalin 2013.
- [2] Fijałkowska D., Styszko L.: Ciepło spalania i wartość opałowia biomasy wierzby z różnej liczby lat odrastania pędów. Zesz. Probl. Post. Nauk Rol. 564, 2011, s. 65-72.
- [3] Fijałkowska D., Styszko L., Boguski A.: Wpływ lat uprawy, kombinacji nawożenia i klonów na ciepło spalania i wartość opałowia biomasy wierzby pozyskanej w okresie zimowym i po krótkotrwałym jej sezonowaniu. Fragmenta Agronomica, nr 31(3), 2014, w druku.
- [4] Frączek J., Mudryk K.: Zmiany wilgotności pędów wierzby *Salix viminalis* L. w okresie sezonowania. Inżynieria Rolnicza 10(108), 2008, s. 55-61.
- [5] Gigler J.K., Loon W.K.P. van, Vissers M.M., Bot G.P.A.: Forced convective drying of willow chips. Biomass and Bioenergy. 19(4), 2000, s. 259-270.

- [6] Grudziński Z.: Koszty środowiskowe wynikające z użytkowania węgla kamiennego w energetyce zawodowej. *Rocz. Ochr. Środ./Annual Set Environm.*, 15, 2013, s. 2249-2266.
- [7] GUS: Energia ze źródeł odnawialnych w Polsce w 2010 r. GUS Warszawa 2011.
- [8] GUS: Energia ze źródeł odnawialnych w Polsce w 2012 r. GUS Warszawa 2013.
- [9] Kordylewski W.: Biomasa. [W:] Spalanie i paliwa. Pod redakcją Włodzimierza Kordylewskiego, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008, s. 446-458.
- [10] Labrecque M., Teodorescu T.I., Daigle S.: Biomass productivity and Wood energy of *Salix* species after 2 years growth in SRC fertilized with wastewater sludge. *Biomass and Bioenergy*, 12(6), 1997, s. 409-417.
- [11] Ociepa-Kubicka A., Pachura P.: Wykorzystanie osadów ściekowych i kompostu w nawożeniu roślin energetycznych na przykładzie miskanta i ślazuca. *Rocz. Ochr. Środ./Annual Set Environm.*, 15, 2013, s. 2267-2278.
- [12] Stolarski M., Tworkowski J., Szczukowski S.: Biopaliwa z biomasy wieloletnich roślin energetycznych. *Energetyka*, 1, 2008, s. 77-80.
- [13] Stolarski M., Tworkowski J., Szczukowski S.: Produktywność i charakterystyka biomasy wierzby jako paliwa. *Energetyka*, 9, 2006, s. 53-56.
- [14] Stolarski M., Krzyżaniak M.: Wartość opałowa i skład elementarny biomasy wierzby produkowanej systemem Eko - *Salix*. *Fragm. Agron.*, 28(4), 2011, s. 86-95.
- [15] Stolarski M.J., Szczukowski S., Tworkowski J., Krzyżaniak M.: Cost of heat energy generation from willow biomass. *Renable Energy* 59, 2013a, s. 100-104.
- [16] Styszko L., Fijałkowska D., Sztyma M., Ignatowicz M.: Wpływ warunków uprawy na pozyskanie biomasy wierzby energetycznej w czteroletnim cyklu. *Rocz. Ochr. Środ./Annual Set Environm.*, 12, 2010, s. 575-586.
- [17] Styszko L., Fijałkowska D., Sztyma-Horwat M.: Influence of fertilization with compost from municipal sludges on the content of dry matter and the yield of the energy willow planted on light soil. *Environm. Protection Engineering*, 37(3), 2011, s. 37-45.
- [18] Szczukowski S., Tworkowski J., Stolarski M., Grzelczyk M.: Produktywność roślin wierzby (*Salix* spp.) i charakterystyka pozyskanej biomasy jako paliwa. *Zesz. Post. Nauk Roln.* 507, 2005, s. 495-503.
- [19] Tharakan P.J., Volk, T.A., Abrahamson, L.P., White, E.H.: Energy feedstock characteristics of willow and hybrid poplar clones at harvest age. *Biomass and Bioenergy*, 25(6) 2003, s. 571-580.

## INFLUENCE OF SEASONING OF WILLOW OBTAINED BY VARIOUS TECHNOLOGIES ON BIOMASS GROSS CALORIFIC VALUE

### Summary

The aim of the study was assessment of willow biomass seasoned in the open air for 4-6 months in terms of its water content, net and gross calorific value. Biomass was obtained from field experiment with cultivation of nine clones of willow and various fertilization with compost from municipal sewage sludge and mineral fertilization in the years 2008-2010. Following fertilization combinations were used: (a) objects without fertilization, (b) fertilized with compost from municipal sewage sludge ( $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  of dm), (c) fertilized with compost from municipal sewage sludge ( $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  of dm) and nitrogen  $90 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  of N, and (d) fertilized with compost from municipal sewage sludge ( $10 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$  of dm) and nitrogen  $180 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  of N. Sub-blocks of I level were four fertilizer combinations and level II – nine clones of willow cultivated at planting of 32,100 cuttings per hectare. In the experiment following willow clones were used: 1047, 1054, 1023, 1013, 1052, 1047D, 1056, 1018 and 1033. Harvesting plot had an area of  $11.5 \text{ m}^2$ , three repetitions were applied. Biomass harvested in the late spring term had an average water content of 29.0% changing from 13.4% to 50.3 % within the years and in the summer term 26.5%, changing from 22.2% to 33.5% within years. The biggest influence on water content and gross calorific value of the seasoned biomass had weather course during years of willow seasoning and interaction of years with dates of sampling, and for the gross calorific value – the years of shoots regrowth, clones and interaction of clones with combinations of fertilization and clones with combinations of fertilization and years. The influence of fertilization combination on water content in seasoned biomass, its gross and net calorific value was significant, but explained only a small part of the variation. Net calorific value of biomass collected for analysis within late spring term was on average  $12,300 \text{ kJ}\cdot\text{kg}$  of dm changing from 7,867 to  $15,521 \text{ kJ}\cdot\text{kg}$  of dm within years, and in the summer term  $12,801 \text{ kJ}\cdot\text{kg}$  of dm changing from 11,311 to  $13,728 \text{ kJ}\cdot\text{kg}$  of dm.

**Keywords:** willow, clones, fertilization, biomass, seasoning, water content, gross calorific value, net calorific value

DOI:10.7862/rb.2014.82

*Przesłano do redakcji: 07.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 22.12.2014 r.*



Halina GARBALIŃSKA<sup>1</sup>  
Magdalena BOCHENEK<sup>2</sup>

## POPOWODZIOWE WYSYCHANIE PRZEGRÓD WYKONANYCH Z BETONU KOMÓRKOWEGO I ZACHODZĄCE ZMIANY PRZEWODNOŚCI CIEPLNEJ

W niniejszym referacie przedstawiono wyniki dwóch kilkietapowych eksperymentów przeprowadzonych na próbkach z betonu komórkowego o klasie gęstości 400 kg/m<sup>3</sup>. W obu eksperymentach próbki najpierw poddano intensywnemu działaniu ciekłej wody, następnie w pierwszym pomierzono parametry cieplne, zaś w drugim suszono próbki w warunkach laboratoryjnych, tj. w temperaturze ok. 20<sup>0</sup>C i wilgotności względnej ok. 30%. Głównym celem badań było wyznaczenie współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$  dla próbek będących w różnym stanie zawilgocenia oraz określenie funkcji opisującej zależność  $\lambda$  od stopnia zawilgocenia materiału  $w$ . Następnie przy użyciu funkcji  $\lambda = f(w)$  odwzorowano zmiany zachodzące w parametrach cieplnych betonu komórkowego wysychającego z zawilgocenia powodziowego. Zmienne rozkłady wilgotności oraz przewodności cieplnej po grubości przegrody odtworzono w trzech punktach czasowych – po upływie 1, 2, a następnie 3 miesięcy trwania procesu wysychania. Stwierdzono silne zróżnicowanie w rozkładzie badanych wielkości fizycznych ( $\lambda$  oraz  $w$ ) po miesięcznym, ale także i dwumiesięcznym okresie wysychania oraz powrót do stanu akceptowalnego pod względem wilgotnościowym i cieplnym po 3 miesiącach wysychania. Uzyskane rezultaty świadczą o bezdyskusyjnej konieczności uwzględniania – przy sporządzaniu bilansów energetycznych budynków – sytuacji związanych ze stanem wilgotnościowym przegród, gdyż procesy wilgotnościowe mogą bardzo silnie pogorszyć ich parametry cieplne na długi okres czasu, jako że wysychanie trwa miesiącami nawet przy sprzyjających warunkach zewnętrznych.

**Słowa kluczowe:** beton komórkowy, przepływ kapilarny, przewodność cieplna, wilgotność

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: dr hab. inż. prof. nadzw. ZUT Halina Garbalińska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 48 29, e-mail: Halina.Garbalińska@zut.edu.pl

<sup>2</sup> mgr inż. Magdalena Bochenek, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, tel. 91 449 45 14, e-mail: Magdalena.Bochenek@zut.edu.pl



## 1. Wstęp

Obiekty budowlane są narażone na działanie wilgoci nie tylko w trakcie budowy, ale również w całym okresie użytkowania budynku. Najważniejszymi źródłami wilgoci są: woda znajdująca się w gruncie, wilgoć technologiczna, opady atmosferyczne, woda pochodząca z awarii instalacji wodociągowej, woda popowodziowa [11]. Największe szkody może wyrządzić woda popowodziowa. Aby umieć odpowiednio zareagować w sytuacji jej wystąpienia, należy dysponować wiedzą nt. zachowania się materiałów poddanych tak specyficznym działaniom środowiskowym. Przy czym istotne jest nie tylko zdefiniowanie zmienności parametrów materiałowych w wyniku zawilgocenia, ale również tempo powrotu do stanu wyjściowego, związane z kinetyką procesu wysychania przegród.

Woda, zgromadzona w przegrodzie, stwarza niekorzystny klimat w pomieszczeniach i może doprowadzić do rozwoju pleśni i grzybów. Wilgoć w materiale powoduje jego destrukcję oraz korozję biologiczną i chemiczną [9,10].

Woda, wnikać w materiał, wypełnia jego pory i tym samym usuwa z nich powietrze. Przewodność cieplna dla wody w temperaturze 20°C wynosi ok. 0,58 W/(m·K), zaś dla nieruchomego powietrza w tej samej temperaturze ok. 0,025 W/(m·K). Zatem jest ok. dwudziestokrotnie wyższa [3].

Właściwości cieplne porowatych materiałów budowlanych mogą ulegać silnym wahaniom w zależności od nasilenia działających na nie różnych czynników, np. zawilgocenia. Wpływ różnych czynników badano m.in. w pracach [1,2,5,6,7,8].

Proces wysychania zawilgoconych przegród jest długotrwały, w rezultacie czego również powrót parametrów cieplnych do stanu pierwotnego jest rozciągnięty w czasie. Według [8] czas wysychania zawilgoconych elementów zwykle nie przekracza 3 lat i zależy od konstrukcji przegrody i warunków otoczenia. W niniejszym referacie dokonano symulacji zachowania się przegród jednowarstwowych wykonanych z betonu komórkowego, poddanych najpierw intensywnemu działaniu ciekłej wody, a później długotrwałemu suszeniu. Testowano jak zmienia się stan wilgotnościowy po grubości przegrody oraz związana z nim bezpośrednio przewodność cieplna, decydująca o termoizolacyjności przegrody.

## 2. Eksperyment

### 2.1. Parametry cieplne przegród zawilgoconych kapilarnie

W pierwszym eksperymencie przeprowadzono symulacje sytuacji, w której przegrody wykonane z betonu komórkowego o klasie gęstości 400 kg/m<sup>3</sup> zostają narażone na działanie ciekłej wody, wnikać w głąb danego materiału w wyniku działania sił kapilarnych. Po 1-miesięcznym okresie symulacyjnym, w trakcie którego woda rozprzestrzeniała się po grubości przegrody, przepro-

wadzono badania testujące. Stanowiły one zasadniczy etap tej części eksperymentu, w ramach którego przebadano, jak woda rozprzestrzeniająca się po grubości przegrody zmieniała rozkład jej parametrów cieplnych.

Eksperyment przeprowadzono na prostopadłościennych próbkach z betonu komórkowego o początkowych wymiarach 12x12x24 cm. Próbki były pobrane z bloczka w takim kierunku, w jakim wilgoć migrowałaby przez nie po grubości przegrody. Pobocznicze próbki zaizolowano, zaś powierzchnie czołowe:

- dolna – pozostawała w ciągłym kontakcie z wodą,
- górna – wyprowadzała powietrze wypychane z porów materiału przez wnikałą wodę.

Badanie rozpoczęto od wyznaczenia masy początkowej próbek oraz ich wymiarów geometrycznych i wyjściowej gęstości objętościowej. Następnie próbki wstawiono do wcześniej przygotowanych kuwet z wodą destylowaną, gdzie pozostawiono je na okres jednego miesiąca. Przez cały ten czas utrzymywano jednakową głębokość zanurzenia próbek (ok. 2 mm).

W drugiej części tego eksperymentu, po upływie miesiąca, wytypowano trzy próbki prostopadłościenne 12x12x24 cm i pocięto je na sześć próbek o jednakowej grubości (ok 4 cm).

Na tak przygotowanych próbkach przeprowadzono metodą niestacjonarną badania współczynnika przewodzenia ciepła  $\lambda$ . Do pomiarów wykorzystano przenośny aparat pomiarowy ISOMET 2104. W każdym punkcie pomiarowym badanie przeprowadzano dwukrotnie.

Po zakończeniu pomiarów  $\lambda$  umieszczono wszystkie próbki w suszarce w temperaturze 105<sup>0</sup>C i po wysuszeniu do stałej masy ponownie zmierzono współczynnik przewodzenia ciepła – tym razem dla próbek o zerowej zawartości wilgoci.



Rys. 1. Pomiar parametrów cieplnych próbek składowych

Fig. 1. Measurements of thermal parameters of component samples

## 2.2. Popowodziowe wysychanie przegród i zachodzące zmiany w ich parametrach cieplnych

Drugi eksperyment rozpoczęto tak samo jak pierwszy – od poddania próbek z betonu komórkowego o klasie gęstości 400 kg/m<sup>3</sup> badaniu podciągania

kapilarnego, które trwało przez okres jednego miesiąca. Tym razem próbek nie izolowano na pobocznicach. Pierwsze kroki, tj. przygotowanie kuwet z wodą destylowaną, ustalenie masy wyjściowej próbek, wyglądały tak samo jak w eksperymencie pierwszym opisanym w p. 2.1.

Po upływie miesiąca próbki zanurzone w wodzie, aż do całkowitego nasycenia. Próbki nasycone wodą najpierw docięto na wymiar 10x10x24 cm, a następnie przecięto na 2 połowy (każda o wymiarze 10x10x12 cm).

Każdy bloczek zaizolowano z pięciu stron oraz dodatkowo owinięto folią, tak aby wysychaniu podlegała tylko jedna powierzchnia (10x10 cm).



Rys. 2. Jednokierunkowy proces wysychania próbek prostopadłościennych 10x10x12 cm

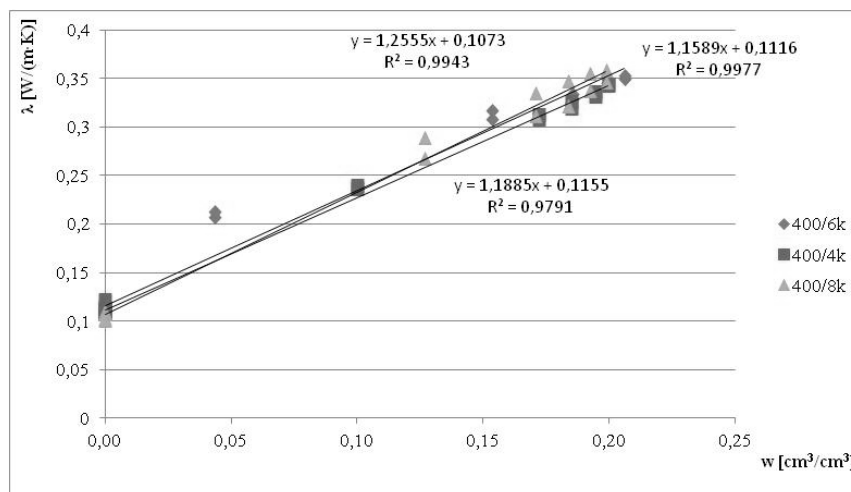
Fig. 2. One-dimensional process of drying of cuboid samples 10x10x12cm

Systematycznie mierzono masę wysychających próbek, a po upływie 30 dni wytypowano 4 próbki, które pocięto po długości na 10 jednakowych plastrów. Po zinventaryzowaniu wszystkie plastry umieszczono w suszarce w temperaturze 105°C i suszono je aż do uzyskania stałej masy. Następnie obliczono wilgotność objętościową każdego z plastrów. Po 60 dniach wytypowano kolejne 4 próbki i tak jak poprzednio pocięto je na 10 jednakowych plastrów i wysuszono do stałej masy. Następnie po 90 dniach pocięto na plastry kolejne cztery bloczki.

### 2.3. Wyniki przeprowadzonych badań

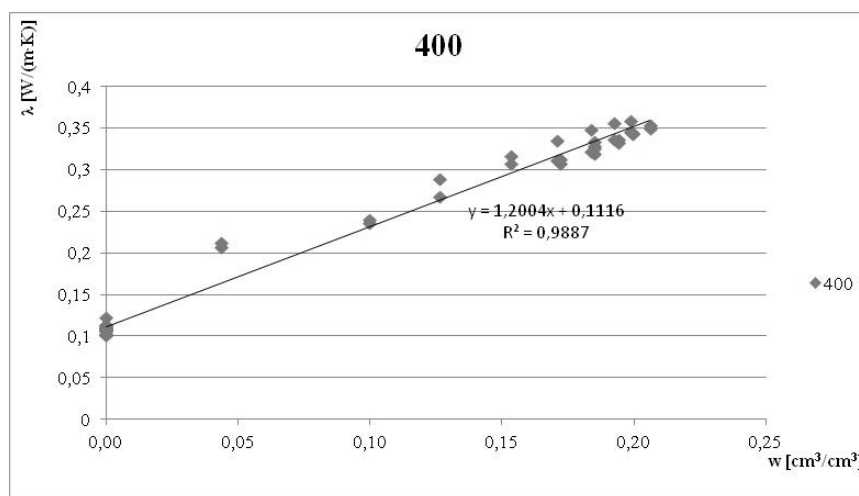
Badania przeprowadzone w pierwszym eksperymencie pozwoliły na ocenę wpływu zawilgocenia kapilarnego na przewodność cieplną materiału. Wyniki badań uzyskane dla poszczególnych próbek przedstawiono na rysunku 3, zaś średnią dla wszystkich trzech próbek na rysunku 4.

Na podstawie uzyskanych danych wyznaczono równania linii prostych opisujących zależność przewodności cieplnej od zawilgocenia dla pojedynczych próbek oraz dla całkowitego zbioru wyników składowych.



Rys. 3. Wykresy zależności  $\lambda$  od wilgotności  $w$  uzyskane dla 3 próbek 12x12x24 cm pociętych na 6 próbek składowych o gr. 4 cm

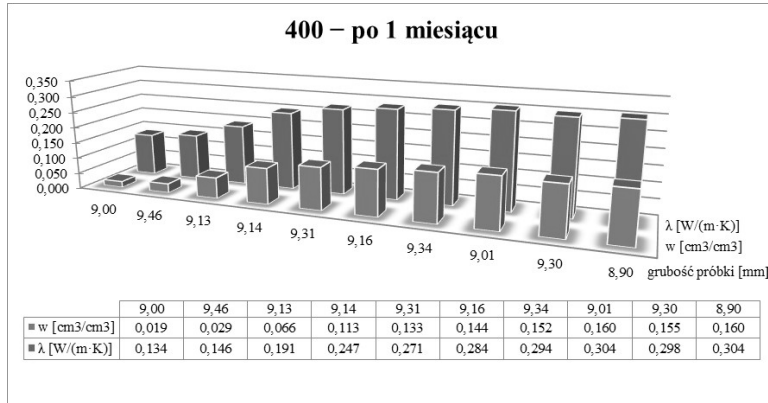
Fig. 3. Graphs illustrating dependence of  $\lambda$  on moisture  $w$ , achieved for the 3 samples 12x12x24 cm, cut into 6 component samples, 4cm wide each



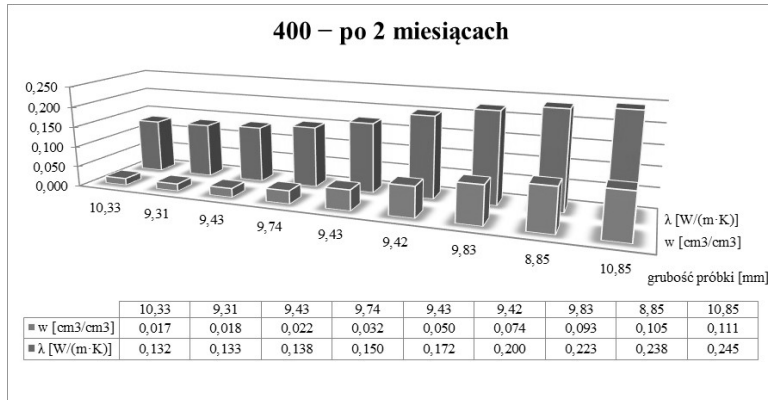
Rys. 4. Wykres zależności  $\lambda$  od wilgotności  $w$  uzyskany na bazie wszystkich wyników zestawionych na rys. 3.

Fig.4. Graph illustrating dependence of  $\lambda$  on moisture  $w$  achieved on the basis of compilation of all results gathered in Fig. 3

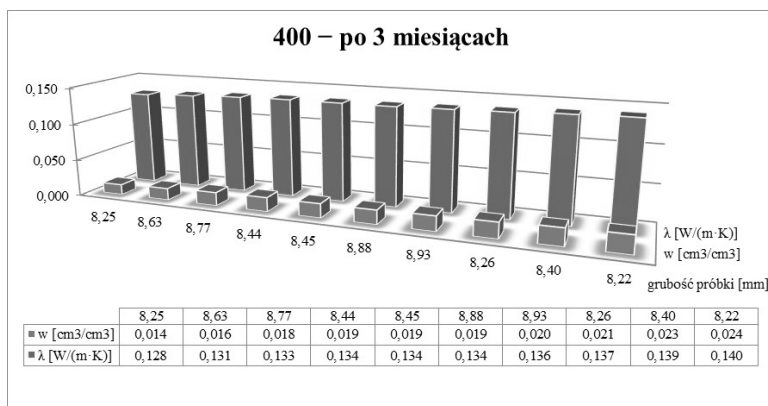
Na podstawie uzyskanej zależności wypadkowej, pokazanej na rysunku 4, obliczono współczynnik przewodzenia ciepła dla plastrów pociętych po 1, 2 i 3 miesięcznym procesie wysychania. Uzyskane wartości przedstawiono na rysunkach 5, 6 i 7.



Rys. 5. Zawartość wilgoci  $w$  i przewodność cieplna  $\lambda$  po 1-miesięcznym wysychaniu  
 Fig. 5. Moisture content  $w$  and thermal conductivity  $\lambda$  after 1 month period of drying



Rys. 6. Zawartość wilgoci  $w$  i przewodność cieplna  $\lambda$  po 2-miesięcznym wysychaniu  
 Fig. 6. Moisture content  $w$  and thermal conductivity  $\lambda$  after 2 month period of drying



Rys. 7. Zawartość wilgoci  $w$  i przewodność cieplna  $\lambda$  po 3-miesięcznym wysychaniu  
 Fig. 7. Moisture content  $w$  and thermal conductivity  $\lambda$  after 3 month period of drying

### 3. Podsumowanie

Wyniki uzyskane w przeprowadzonych badaniach pozwalają ocenić skalę zmian parametrów cieplnych, wywołanych po pierwsze działaniem ciekłej wody rozprzestrzeniającej się w obrębie przegrody, a po drugie zachodzących w trakcie postępującego procesu wysychania. Proste obliczenia pozwalają stwierdzić, że sucha ściana wykonana z badanego betonu komórkowego 400 kg/cm<sup>3</sup> o współczynniku  $\lambda = 0,11$  W/(m·K), spełni aktualne wymagania [4] dotyczące wartości granicznej współczynnika przenikania ciepła  $U = 0,25$  W/(m<sup>2</sup>·K) – przy grubości minimalnej wynoszącej 42 cm. Ta sama przegroda w stanie nasycenia wodą, tj. przy współczynniku  $\lambda$  rzędu 0,30 W/(m·K), będzie cechowała się współczynnikiem  $U = 0,64$  W/(m<sup>2</sup>·K), czyli wykaże 2,5-krotne przekroczenie dopuszczalnej wartości  $U_{C(max)}$ .

Aby przegrody z wysychającego betonu komórkowego 400 kg/cm<sup>3</sup>, o parametrach zaprezentowanych na rysunkach 5, 6 i 7, spełniły wymagania [4] musiałyby mieć odpowiednio grubość: ok. 95 cm – przy średnim  $\lambda \approx 0,247$  W/(m·K), ok. 70 cm – przy średnim  $\lambda \approx 0,181$  W/(m·K) oraz około 52 cm – przy średnim  $\lambda \approx 0,135$  W/(m·K).

Zrealizowane badania dowodzą silnego zróżnicowania w rozkładzie badanych wielkości fizycznych ( $\lambda$  oraz  $w$ ) zarówno po miesięcznym, jak i dwumiesięcznym okresie wysychania oraz powrót do stanu zbliżonego do wyjściowego pod względem wilgotnościowym i cieplnym po upływie przynajmniej 3-miesięcznego okresu wysychania.

### Literatura

- [1] Garbalińska H., Siwińska A.: Badania wpływu zawilgocenia materiałów ściennych na ich współczynnik przewodzenia ciepła, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 11/2011, s. 611-614.
- [2] Garbalińska H., Siwińska A.: Warunki pomiaru a wartość współczynnika przewodzenia ciepła, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Kwartalnik – Zeszyt 57, nr 4/2010, Rzeszów 2010*, s. 161-166.
- [3] Ickiewicz I., Sarosiek W., Ickiewicz J.: *Fizyka budowli. Wybrane zagadnienia, Dział Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej, Białystok 2000*.
- [4] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. *Dz.U. 2013 poz. 926*.
- [5] Siwińska A.: Związek między izotermą sorpcji a współczynnikiem przewodzenia ciepła porowatego materiału budowlanego, praca doktorska, Politechnika Szczecińska, Szczecin, 2008.
- [6] Siwińska A., Garbalińska H.: Thermal conductivity coefficient of cement-based mortars as air relative humidity function, *Heat and Mass Transfer 47, Springer-Verlag 9/2011*, s. 1077-1087.

- [7] Siwińska A., Garbalińska H.: Zależność współczynnika przewodzenia ciepła betonu komórkowego od warunków wilgotnościowych, *Inżynieria i Budownictwo*, nr 5/2009, s. 283-285.
- [8] Siwińska A., Garbalińska H.: Wpływ zawilgocenia na przewodność cieplną materiałów budowlanych. *Polsko-Niemieckie Seminarium Naukowe Katedry Dróg, Mostów i Materiałów Budowlanych oraz Hochschule Neubrandenburg, Szczecin 2006*, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, s. 121-129.
- [9] Suchorab Z., Barnat-Hunek D.: Analiza przewodności cieplnej przegród z betonu komórkowego w zależności od zmian wilgotności, *Budownictwo i Architektura* 8 (2011), s. 107-116.
- [10] Trochonowicz M., Witek B., Chwiej M.: Analiza wpływu wilgotności i temperatury powietrza na wartość współczynnika przewodności cieplnej  $\lambda$  materiałów termoizolacyjnych stosowanych wewnątrz pomieszczeń, *Budownictwo i Architektura* 12(4) (2013), s. 165-176.
- [11] Trochonowicz M.: Wilgoć w obiektach budowlanych. Problematyka badań wilgotnościowych, *Budownictwo i Architektura* 7 (2010), s. 131-144.

## POST FLOOD DRYING OF PARTITION WALLS MADE OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE AND THE CHANGES IN THERMAL CONDUCTIVITY

### Summary

This paper presents the results of two multistage experiments which were conducted on the samples of aerated concrete of density class 400 kg/m<sup>3</sup>. In the both experiments the samples were initially exposed to a strong effect of liquid water. Next the first experiment, thermal parameters were measured and in the other, the samples were dried in laboratory conditions, i.e. at the temperature of approximately 20°C and at the relative humidity of approximately 30%. The main goal of the study was to determine the coefficient of thermal conductivity  $\lambda$  for the samples of various degree of moisture, and to establish a function that characterises the dependence of  $\lambda$  on a degree of the material moisture  $w$ . Next, the changes taking place in the thermal parameters of the aerated concrete that was drying out of post flood moisture were recreated by use of a function  $\lambda = f(w)$ . The variables of moisture distribution and thermal conductivity across the width of wall were reconstructed at three time points – after 1, 2 and finally 3 months of drying process. A strong diversity of the tested physical quantities' distribution ( $\lambda$  and  $w$ ) was recognised after amonth, and also after two months of drying period, as well as a return to acceptable moisture and thermal condition was noted after the third month of drying process. The achieved results confirm the unquestionable necessity of considering the circumstances related to moisture condition of the partitions during preparation of building's energy rate balance sheets, as the capillary processes can deteriorate dramatically thermal parameters of the partitions for a long period of time due to the fact that drying process lasts for several months even at favourable external conditions.

**Keywords:** autoclaved aerated concrete, capillary transport, thermal conductivity, moisture

DOI:10.7862/rb.2014.83

*Przesłano do redakcji: 01.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Halina GARBALIŃSKA<sup>1</sup>  
Linda CEDERHOLM<sup>2</sup>

## WSPÓŁCZYNNIK SORPCJI BETONU KOMÓRKOWEGO BADANY NA PRÓBKACH SUSZONYCH I NIESUSZONYCH

W niniejszym artykule zaprezentowano wyniki pomiarów współczynnika sorpcji kapilarnej betonu komórkowego czterech klas gęstości: 400, 500, 600 i 700. Badania przeprowadzono na próbkach o wymiarach  $\approx 12 \times 12 \times 24$  cm. Z każdej klasy gęstości przygotowywano do badań dwie grupy próbek różniące się stanem wilgotnościowym. Połowę próbek poddawano suszeniu do stałej masy. Drugą połowę badano w stanie naturalnej wilgotności, odpowiadającej warunkom powietrzno-suchym. Celem było sprawdzenie, czy stan wilgotnościowy materiału i sam proces suszenia próbek w temperaturze  $105^{\circ}\text{C}$  wpływa znacząco na przebieg procesu podciągania kapilarnego. Dla każdej klasy gęstości opracowano wykresy zbiorcze obrazujące tempo wchłaniania wody przez próbki suszone i niesuszone. Następnie wyznaczono wartości współczynników sorpcji badanych betonów komórkowych – w rozbiciu na dwie grupy próbek – suszone i niesuszone. Wyniki uzyskane dla czterech najbardziej popularnych klas gęstości betonów komórkowych dowodzą braku istotnego wpływu wstępnego suszenia na wartości ich współczynników sorpcji kapilarnej. Obserwuje się wprawdzie pewne zróżnicowanie wyników, ale bez jednoznacznych tendencji. W przypadku betonów komórkowych klasy 600 oraz 400 szybsze tempo procesu odnotowano w przypadku próbek niesuszonych, ale przy betonie klasy 700 większą dynamiką procesu odznaczały się próbki suszone. Natomiast w przypadku betonu komórkowego klasy 500 proces podciągania kapilarnego charakteryzował się zbliżonym przebiegiem w obydwu grupach próbek. Nie znaczy to, że w przypadku innych materiałów porowatych nieumiejętne suszenie w wysokich temperaturach nie spowoduje istotnych defektów w ich strukturze porowatości, a co za tym idzie nie doprowadzi do wyraźnej zmiany ich współczynników transportu. Jednak w przypadku betonów komórkowych można uznać, że brak jest przesłanek do prowadzenia suszenia próbek przeznaczonych do praktycznego wykorzystania w badaniach kapilarności.

**Słowa kluczowe:** beton komórkowy, podciąganie kapilarne, współczynnik sorpcji kapilarnej, próbki suszone, próbki niesuszone

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Halina Garbalińska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, 91-449-48-29, Halina.Garbalinska@zut.edu.pl

<sup>2</sup> Studentka Linda Cederholm, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, 91-449-48-29, cederholm\_linda@zut.edu.pl



## 1. Wstęp

Współcześnie wznoszone budynki muszą spełniać określone wymagania, które z upływem czasu stawały się coraz bardziej restrykcyjne. W związku z wprowadzaniem przez rozporządzenie [4] nowych ograniczeń dotyczących współczynnika przenikania ciepła  $U$  przegród budowlanych, projektanci zmuszeni są poszukiwać coraz to lepszych rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych. Od 1 stycznia 2014 roku ściany zewnętrzne muszą odznaczać się współczynnikiem  $U$  nieprzekraczającym wartości granicznej  $0,25 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , a w kolejnych latach wartości  $0,23 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$  oraz  $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\text{K})$ , począwszy od 1 stycznia 2021 roku. Materiałem chętnie stosowanym do wznoszenia ścian zewnętrznych był i niewątpliwie pozostanie beton komórkowy, który w stosunkowo dobry sposób spełnia wymagania dotyczące zarówno nośności, jak i izolacyjności. W przypadku większości materiałów wymagania te uznawane są za przeciwstawne. Beton komórkowy dzięki specyficznej strukturze szkieletu i znacznej porowatości niezłe godzi obydwie zadania. Jednak jego silnie porowata struktura stwarza niebezpieczeństwo wyraźnego pogorszenia obydwu tych parametrów w wyniku zawilgocenia. Szczególnie destrukcyjny jest kontakt z ciekłą wodą, która w łatwy i szybki sposób wnika w dostępną sieć porów kapilarnych.

Istnieje wiele okoliczności, w których materiał ścienny narażony jest na działanie ciekłej wody. Może to być efekt kondensacji powierzchniowej lub wgłębnej, może to być skutek opadów atmosferycznych, działania wód gruntowych, czy w skrajnym przypadku wód powodziowych lub awarii instalacji wodno-kanalizacyjnej. Woda transportowana wówczas przez kapilary może rozprzestrzeniać się z dużą intensywnością, zależną od struktury porowatości materiałów użytych do wzniesienia przegrody. Jednoznaczną informację, mówiącą o tempie rozprzestrzeniania się wody w obrębie danego materiału, daje nam parametr zwany współczynnikiem sorpcji kapilarnej, szerzej opisany w [2]. Ponieważ beton komórkowy stanowi materiał wykorzystywany do budowy przegród jednowarstwowych, problem podciągania kapilarnego w tym przypadku staje się szczególnie istotny.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki badań kapilarnego podciągania wody dla betonu komórkowego o czterech klasach gęstości, pochodzących od tego samego producenta. Badania przeprowadzono na dwóch grupach próbek, przy czym połowa próbek przed podciąganiem kapilarnym została poddana procesowi suszenia w suszarce, natomiast druga połowa została poddana procesowi podciągania kapilarnego w stanie powietrzno-suchym. Uzyskane wyniki pozwoliły wyznaczyć współczynniki sorpcji kapilarnej popularnych betonów komórkowych, jak również ocenić, czy suszenie próbek betonu komórkowego wywiera wpływ na szybkość transportu wody w materiałach tego rodzaju. Pojawiają się bowiem zalecenia rekomendujące suszenie próbek przed rozpoczęciem pomiarów kapilarnych, ale równocześnie zgłaszane są wątpliwości, mówiące o destrukcyjnym oddziaływaniu wysokiej temperatury, na strukturę materiału, objawiającym się zwiększonym jej zarysowaniem.

## 2. Opis badań podciągania kapilarnego

### 2.1. Przygotowanie próbek do badań

Do badań wykorzystano próbki betonu komórkowego o wymiarach  $\approx 12 \times 12 \times 24$  cm, czterech klas gęstości: 400, 500, 600 oraz 700. Ponieważ celem prac badawczych było zdiagnozowanie, czy proces suszenia ma wpływ na współczynnik sorpcji kapilarnej, próbki betonów komórkowych podzielono na dwie grupy. W pierwszej grupie znalazło się 16 próbek (po 4 z każdej klasy gęstości), które przeznaczono do suszenia, natomiast pozostałe 16 przetrzymywano w warunkach laboratoryjnych w stanie powietrzno-suchym.

Zgodnie z założeniami, 16 próbek ułożono w suszarkach i suszono zgodnie ze schematem:

- przez początkowe 16h próbki umieszczone były w suszarkach, w których temperatura wynosiła  $40^{\circ}\text{C}$ ,
- między 17 a 27 h próbki zostały poddane działaniu temperatury utrzymywanej na poziomie  $70^{\circ}\text{C}$ ,
- od 28 h temperatura w suszarkach została ustawiona na  $105^{\circ}\text{C}$ .

Dziewiątego dnia, licząc od chwili rozpoczęcia suszenia, suszarki zostały wyłączone, a próbki po ostygnięciu zważone.

### 2.2. Przebieg badań

Zarówno próbki suszone jak i niesuszone ustawiono na rusztach z tworzywa sztucznego, ułożonych na dnie kuwet z wodą destylowaną, w której każda próbka zanurzona była od spodu na głębokość około 2 mm. Wykorzystano 4 kuwety, przy czym w każdej z nich znajdowały się próbki danej klasy gęstości. Stanowisko badawcze współczynnika sorpcji kapilarnej zostało przygotowane, bazując na [1].

Badania podciągania kapilarnego wykonywane były przez okres 28 dni. Przez cały ten czas monitorowano poziom wody w kuwetach oraz regularnie ważono próbki, zgodnie z założonym schematem:

- przez pierwsze 8h podciągania kapilarnego próbki ważono co godzinę,
- następnie między 8 a 12h, próbki były ważone co 2h,
- kolejno między 12 a 96h próbki ważono co 12h,
- następnie zważono próbki po 24h,
- następnie między 120 a 216h próbki zważono dwukrotnie, co 48h,
- kolejno między 216 a 432h próbki ważono co 72h,
- próbki zważono także po kolejnych 96 oraz 120h,
- dodatkowo próbki zważono także 29 dnia.

Schemat ważenia został dopasowany do tempa przebiegu procesu – w początkowym stadium podciągania kapilarnego próbki szybko chłoną wodę, a wraz z upływem czasu proces ten staje się powolniejszy. Wazenie przeprowadzono wykorzystując wagę o dokładności 0,01 g.



Rys. 1. Stanowisko badawcze wykorzystane w pomiarach współczynników sorpcji kapilarnej

Fig. 1. Experimental setup used for measurements of capillary sorption coefficients

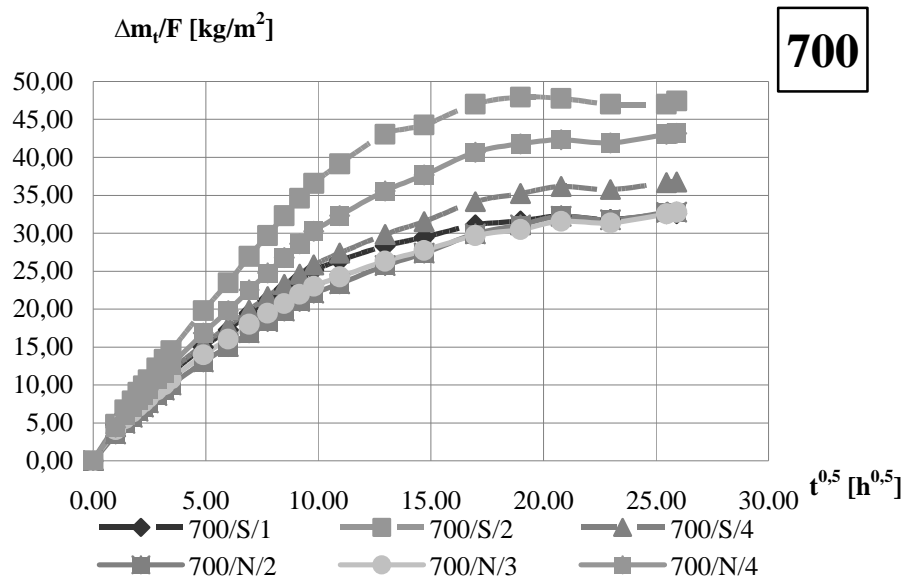
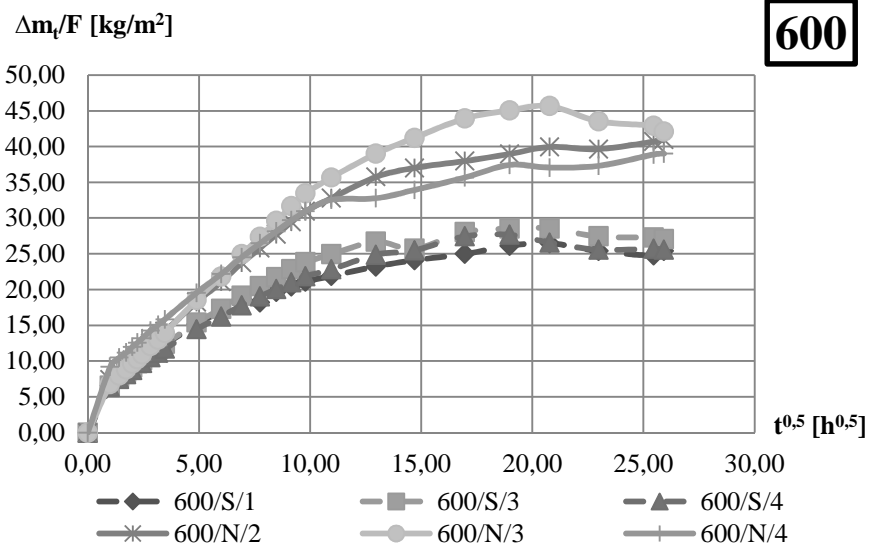
### 3. Wyniki uzyskane w badaniach podciągania kapilarnego

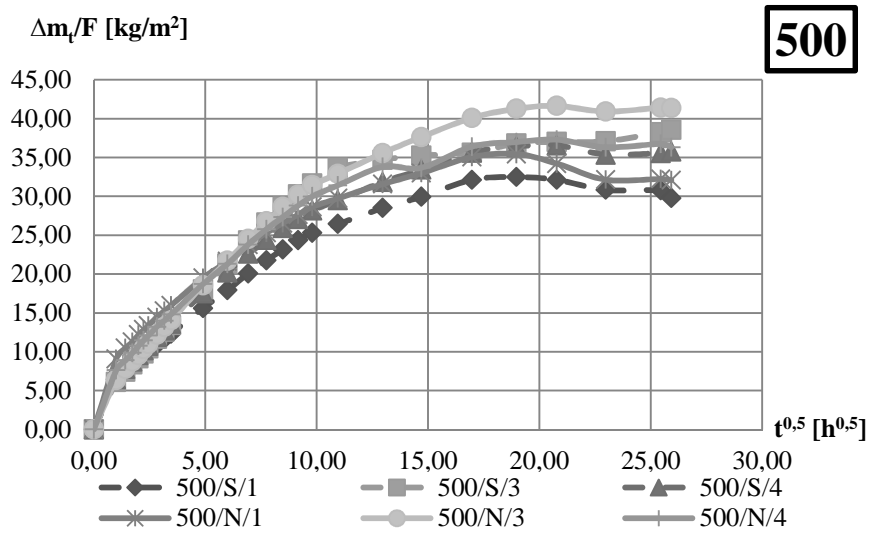
Przeprowadzone badania pozwoliły na wykonanie wykresów zmieniającej się masy próbek, odniesionej do pola powierzchni próbek mających kontakt z wodą, w funkcji pierwiastka z czasu. Zależności te przedstawiono na rysunkach 2 – 5 w postaci wykresów zbiorczych, z pominięciem tych pojedynczych próbek, których wyniki odbiegały w sposób najbardziej znaczący od pozostałych.

W przypadku każdej próbki wyznaczono współczynnik sorpcji kapilarnej z następującego wzoru, opierając się na [3]:

$$A = \frac{\Delta m_t}{F\Delta\sqrt{t}} \quad (1)$$

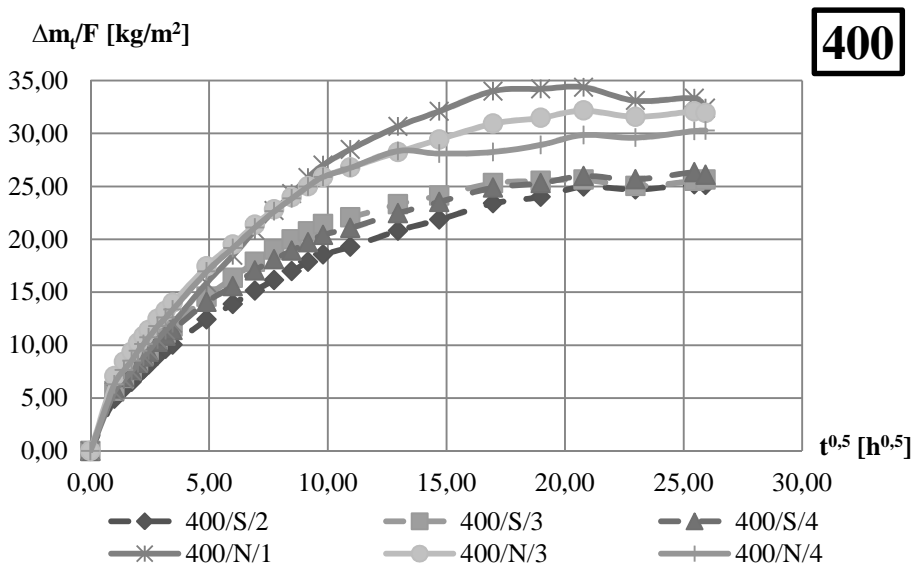
gdzie:  $A$  – współczynnik sorpcji, [kg/(m<sup>2</sup>h<sup>0,5</sup>)];  $\Delta m_t$  – przyrost masy próbki, [kg];  $F$  – powierzchnia ssania, [m<sup>2</sup>];  $\Delta\sqrt{t}$  – przyrost pierwiastka z czasu, [h<sup>0,5</sup>].

Rys. 2. Wykresy  $\Delta m_t/F$  w funkcji pierwiastka z czasu  $t^{0.5}$  próbek o gęstości  $g \approx 700 \text{ kg/m}^3$ Fig. 2. Graphs of  $\Delta m_t/F$  in the function  $t^{0.5}$  for samples of density  $g \approx 700 \text{ kg/m}^3$ Rys. 3. Wykresy  $\Delta m_t/F$  w funkcji pierwiastka z czasu  $t^{0.5}$  próbek o gęstości  $g \approx 600 \text{ kg/m}^3$ Fig. 3. Graphs of  $\Delta m_t/F$  in the function  $t^{0.5}$  for samples of density  $g \approx 600 \text{ kg/m}^3$



Rys. 4. Wykresy  $\Delta m_t/F$  w funkcji pierwiastka z czasu  $t^{0.5}$  próbek o gęstości  $g \approx 500 \text{ kg/m}^3$

Fig. 4. Graphs of  $\Delta m_t/F$  in the function  $t^{0.5}$  for samples of density  $g \approx 500 \text{ kg/m}^3$



Rys. 5. Wykresy  $\Delta m_t/F$  w funkcji pierwiastka z czasu  $t^{0.5}$  próbek o gęstości  $g \approx 400 \text{ kg/m}^3$

Fig. 5. Graphs of  $\Delta m_t/F$  in the function  $t^{0.5}$  for samples of density  $g \approx 400 \text{ kg/m}^3$

Uzyskane wyniki dotyczące współczynników A zaprezentowano w Tab. 1÷8.

Tablica 1. Dane dotyczące współczynnika sorpcji A suszonych próbek betonu komórkowego o gęstości  $\approx 700\text{kg/m}^3$  po odrzuceniu wyniku najbardziej odbiegającego od pozostałych

Table 1. Data concerning sorption coefficient A of the dried aerated concrete samples of density  $\approx 700\text{kg/m}^3$  after elimination of the result most differing from the other

Próbka	i	j	$R^2$	F [m <sup>2</sup> ]	$m_1/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$m_2/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$t_1^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	$t_2^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	A [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0.5</sup> )]
700/S/1	7	10	0,9987	0,0142	9,9676	25,1509	2,8284	9,7980	2,1785
700/S/2	2	14	0,9997	0,0143	7,9203	36,5916	1,7321	9,7980	3,5546
700/S/3	2	15	0,9998	0,0141	7,0603	41,7055	1,4142	9,7980	4,1324
700/S/4	7	9	0,9991	0,0142	10,1414	24,6235	2,8284	9,1652	2,2854
								Średnia	2,6728

Tablica 2. Dane dotyczące współczynnika sorpcji A niesuszonych próbek betonu komórkowego o gęstości  $\approx 700\text{kg/m}^3$  po odrzuceniu wyniku najbardziej odbiegającego od pozostałych

Table 2. Data concerning sorption coefficient A of the not dried aerated concrete samples of density  $\approx 700\text{kg/m}^3$  after elimination of the result most differing from the other

Próbka	i	j	$R^2$	F [m <sup>2</sup> ]	$m_1/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$m_2/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$t_1^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	$t_2^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	A [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0.5</sup> )]
700/N/1	2	10	0,9996	0,0137	6,0234	23,2929	1,4142	6,0000	3,7659
700/N/2	9	8	0,9992	0,0139	10,0036	22,0875	3,4641	9,7890	1,9105
700/N/3	9	8	0,9977	0,0144	10,7834	23,0125	3,3641	9,7980	1,9007
700/N/4	7	10	0,9997	0,0141	10,6867	30,2615	2,8284	9,7980	2,8086
								Średnia	2,2066

Tablica 3. Dane dotyczące współczynnika sorpcji A suszonych próbek betonu komórkowego o gęstości  $\approx 600\text{kg/m}^3$  po odrzuceniu wyniku najbardziej odbiegającego od pozostałych

Table 3. Data concerning sorption coefficient A of the dried aerated concrete samples of density  $\approx 600\text{kg/m}^3$  after elimination of the result most differing from the other

Próbka	i	j	$R^2$	F [m <sup>2</sup> ]	$m_1/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$m_2/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$t_1^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	$t_2^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	A [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0.5</sup> )]
600/S/1	2	9	0,9985	0,0141	7,6841	15,1798	1,4142	4,8990	2,1510
600/S/2	1	19	1,0000	0,0142	6,1483	30,166	1,0000	9,7980	2,7299
600/S/3	2	10	0,9977	0,0137	7,7442	17,3312	1,4142	6,0000	2,0906
600/S/4	6	9	0,9978	0,0143	9,7180	20,0854	2,4495	8,4853	1,7177
								Średnia	1,9864

Tablica 4. Dane dotyczące współczynnika sorpcji A niesuszonych próbek betonu komórkowego o gęstości  $\approx 600\text{kg/m}^3$  po odrzuceniu wyniku najbardziej odbiegającego od pozostałych

Table 4. Data concerning sorption coefficient A of the not dried aerated concrete samples of density  $\approx 600\text{kg/m}^3$  after elimination of the result most differing from the other

Próbka	i	j	$R^2$	F [m <sup>2</sup> ]	$m_1/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$m_2/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$t_1^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	$t_2^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	A [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0.5</sup> )]
600/N/1	2	9	0,9989	0,0137	6,0852	13,2179	1,4142	4,8990	2,0468
600/N/2	2	15	0,9997	0,0139	8,5878	30,9386	1,4142	9,7980	2,6660
600/N/3	2	15	0,9998	0,0139	7,9869	33,4391	1,4142	9,7980	3,0359
600/N/4	2	14	0,9995	0,0142	10,4721	29,6749	1,4142	9,1652	2,4775
								Średnia	2,7264

Tablica 5. Dane dotyczące współczynnika sorpcji A suszonych próbek betonu komórkowego o gęstości  $g \approx 500 \text{ kg/m}^3$  po odrzuceniu wyniku najbardziej odbiegającego od pozostałych

Table 5. Data concerning sorption coefficient A of the dried aerated concrete samples of density  $g \approx 500 \text{ kg/m}^3$  after elimination of the result most differing from the other

Próbka	i	j	$R^2$	F [m <sup>2</sup> ]	$m_1/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$m_2/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$t_1^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	$t_2^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	A [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0.5</sup> )]
500/S/1	2	12	0,9995	0,0145	7,5382	23,1741	1,4142	8,4853	2,2112
500/S/2	3	11	0,9994	0,0136	10,0081	39,0967	1,7321	7,7460	4,8369
500/S/3	4	12	0,9993	0,0148	9,1296	30,2296	2,0000	9,1652	2,9448
500/S/4	3	10	0,9995	0,0143	8,7386	22,6181	1,7321	6,9281	2,6712
								Średnia	2,6091

Tablica 6. Dane dotyczące współczynnika sorpcji A niesuszonych próbek betonu komórkowego o gęstości  $g \approx 500 \text{ kg/m}^3$  po odrzuceniu wyniku najbardziej odbiegającego od pozostałych

Table 6. Data concerning sorption coefficient A of the not dried aerated concrete samples of density  $g \approx 500 \text{ kg/m}^3$  after elimination of the result most differing from the other

Próbka	i	j	$R^2$	F [m <sup>2</sup> ]	$m_1/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$m_2/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$t_1^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	$t_2^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	A [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0.5</sup> )]
500/N/1	6	8	0,9983	0,0140	13,3925	25,293	2,4495	7,7460	2,2469
500/N/2	6	8	0,9984	0,0147	9,3619	18,9048	2,4495	7,7460	4,8017
500/N/3	2	13	0,9995	0,0145	7,7834	28,6167	1,4142	8,4853	2,9463
500/N/4	4	11	0,9992	0,0136	10,7450	27,3292	2,0000	8,4853	2,5572
								Średnia	2,5834

Tablica 7. Dane dotyczące współczynnika sorpcji A suszonych próbek betonu komórkowego o gęstości  $g \approx 400 \text{ kg/m}^3$  po odrzuceniu wyniku najbardziej odbiegającego od pozostałych

Table 7. Data concerning sorption coefficient A of the dried aerated concrete samples of density  $g \approx 400 \text{ kg/m}^3$  after elimination of the result most differing from the other

Próbka	i	j	$R^2$	F [m <sup>2</sup> ]	$m_1/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$m_2/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$t_1^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	$t_2^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	A [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0.5</sup> )]
400/S/1	5	8	0,9977	0,0141	10,1850	20,6591	2,2361	6,9282	2,2323
400/S/2	8	8	0,9966	0,0141	9,6346	17,8761	3,1623	9,1652	1,3729
400/S/3	7	8	0,9957	0,0136	10,4860	19,9786	2,8284	8,8453	1,5777
400/S/4	7	8	0,9954	0,0143	10,3068	18,9358	2,8284	8,4853	1,5254
								Średnia	1,4920

Tablica 8. Dane dotyczące współczynnika sorpcji A niesuszonych próbek betonu komórkowego o gęstości  $g \approx 400 \text{ kg/m}^3$  po odrzuceniu wyniku najbardziej odbiegającego od pozostałych

Table 8. Data concerning sorption coefficient A of the not dried aerated concrete samples of density  $g \approx 400 \text{ kg/m}^3$  after elimination of the result most differing from the other

Próbka	i	j	$R^2$	F [m <sup>2</sup> ]	$m_1/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$m_2/F$ [kg/m <sup>2</sup> ]	$t_1^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	$t_2^{0.5}$ [h <sup>0.5</sup> ]	A [kg/(m <sup>2</sup> h <sup>0.5</sup> )]
400/N/1	1	14	0,9993	0,0140	5,5665	24,306	1,0000	8,4853	2,5035
400/N/2	7	8	0,9961	0,0143	9,0386	17,0000	2,8284	8,4853	1,4074
400/N/3	5	8	0,9971	0,0140	10,854	21,3889	2,2361	6,9282	2,2452
400/N/4	7	8	0,9964	0,0140	11,8044	23,8589	2,8284	8,4853	2,1309
								Średnia	2,2932

Współczynnik sorpcji wyznaczano przyjmując minimalnie 8 punktów pomiarowych („j” – ilość punktów pomiarowych) i odrzucając określoną ilość „i” punktów pomiarowych wyraźniej odstających od prostej dopasowanej w jak najlepszym stopniu ( $R^2$  – stopień dopasowania prostej) do wykresów.

#### 4. Podsumowanie

Przeprowadzone badania potwierdzają słuszność przyjętych założeń teoretycznych, na bazie których sformułowano wzór (1). Zauważa się w przypadku każdego z badanych betonów komórkowych, że zależność między przyrostem masy próbek a pierwiastkiem z czasu podczas pierwszych godzin trwania procesu podciągania kapilarnego jest liniowa. Pojawiające się pojedyncze wyniki, odstające od liniowej zależności, mogą być wywołane błędami związanymi z warunkami prowadzenia pomiarów, np. niekontrolowanymi zmianami ciepłno-wilgotnościowymi, niedokładnościami geometrycznymi próbek, niejednorodnością materiałową próbek, obecnością wypieranych pęcherzy powietrza itp. Niezależnie od tego należy zaznaczyć, że przyjęty szeroki zakres czasowy rejestrowania procesu podciągania kapilarnego zapewnił możliwość wyznaczenia współczynnika sorpcji kapilarnej w przypadku każdej klasy gęstości.

Analiza uzyskanych wykresów wykazuje, iż suszenie nie wywarło jednoznacznego wpływu na tempo wchłaniania wody w poszczególnych betonach komórkowych. W przypadku betonu o gęstości  $700 \text{ kg/m}^3$  współczynnik sorpcji kapilarnej  $A$  uzyskuje wyższą wartość w badaniach próbek suszonych:  $A(S)/A(N) = 1,21$ . Jednakże w przypadku betonów o gęstości  $600 \text{ kg/m}^3$  oraz  $400 \text{ kg/m}^3$  odnotowuje się tendencję odwrotną – niższą wartość uzyskiwaną na próbkach suszonych – przy klasie 600:  $A(S)/A(N) = 0,73$ , przy klasie 400:  $A(S)/A(N) = 0,65$ . Z kolei w betonie klasy 500 parametr ten wykazuje zbliżone wartości, zupełnie niezależne od sposobu przygotowania próbek do badań:  $A(S)/A(N) = 1,01$ .

Przeprowadzone pomiary nie potwierdzają sygnalizowanego w literaturze destrukcyjnego wpływu suszenia próbek w wysokiej temperaturze ( $105^\circ\text{C}$ ), objawiającego się dodatkowym porysowaniem struktury wewnętrznej i w następstwie skutkującego jednoznacznym wzrostem wartości parametrów opisujących transport wody. Taką tendencję zaobserwowano jedynie w przypadku betonu klasy 700 – przy wzroście współczynnika  $A$  rzędu 20%. Oczywiście nie jest powiedziane, że w przypadku innych materiałów porowatych tego typu obciążenia temperaturowe nie zaskutkują ewidentnymi zmianami w strukturze porowatości oraz wyznaczanych w pomiarach współczynnikach transportu masy. Jednak w przypadku betonów komórkowych tego typu jednoznacznych efektów nie odnotowano.

#### Literatura

- [1] Bochenek M., Garbalińska H.: Zmiana parametrów cieplnych betonu komórkowego wywołane zawilgoceniem przegrody, XIV Polska Konferencja Naukowo-Techniczna Fizyka Budowli w Teorii i Praktyce, Łódź-Słok 2013, s. 9-12.
- [2] Garbalińska H.: Izotermiczne współczynniki transportu wilgoci porowatego materiału budowlanego, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2002.



- [3] Garbalińska H., Wygocka A.: Badania współczynnika sorpcji kapilarnej modyfikowanych zapraw cementowych, *Inżynieria i Budownictwo*, Nr 5/2011, s. 276-278.
- [4] Rozporządzenie Ministra Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej z dnia 5 lipca 2013 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.

## **SORPTION COEFFICIENT OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE EXAMINED ON DRIED AND NOT DRIED SAMPLES**

### **S u m m a r y**

The paper presents results of measurements of capillary sorption coefficient in four density classes of aerated concrete: 400, 500, 600 and 700. The tests were performed on samples of the following dimensions: 12x12x24 cm. Two groups of samples were prepared from each of the four density classes. A half of the samples were dried up to reaching constant weight. The other half were researched at the state of natural moisture referring to air-dry conditions. The aim here was to check whether the level of moisture in the material and the very process of samples drying in the temperature of 105°C can considerably influence the process of capillarity. Comparative graphs were prepared for each density class to show the pace of water sorption in dried and not dried samples. Values of sorption coefficients of the researched aerated concretes were then calculated for the two groups of samples – the dried and not dried ones. The results obtained for the four most common density classes of aerated concrete show no considerable influence of pre-drying on their capillary sorption coefficients. As a matter of fact, there appears to be certain diversification of results but with no clear tendencies. In case of aerated concretes of 600 and 400 class, faster pace of the process was noted for not dried samples. However, for 700 class concrete the dried samples showed higher dynamics of the process. What regards 500 class aerated concrete, capillary flow process was characterized by similar runs for the both groups of samples. However, in case of other porous materials, wrong drying procedures may lead to considerable defects in their porosity structure, which in turn may result in change of their transport coefficients. We can conclude that in case of aerated concretes there is no indication for drying of samples in practical application concerning research on capillarity.

**Keywords:** autoclaved aerated concrete, capillarity, sorption coefficient, dried samples, not dried samples

DOI:10.7862/rb.2014.84

*Przesłano do redakcji: 01.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Wojciech GORYL<sup>1</sup>  
Adam GUŁA<sup>2</sup>

## ANALIZA POTENCJAŁU BIOMASY ROLNICZEJ NA PRZYKŁADZIE TYPOWEJ GMINY W CELU STWORZENIA LOKALNEGO RYNKU BIOMASY

W pracy przedstawione jest oszacowanie energetycznego potencjału słomy, która może być wykorzystana do produkcji ciepła na terenach wiejskich. Analiza została przeprowadzona na przykładzie typowej, rolniczej gminy Brzeźnica w województwie lubuskim. W tym celu przeprowadzono ankietę wśród 64 rolników. Na podstawie zebranych informacji oszacowano dostępny potencjał słomy, którą będzie można wykorzystać do ogrzewania budynków mieszkalnych, samorządowych, lub gospodarczych. Dodatkowo, zebrano informacje o liczbie gospodarstw, w których rolnicy są gotowi zainstalować kocioł na biomasę lub zdecydowaliby się na taką inwestycję przy odpowiednim wsparciu finansowym z funduszy zewnętrznych. Jednocześnie rolnicy ci określili wysokość wsparcia, przy którym mogliby podjąć się takiej inwestycji. Wyniki ankiet pokazują, iż gmina posiada duży potencjał słomy, który wystarczy do ogrzania kilkuset gospodarstw rolnych. Wyniki posłużą opracowaniu modelu organizacyjno-ekonomicznego wykorzystania lokalnej biomasy dla celów energetycznych. Będzie on miał na celu umożliwienie szerokiego zastosowania kotłów na lokalną (zwłaszcza własną) biomasę w warunkach polskich. Tematyka ta jest przedmiotem żywego zainteresowania w skali całej Polski, a także Unii Europejskiej. Podstawową barierą do stworzenia lokalnego rynku biomasy jest brak rozwiązań organizacyjno-prawnych, które umożliwiłyby w warunkach polskich możliwie pełne wykorzystanie lokalnych zasobów biomasy. Zasoby posiadane przez poszczególnych rolników różnią się bowiem co do wystarczalności; natomiast obiekty samorządowe z reguły swojej własnej biomasy nie posiadają. Należy zatem stworzyć system lokalnej wymiany biomasy; tj. handlu jej nadwyżkami.

**Słowa kluczowe:** biomasa, słoma, potencjał, spalanie, ciepło

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: mgr inż. Wojciech Goryl, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, oraz Stowarzyszenie The Krakow Institute for Sustainable Energy, ul. Kierzkowskiego 23, 30-433 Kraków, +48 12 617 34 28, wgoryl@agh.edu.pl.

<sup>2</sup> Prof. dr hab. Adam Guła, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Energetyki i Paliw, al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, oraz Stowarzyszenie The Krakow Institute for Sustainable Energy, ul. Kierzkowskiego 23, 30-433 Kraków, +48 12 617 34 28, gula@agh.edu.pl

## 1. Wstęp

Obecnie, w Unii Europejskiej udział energii ze źródeł odnawialnych w całkowitym bilansie produkcji energii wzrasta z roku na rok. Wstępnie podyktowane było to Dyrektywą 2001/77/EC, dot. produkcji energii elektrycznej z OZE. Następnie, zastąpiono ją Dyrektywą 2009/28/WE promującą nie tylko energię elektryczną, lecz także produkcję ciepła ze źródeł odnawialnych. Polska po wejściu do Unii Europejskiej zaczęła wypełniać zobowiązania Dyrektywy 2001/77/EC. Niestety, mimo wejścia w życie nowej Dyrektywy w roku 2009 (2009/28/WE) Polska podąża nadal starając się wypełnić zobowiązania Dyrektywy już nie obowiązującej, zwłaszcza drogą współspalania biomasy z węglem. Wskutek tego od roku 2004 widzimy gwałtowny wzrost zużycia biomasy do produkcji energii elektrycznej, co jest powszechnie krytykowane przez naukowców i ekspertów [8;10;11]. Do roku 2012 był to wzrost dwunastokrotny [4]. Pociąga to szereg problemów ekologicznych, ekonomicznych, transportowych i fitosanitarnych [10;11]. Ogromne zapotrzebowanie na biomasę przez zawodowe elektrownie węglowe spowodowało drastyczny wzrost jej cen. W Polsce największy potencjał biomasy rolniczej posiada słoma [1], dlatego jej cena pomiędzy rokiem 2005 a 2012 wzrosła niemal dwukrotnie, osiągając ponad 300 zł/t [6].

Słoma charakteryzuje się niską gęstością usypową (ok. 10 razy mniejszą od węgla) oraz mniejszą wartością opałową wynoszącą przeciętnie 14-15 MJ/kg. Dodatkowo, jest to dość problematyczne paliwo ze względu na niejednorodność materiału. Przydatność energetyczna słomy zależy od wilgotności, składu chemicznego oraz rodzaju słomy [14]. Słoma żółta (zbierana zaraz za kombajnem) charakteryzuje się wysoką wilgotnością, nierzadko przekraczającą 20% oraz niższą wartością opałową. Słoma szara (pozostawiona na polu przez kilka dni po omłocie i przepłukana przez deszcz) wykazuje znacznie lepsze właściwości energetyczne. Spowodowane jest to wypłukiwaniem niepalnych związków mineralnych znajdujących się w słomie. Skład chemiczny słomy zależy od warunków klimatycznych, glebowych jak również nawożenia, oprysków, itp. Słomę jęczmienną bardzo rzadko wykorzystuje się na cele energetyczne z powodu niskiej temperatury topnienia popiołu, co powoduje nadmierne oblepianie części wewnętrznych kotła. Zalecana wilgotność paliwa wykorzystywanego do spalania w kotłach na słomę wynosi ok. 10-20%.

Z powodu kryzysu energetycznego w latach 70-tych słomę zaczęto wykorzystywać na coraz większą skalę, głównie w Danii. Kraj ten jest prekursorem energetycznego wykorzystania słomy. Pierwsze kotły na słomę charakteryzowały się bardzo słabymi warunkami pracy, niską sprawnością (30-40%) oraz dużą emisją tlenu węgla (powyżej 10 000 ppm w spalinach). Następnie w latach 80-tych XX wieku ulepszono konstrukcję kotłów i osiągnięto sprawności spalania w granicach 75%. W latach 90-tych rząd duński wprowadził dotacje na zakup kotłów na słomę, co spowodowało kolejny rozwój technik spalania tego paliwa.

Na początku XXI wieku osiągnięto sprawności spalania na poziomie 87% oraz zawartość CO w spalinach poniżej 1 000 ppm [13].

Polska posiada duże zasoby biomasy w postaci słomy poźniwej. Ocenia się, że roczna produkcja słomy wynosi ok. 20 mln ton [5] z czego potencjał techniczny pozyskania słomy na cele energetyczne wynosi ok. 7 mln ton [3]. Z roku na rok potencjał ten będzie wzrastać z powodu zmniejszania się pogłowa zwierząt hodowlanych [15], co spowoduje mniejsze zapotrzebowanie na słomę na cele paszowe oraz ściótkowe. Tak duże nadwyżki słomy powodują, że coraz częściej można spotkać się z wykorzystaniem słomy na cele grzewcze przez rolników, w budynkach użyteczności publicznej, gdzie dobrym przykładem jest Gmina Człuchów, w której w czterech szkołach wykorzystuje się słomę do ogrzewania budynków. Słoma jest wykorzystywana także w ogrzewaniu sieciowym w miastach, jak np. w Lubaniu w województwie dolnośląskim.

## **2. Analiza potencjału biomasy**

### **2.1. Cel pracy**

Model organizacyjno-ekonomiczny lokalnego wykorzystania biomasy ma na celu umożliwienie szerokiego zastosowania kotłów na lokalną (lub wręcz własną) biomasę w warunkach polskich. Tematyka ta jest przedmiotem żywego zainteresowania w całej Polsce, a także Unii Europejskiej, zwłaszcza w aspekcie wsparcia rozwoju obszarów wiejskich i ochrony klimatu.

Jeżeli – jak argumentują naukowcy i eksperci, biomasa powinna być wykorzystywana energetycznie głównie w skali lokalnej, to odpowiednie decyzje powinny zapadać na szczeblu możliwie podstawowym, poczynając od gminy. Oczywiście decyzje te powinny być wspierane i koordynowane na szczeblu powiatu, województwa i całego kraju.

W celu opracowania modelu rynku biomasy na zadanym terenie przy warunku brzegowym ograniczonej dostępności wolumenu biomasy zbadano potencjał praktycznie dostępnej dla celów energetycznych biomasy na wybranym terenie, jakim jest typowa rolnicza gmina. Przykładem jest gmina Brzeźnica, powiat żagański, województwo lubuskie. W tym celu przeprowadzono ankietę wśród 64 rolników na badanym terenie. Na podstawie zebranych informacji oszacowano dostępny potencjał słomy, którą będzie można wykorzystać do ogrzewania budynków mieszkalnych, samorządowych, czy też gospodarczych. Dodatkowo, zebrano informacje o liczbie gospodarstw, w których rolnicy są gotowi zainstalować kocioł na biomasę lub zdecydowałiby się na taką inwestycję przy odpowiednim wsparciu finansowym z funduszy zewnętrznych. Jednocześnie rolnicy ci określili wysokość wsparcia, przy którym mogliby podjąć się takiej inwestycji.

Podstawową barierą do stworzenia lokalnego rynku biomasy jest brak rozwiązań organizacyjno-prawnych, które umożliwiłyby w warunkach polskich

możliwie pełne wykorzystanie lokalnych zasobów biomasy. Zasoby posiadane przez poszczególnych rolników różnią się bowiem co do wystarczalności; natomiast obiekty samorządowe z reguły swojej własnej biomasy nie posiadają. Należy zatem stworzyć system lokalnej wymiany biomasy; tj. handlu jej nadwyżkami (stworzenie lokalnego rynku biomasy).

## 2.2. Wyniki badań

Badania obejmowały 64 właścicieli gospodarstw rolnych znajdujących się w gminie Brzeźnica, w skład której wchodzi 9 sołectw (Brzeźnica, Chotków, Jabłonów, Karczówka, Marcinów, Przyłaski, Stanów, Wichów i Wrzesiny). Dane potrzebne do określenia potencjału energetycznego biomasy, słomy zebrano za pomocą wywiadów.

Zebrane informacje dotyczyły roku gospodarczego 2012/2013. Przygotowany kwestionariusz ankietowy pozwolił na uzyskanie informacji dotyczących: powierzchni użytków rolnych, struktury zasiewów, powierzchni użytków zielonych, obsady inwentarza żywego, wykorzystania słomy (nawóz, ściółka, pasza, sprzedaż, cele energetyczne), nośnika energii i kosztów ogrzewania budynków mieszkalnych, oraz możliwości zainstalowania kotła biomasowego na słomę.

Badane gospodarstwa podzielono na III grupy obszarowe:

- grupa I – od 1 ha do 8 ha (17 gospodarstw),
- grupa II – powyżej 8 ha do 15 ha (11 gospodarstw),
- grupa III – powyżej 15 ha (36 gospodarstw).

Gospodarstwa w grupie I, są to gospodarstwa, w których po instalacji kotła biomasowego występowałby niedobór słomy na cele grzewcze, grupa II jest to grupa gospodarstw samowystarczalnych pod względem energetycznym oraz grupa III, gdzie występowałaby nadwyżka słomy.

W literaturze potencjał słomy odniesiony do powierzchni pola wyznacza się przy pomocy wskaźnika stosunku plonu ziarna do plonu słomy, który wynosi 1:1,3 [2]. Jednakże, jak wskazują liczne badania wskaźnik ten jest znacznie mniejszy i w przeliczeniu na powierzchnię jednego hektara można uzyskać ok. 2-6 ton słomy z hektara [12]. Dla określenia dokładnego potencjału słomy dla badanego obszaru prowadzono statystykę pozyskiwanej słomy w typowym, średnim gospodarstwie rolnym znajdującym się na terenie rozważanej gminy. Wyniki pomiarów wykonanych w tym 8,5 hektarowym gospodarstwie rolnym o zróżnicowanej produkcji roślinnej przedstawia poniższa Tabela 1.

Tabela 1. Ilość zebranej słomy w typowym gospodarstwie rolnym na badanym terenie

Table 1. Straw yields in a typical rural holding in the considered area

	<b>Rok I</b>	<b>Rok II</b>	<b>Rok III</b>	<b>Średnia</b>
Ilość słomy [t]	15,3	25,6	20,4	20,4
Średnia ilość słomy [t/ha]	1,9	3,0	2,4	2,4

Jak pokazuje powyższa tabela, prezentująca wyniki z ostatnich trzech lat gospodarczych, średnia ilość możliwej do zebrania słomy z jednego hektara wynosi 2,4 tony. W dalszych obliczeniach wartość ta została przyjęta jako najbardziej reprezentatywna dla rozpatrywanego obszaru.

Powierzchnię użytków rolnych, z wyszczególnieniem gruntów ornych, powierzchni zbóż oraz trwałych użytków zielonych przedstawiono w Tabeli 2. Średnia powierzchnia użytków rolnych ogółem wyniosła 43,89 ha. Dla grupy I to 4,51 ha, dla grupy II - 11,33 ha, a dla grupy III - 72,43 ha. Średnia powierzchnia trwałych użytków zielonych ogółem wyniosła 3,35 ha (odpowiednio dla poszczególnych grup 1,30 ha, 2,22 ha i 4,67 ha).

Tabela 2. Średnia powierzchnia użytków rolnych na terenie gminy Brzeźnica w podziale na zagospodarowanie

Table 2. Average areas of agricultural land in the Brzeźnica Commune for different uses

Grupy obszarowe	Użytki rolne	Grunty orne	Zboża	Trwałe użytki zielone
	[ha/gospodarstwo]			
Grupa I	4,51	3,69	3,22	1,30
Grupa II	11,33	9,25	9,00	2,22
Grupa III	72,43	66,33	59,97	4,67
Ogółem	43,89	39,76	36,13	3,35

Słoma jest najczęściej używanym materiałem ściółkowym. Stosuje się ją w hodowli wszystkich zwierząt gospodarskich, zwłaszcza w gospodarstwach posiadających tradycyjne budynki inwentarskie. Ilość stosowanej ściółki jest różna i zależy od rodzaju zwierząt, jakości paszy oraz konstrukcji budynków. Roczne zapotrzebowanie na słomę zależy też od liczby dni przebywania zwierząt w pomieszczeniach. Rozdysponowanie słomy w badanych gospodarstwach pokazano w Tabeli 3.

Tabela 3. Rozdysponowanie słomy w ciągu roku

Table 3. Straw disposal during the year

Grupy obszarowe	Ściółka	Nawóz	Pasza	Sprzedaż	Wyk. energetyczne
	[t]				
Grupa I	35,5	68,4	2,4	26,4	0,0
Grupa II	99,6	72,0	0,0	12,0	20,4
Grupa III	1300,8	2262,0	0,0	1595,5	0,0
Ogółem	1435,9	2402,4	2,4	1633,9	20,4

W I grupie obszarowej najwięcej słomy wykorzystywano na nawożenie pól (68,4 t), następnie jako ściółka dla inwentarza żywego (35,5 t). Niewielka część (2,4 t) służyła do produkcji paszy dla bydła. Resztę słomy sprzedawano (26,4 t). Wynika z tego, że małe gospodarstwa (do 8ha) mają zbyt małą powierzchnię, aby hodowla zwierząt była opłacalna (mały odsetek gospodarstw zajmujących się hodowlą bydła czy też trzody chlewnej) lub brak możliwości sprzedaży słomy podmiotom skupującym z powodu niewielkiego arealu. Przekłada się to na niskie zużycie słomy w gospodarstwach pod ściółkę, jedynie 2,1 t słomy przypada na jedno gospodarstwo. Brak możliwości sprzedaży słomy powoduje konieczność jej przyorania (4,0 t słomy przypadające na gospodarstwo). Przy tym należy zauważyć, że przyoranie nadmiernej ilości słomy powoduje zwiększenie występowania chorób grzybowych zbóż.

W grupie II najczęściej wykorzystywano słomę pod ściółkę dla bydła i trzody chlewnej (99,6 t). Wynikało to głównie z faktu, iż w badanych gospodarstwach była wysoka obsada inwentarza żywego. Dominował w niej chów bydła i stosowano wyłącznie utrzymanie ściółkowe zwierząt. Kolejną pozycję zajmuje nawożenie pól na co przypada 72 tony słomy. Następnie, 20,4 t słomy przypada na wykorzystanie energetyczne, ogrzewanie jednego budynku mieszkalnego, w którym zainstalowany jest dedykowany kocioł biomasowy. Niewielka część słomy sprzedawana jest podmiotom skupującym (12,0 t).

Grupa III charakteryzuje się wysokim odsetkiem wykorzystania słomy do nawożenia pól 2262,0 tony. Następnie znajduje się sprzedaż (1633,9 t) oraz wykorzystanie pod ściółkę – 1300,8 tony.

Tabela 4 przedstawia koszty ogrzewania budynków mieszkalnych w poszczególnych grupach. W większości gospodarstw dla ogrzewania wykorzystuje się drewno oraz węgiel brunatny bądź kamienny. Drewno kupowane jest w Nadleśnictwie, podczas gdy węgiel w lokalnych składach opału.

Tabela 4. Średnie koszty ogrzewania budynków mieszkalnych w gminie Brzeźnica.

Table 4. Average cost of heating of holdings in the Brzeźnica Commune

Grupa obszarowa	Koszty ogrzewania [zł]
Grupa I	2 647
Grupa II	2 591
Grupa III	2 681
Ogółem	2 656

Powyższa tabela pokazuje, iż w każdej grupie obszarowej koszty ogrzewania nie odbiegają znacznie od siebie. Jedynie w grupie II koszty te są najniższe. Wynika to z uwzględnienia gospodarstwa, które wykorzystuje słomę do ogrzewania domu, która to jest odpadem poźniwnym i koszty jej pozyskania są zerowe. Bez uwzględniania tego gospodarstwa koszty w grupie II wzrastają do 2 850 zł, co ogółem daje 2 698 zł na gospodarstwo rocznie.

Spośród rozpatrywanej grupy 64 gospodarstw, 22 byłyby skłonne zainstalować dedykowane kotły na słomę w swoich gospodarstwach do ogrzewania budynków mieszkalnych. Jednakże, koszt takiej instalacji przekracza możliwości finansowe większości rolników. Całkowity koszt instalacji kotła biomasowego w typowym gospodarstwie rolnym wynosi ok. 20 000 zł [8]. Przy odpowiednim wsparciu finansowym większość gospodarzy byłoby skłonnych zainwestować w takiego typu urządzenie. Już przy wsparciu wynoszącym średnio 45% grupa ta powiększyłaby się do 49 gospodarstw. Stanowi to 76% gospodarstw ogółem poddanych ankietyzacji. Przy czym należy podkreślić, że wsparcie, o którym mowa, miałoby charakter jednorazowy, w odróżnieniu od wsparcia energii elektrycznej, gdzie subsydiowana jest także każda megawatogodzina wyprodukowana z biomasy.

W 20% gospodarstw poruszono sprawę braku słomy, którą należałoby spalać w zainstalowanym kotle biomasowym. Widać, iż konieczne jest opracowanie i wdrożenie dobrze funkcjonującego rynku (wymiany) biomasy na rozpatrywanym terenie. Rolnicy posiadający nadwyżki słomy (grupa obszarowa III) mogliby sprzedawać słomę gospodarstwom z grupy I czy II, oraz podmiotom nie posiadającym słomy, tj. samorządom do ogrzewania szkół, ośrodków zdrowia, budynków gminy. Wdrożenie powyższego modelu pomoże Polsce wypełnić zobowiązania unijne poprzez zastąpienie węgla biomasą po nieporównywalnie niższych kosztach w stosunku do kosztów produkcji energii elektrycznej z tej samej ilości biomasy [11].



### 3. Wnioski

Przy uwzględnieniu, że typowe gospodarstwo rolne potrzebuje średnio ok. 15 ton słomy na jeden sezon grzewczy. Słoma, która jest obecnie sprzedawana w grupie III wystarczyłaby do zaspokojenia potrzeb energetycznych ponad 100 gospodarstw rolnych w gminie Brzeźnica – pochodzącej jedynie spośród ankietowanych gospodarstw (ok. 40% użytków rolnych w gminie). Grupa ta powiększyłaby się znacznie gdyby uwzględnić nadmiernie przyorywaną słomę: szacunkowo ok. 1000 ton dodatkowo do ok. 1600 ton (*vide* Tabela 3) oraz wykorzystanie słomy kukurydzianej i traw, które nie zostały uwzględnione w dotychczasowej analizie. Wstępne oszacowania wskazują, iż przy wdrożonym systemie wsparcia i sprawnym lokalnym rynku wymiany biomasy liczba ta może wzrosnąć do ok. 500 gospodarstw. Należy tu zaznaczyć, iż odpowiednie wysokowydajne kotły są produkowane w Polsce i są dostępne na rynku.

Dodatkowo, proponowany system wspomógłby rozwój obszarów wiejskich województwa lubuskiego. Ponadto, przyczyni się do poprawy powietrza na badanym terenie, z powodu zastąpienia paliw kopalnych biomasą rolniczą wykorzystywaną lokalnie. Celem jest, aby opracowywany model był przykładem dla innych gmin województwa lubuskiego, gdzie warunki klimatyczne i glebowe są podobne, a w szerszej perspektywie dla całego kraju.

W skali całego kraju uzyskane w ten sposób redukcja emisji CO<sub>2</sub> z paliw kopalnych stanowiłaby znaczący przyczynek do sprostania wymogom unijnym w zakresie redukcji emisji dwutlenku węgla.

### 4. Podziękowania

Wojciech Goryl jest stypendystą w ramach Poddziałania 8.2.2 „Regionalne Strategie Innowacji”, Działania 8.2 „Transfer wiedzy”, Priorytetu VIII „Regionalne Kadry Gospodarki” Programu Operacyjnego Kapitał Ludzki współfinansowanego ze środków Europejskiego Funduszu Społecznego Unii Europejskiej i z budżetu państwa.

### Literatura

- [1] Dakowski M., Wiąckowski S.: O energetyce dla użytkowników oraz sceptyków, Fundacja Odysseum, Warszawa 2005.
- [2] Denisiuk W.: Słoma – potencjał masy i energii, Inżynieria Rolnicza, 2(100)2008, pp. 23-29.
- [3] Gajewski R.: Potencjał rynkowy biomasy z przeznaczeniem na cele energetyczne, Polska Izba Biomasy, pp. 1-7, <http://www.sznuj-energie.pl/files/file/artyku%C5%82y/Potencjal%20rynkowy%20biomasy%20RGajewski%281%29.pdf> [dostęp: 7 kwietnia 2014 r.].
- [4] GUS: Energia ze źródeł odnawialnych w 2012r., Warszawa 2013.

- [5] GUS: Mały rocznik statystyczny Polski 2013, Warszawa 2013.
- [6] GUS: Skup i ceny produktów rolnych w 2012r., Warszawa 2013.
- [7] Goryl W.: Analiza ekonomiczno-ekologiczna lokalnego wykorzystania biomasy na przykładzie typowego gospodarstwa rolnego, Materiały konferencyjne, XI Konferencja: Odnawialne źródła energii obecnie i w nowej perspektywie po 2013 roku, Mazowiecki Ośrodek Doradztwa Rolniczego. Oddział Poświętne w Płońsku, 2012, pp. 43-49.
- [8] Goryl W.: Economic and Ecological Analysis of a Local Use of Biomass in an Agricultural Holding, Praca magisterska, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2012.
- [9] Goryl W., Guła A.: Biomass Heating Experience in Poland – Can It Be Useful for Ukraine?, Materiały konferencyjne, VII Międzynarodowa Konferencja Alternative & Renewable Energy Sources as Alternative Primary Energy Sources in the Region, L'viv's'ka oblasna administraciâ, 2013, pp. 96-99.
- [10] Goryl W., Guła A.: O bardziej przyjazne środowisku spalanie biomasy, Zielona Planeta, 1(112), 2014, pp. 16-19.
- [11] Guła A., Wajss P., Goryl W.: Is Using Biomass for Power Generation a Good Solution? The Polish Case, Przegląd Elektrotechniczny, R. 88 NR 5a/2012, pp. 198-203.
- [12] Kowalczyk-Juško A.: Metodyka szacowania regionalnych zasobów biomasy na cele energetyczne, EIOGZ, 85/2010, pp. 103-116.
- [13] Kristensen F.E., Kristensen K.J.: Development and test of small-scale batch-fired straw boilers in Denmark, Biomass and Bioenergy, 26(2004), pp. 561-569.
- [14] Kwaśniewski D.: Ocena produkcji i potencjalnych możliwości wykorzystania słomy do celów grzewczych na przykładzie powiatu żywieckiego, Inżynieria Rolnicza, 6(104)/2008, pp. 113-119.
- [15] Ludwicka A., Grzybek A.: Bilans biomasy rolnej (słomy) na potrzeby energetyki, Problemy Inżynierii Rolniczej, 2/2010, pp. 101-111.

## **ANALYSIS OF ENERGY POTENTIAL OF AGRICULTURAL BIOMASS – A CASE STUDY OF A TYPICAL AGRICULTURAL COMMUNE WITH PERSPECTIVE OF CREATION A LOCAL BIOMASS EXCHANGE**

### **S u m m a r y**

The paper presents an estimate of the energy potential of post-harvest straw that can be used for heating of buildings in rural areas. The analysis is done for a typical agricultural commune Brzeznica in Lubuskie Region in Western Poland. For this purpose, a survey was performed among 64 farmers. The collected information was used to estimate the available straw potential, which can be used for heating of residential, farming or public buildings. Moreover, information was collected on the number of farms, where farmers were willing to install a biomass boiler or would decide to do such an investment, if adequate financial support from external funds were granted. The results of the survey show that there exists a significant potential of straw that could be used for providing heat to several hundred holdings in the commune. Resources owned by individual farmers vary - some have a surplus; while e.g. local governments usually do not have their own biomass. It is therefore necessary to create a system of local biomass exchange;

---

i.e. trading of its surpluses. The main barrier for the creation of a local biomass market in the Polish conditions is lack of organizational and legal solutions that would lead to a possibly full use of the local biomass resource. The collected data will help elaborate an organizational-economic model of using the local biomass for energy purposes.

**Keywords:** biomass, straw, potential, combustion, heat

DOI:10.7862/rb.2014.85

*Przesłano do redakcji: 18.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Marek GOSZTYŁA<sup>1</sup>  
Tomasz HUK<sup>2</sup>

## REKONSTRUKCJA CZY IMITACJA DOMU SOKOŁA W ŁAŃCUCIE

Przedstawiona przebudowa gmachu Towarzystwa Gimnastycznego „Sokół” w Łańcucie jest przykładem modernizacji obiektu znajdującego się w ewidencji zabytków, lecz nie ujętego w rejestrze w myśl przepisów ustawy O ochronie zabytków i opiece nad zabytkami z 23 lipca 2003 r. ( Dz. U. nr 162, poz. 1568 z 17 września i późn. zm.). Pomimo, że dom „Sokoła” znajdował się w ewidencji zabytków, to inwestor, posiłkując się ekspertyzą techniczną, zdecydował się na rozebranie obiektu. Trudno zaakceptować taką decyzję, zważywszy że, obiekt charakteryzował się dobrym stanem technicznym, o czym świadczyły opracowania techniczne. Wykonane ekspertyzy wykazują, że nadrzędnym problemem w przebudowie gmachu „Sokoła” nie był zły stan techniczny obiektu, lecz nowa funkcja, niedostosowana do możliwości przestrzennych budynku. W efekcie, opracowane oceny wykazały, że przebudowa obiektu w tak dużym stopniu jest ekonomicznie nieuzasadniona. Przeprowadzona modernizacja domu „Sokoła” ukazuje znany konflikt występujący przy adaptacji zabytków, tzn., pomiędzy formą zabytkową obiektu a nową funkcją. Występujące sprzeczności pomiędzy interesami inwestorów a konserwatorami zabytków, nie zawsze kończą się adaptacją zabytku, w taki sposób aby w jak najmniejszym stopniu ingerować w zabytkową strukturę. Pomimo, że w obliczu sprawdzonych i zaawansowanych technologiach budowlanych, możliwe było opracowanie projektu, który spełniłby wymogi funkcjonalne, przy pozostawieniu wartościowej oryginalnej struktury budynku, wybrano rozwiązanie, może uzasadnione ekonomicznie, ale pozostające w opozycji z obowiązującą doktryną konserwatorską. Wybudowano nowy obiekt z imitacją, a nie rekonstrukcją szaty zewnętrznej elewacji, co w efekcie końcowym doprowadziło do eliminacji zabytku architektury.

**Słowa kluczowe:** adaptacja, modernizacja, przebudowa, rekonstrukcja, architektura Galicji, zabytek.

<sup>1</sup> Dr hab. inż. Marek Gosztyła, prof. PRZ, Kierownik Katedry Konserwacji Zabytków, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie, 17 8651939, gosztyla@prz.edu.pl.

<sup>2</sup> Autor do korespondencji: mgr inż. arch. Tomasz Huk, Katedra Konserwacji Zabytków, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza w Rzeszowie, +48 502663776, thuk@prz.edu.pl

## 1. Wstęp

W postępowaniu konserwatorskim spotykamy się z zagadnieniami odbudowy obiektów znajdujących się w spisie zabytków, lecz nie ujętych w rejestrze w myśl przepisów ustawy O ochronie zabytków i opiece nad zabytkami z 23 lipca 2003 r. (Dz. U. nr 162, poz. 1568 z 17 września i późn. zm.). W wielu przypadkach obiekty, o statusie zabytków, a figurujące w ewidencji zabytków są użytkowane w pierwotnej formie. Zważywszy fakt, że ich stan zaliczyć można do złego pod względem technicznym, gdyż przetrwały wiele niesprzyjających okoliczności historycznych, to mimo tych okoliczności, reprezentują część dziedzictwa kulturowego, a w związku z tym, należy się tym obiektom szczególna uwaga i troska o ich zachowanie. Jednak rzeczywistość, a szczególnie realia ekonomiczne, często są przeciwnikiem tych budynków pomimo, że obecne uwarunkowania formalno-prawne i technologie budowlane umożliwiają ich restaurację.

Omówiona przebudowa domu „Sokoła” w Łąncucie jest przykładem modernizacji i adaptacji cennego obiektu, o walorach architektonicznych i wartościach historycznych do nowej funkcji. Gmach Towarzystwa Gimnastycznego „Sokół”, który był szczególnym miejscem w Łąncucie, wpływającym na rozwój kulturalno-społeczny miasta, poddany został pracom budowlanym, które zmieniły jego zabytkową bryłę. Podjęte działania, mające na celu ożywienie budynku, ukazują złożoną problematykę zachowania autentyczności i tożsamości historycznej struktury oraz dyskusyjną granicę pomiędzy rekonstrukcją i imitacją, na którą autorzy pragną zwrócić uwagę.

## 2. Rys historyczny

### 2.1. Geneza powstania Towarzystwa Gimnastycznego Sokół

Budynek Towarzystwa Gimnastycznego Sokół w Łąncucie wybudowano w roku 1896, jednak generalne przedstawienie uwarunkowań wpływających na całokształt obiektu, wymaga cofnięcia się do 1866 roku, do Lwowa. Grupa studentów, na czele z Żukotyńskim i Goltentalem, założyła wzorem Praskiego Zrzeszenia Gimnastycznego i Społeczno - Wychowawczego "Sokół" prywatne koło w celu ćwiczeń gimnastycznych i szermierki. Z upływem czasu, gdy ćwiczących przybywało, rozpoczęto starania o zalegalizowanie Towarzystwa Gimnastycznego. Utworzono komitet organizacyjny, w skład którego, poza założycielami, weszli m.in. major Jan Zapłachta, radny miasta Lwowa, dr Milleret oraz Jan Dobrzeński - dyrektor "Gazety Narodowej". Sytuacja polityczna ówczesnych czasów znacząco skomplikowała działania komitetu. Dopiero interwencja u namiestnika Galicji umożliwiła zalegalizowanie 7 lutego 1867 roku Towarzystwa Gimnastycznego we Lwowie. Ogłoszenie w 1867 roku autonomii dla obszaru Galicji i Lodomerii, zapoczątkowało przemiany w obszarach doty-

czących gospodarki krajowej, komunikacji, szkolnictwa i zdrowia. W efekcie umożliwiając wprowadzanie kolejnych zmian w działalności Towarzystwa Gimnastycznego, które w 1869 roku oficjalnie przyjęło nazwę "Sokół". Przez kolejne lata była to jedyna sokoła organizacja. Dopiero zmiana statutu w 1880 roku, umożliwiła powstawanie filii na innych terenach Galicji, tzw. gniazd sokolich. Początkowo powstała filia w Stanisławowie, następnie w Krakowie, Tarnopolu, Rzeszowie, Strzyżowie, Łańcucie i innych miastach, by w 1892 roku osiągnąć ilość 46 placówek.<sup>1 2</sup>

## 2.2. Towarzystwo Gimnastyczne Sokół na terenie miasta Łańcuta

Wzorem innych miast, pod koniec 1890 roku, powstała w Łańcucie inicjatywa założenia filii Polskiego Towarzystwa Gimnastycznego "Sokół". Liczące zaledwie 32 członków stowarzyszenie zostało zarejestrowane 8 marca 1891 roku. Pierwszym problemem łańcuckiego "Sokoła" było znalezienie odpowiedniej przestrzeni do ćwiczeń. Dzięki pomocy ks. Zauderera, w pierwszych latach działalności Towarzystwo Gimnastyczne korzystało z opuszczonej przez austriackich żołnierzy plebani. Skromne fundusze, którymi dysponował łańcucki "Sokół", nie pozwalały na duże inwestycje. Początkowo Zarząd „Sokoła” ograniczył się do zakupu sztandaru i jego uroczystego poświęcenia 29 maja 1892 roku, odkładając budowę własnego „gniazda” do czasu zabrania niezbędnych środków.<sup>1 2</sup>

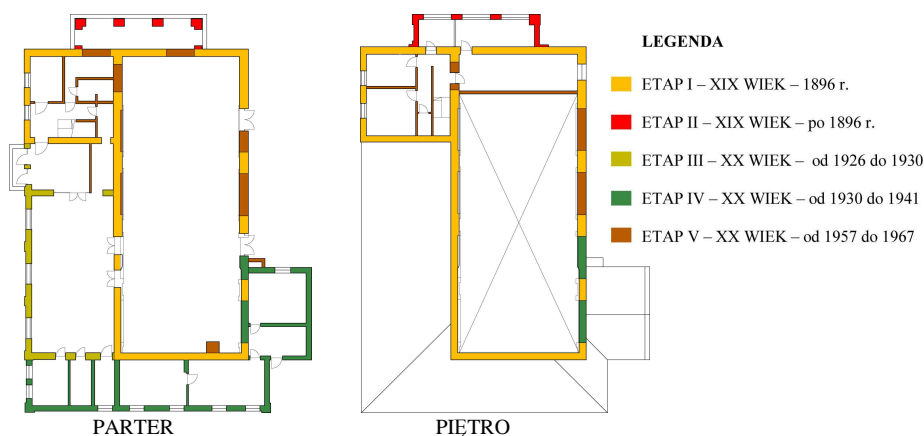
## 2.3. Dzieje budynku Towarzystwa Gimnastycznego Sokół w Łańcucie

Budowę gmachu „Sokoła” rozpoczęto w 1894 roku, uprzednio odkupując od hr. Romana Potockiego niezbędny grunt. Ze względu na ograniczone fundusze Zarząd "Sokoła" został zmuszony do podzielenia prac budowlanych na etapy. Pierwszy, nie licząc materiałów budowlanych, wyniósł 13 tys. zł. Powierzono go znanemu, lokalnemu budowniczemu Stanisławowi Cetnarskiemu<sup>3</sup>, który wykonał plany, a w 1896 roku ukończył budynek składający się z sali wraz ze sceną oraz czterech szatni. Budowę frontowej, reprezentacyjnej części wraz z piętrem, ze względów finansowych, odłożono w czasie. W przeciwieństwie do ówczesnych domów „Sokoła”, łańcucki obiekt był surowy i oszczędny w formie architektonicznej.

<sup>1</sup> Szul T.J.: Zarys historyczny dziejów „Gniazda Sokoła” w Łańcucie, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Łańcut 2003.

<sup>2</sup> Szul T.J.: Referat z okazji 110 rocznicy powstania „Sokoła” w Łańcucie, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Łańcut 2001

<sup>3</sup> „Z zawodu murarz, właściciel betoniarni, oraz założonej w 1912 r. firmy »Koncesjonowane Przedsiębiorstwo Budowlane Robót Wodnych i Lądowych«. Twórca projektów, oraz budowniczy takich obiektów jak willa »Róża«, szkoła ss. Boromeuszek. [...] Członek Towarzystwa Gimnastycznego »Sokół«, prezes Stowarzyszenia Mieszczan »Gwiazda« (1919-1925). [...] Za wieloletnią działalność społeczną nagrodzony w 1927 r. przyznaniem tytułu Honorowego Obywatela Miasta Łańcuta.” Muzeum Zamek Łańcut [dostęp: 2 IV 2014, <<http://www.zamek-lancut.pl/pl/Historia/ZasluzeniDlaLancuta#StanislawCetnarski>>



Ryc.1. Schemat stratygrafii gmachu Towarzystwa Gimnastycznego „Sokół” w Łańcut (autor: T. Huk na podstawie „Analizy historycznej z badaniami architektonicznymi”<sup>4</sup>)

Fig. 1. Stratigraphic scheme of the "Sokół" gymnastic society building in Łańcut. (author: T. Huk based on "Historical analysis with architectural research")

Kolejna przebudowa pod kierunkiem przedsiębiorstwa budowlanego Władysława Pelca i Stanisława Rogowskiego miała miejsce w latach 1926-1930. W tym czasie dom „Sokoła” powiększono o bibliotekę, czytelnię oraz garderobę dla członków Koła Miłośników Sceny.



Ryc.2. Budynek „Sokoła” z figurą sokoła na szczycie obiektu, przed 1939 r. (Fotografie ze zbiorów Działu Historii Miasta i Regionu Muzeum-Zamku w Łańcut)

Fig.2. The „Sokół” building with a statue of the falcon on the top, before 1939. (Photos from the collection of The Town and Region History Department of the Castle Museum in Łańcut.

<sup>4</sup> Jasińska-Malec A., Malec T.: Analiza historyczna z badaniami architektonicznymi dla budynku Towarzystwa Gimnastycznego Sokół, przy ul. Sokoła w Łańcut, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Kraków 2010.

W czasie II Wojny Światowej, w roku 1941, budynek został zarekwirowany przez okupanta. Natomiast w czasach PRL, zdelegalizowano Polskie Towarzystwo Gimnastyczne „Sokół”, a jego gmach przekształcono na kino „Znicz”. Pierwsze zmiany przypadły na rok 1948 i związane były z nową funkcją jaką miał pełnić budynek, jednak ograniczyły się jedynie do adaptacji wnętrza na cele kinowe. Kolejny remont i wewnętrzna modernizacja domu dawnego „Sokoła” w 1957 roku, miały na celu podniesienie kategorii kina z trzeciej do drugiej. Właściwy remont budynek przeszedł dopiero w 1967 roku. Trwające dwa lata prace objęły wymianę zniszczonego poszycia dachu, wykonanie izolacji przeciwwilgociowej wokół murów oraz zewnętrznych tynków na elewacjach wraz z nowym kolorem. Prace wewnątrz obiektu objęły całkowitą wymianę podłóg, częściową wymianę stolarki okiennej oraz wykonanie kotłowni wraz z instalacją centralnego ogrzewania, wentylacją mechaniczną. Część stropów drewnianych została wymieniona na żelbetowe. Podczas tej modernizacji dobudowano zespół kabinowy wyposażony w nowoczesną aparaturę projekcyjną oraz przeprowadzono prace remontowe w sali widowiskowej, poczekalni i holu, dzięki czemu kino zaliczono do pierwszej kategorii. Ostatni remont przeprowadzono w 1987 roku.<sup>5 6 7 8 9</sup>

#### 2.4. Stan sprzed ostatniej przebudowy

Transformacja ustrojowa w Polsce przyniosła kolejne zmiany w dziejach gmachu „Sokoła”. Reaktywacja Towarzystwa Gimnastycznego „Sokół” w Łańcucie, która odbyła się 1 września 1990 roku w setną rocznicę rozpoczęcia działalności, umożliwiła starania o zwrot mienia i odzyskanie dawnego „gniazda”. W 1995 roku przekazano za symboliczną złotówkę budynek na rzecz Towarzystwa Gimnastycznego „Sokół”. Niestety wbrew oczekiwaniom nowych użytkowników Kierownictwo Miejskiego Domu Kultury wraz z opuszczeniem obiektu zdemontowało aparaturę projekcyjną i utworzyło nowe „Kino Gabinet”. Stara aparatura, pozostawiona w kinie „Sokół”, nie umożliwiła sprostaniu konkurencji. Zarząd „Sokoła” liczył, że zysk ze sprzedaży biletów umożliwi przywrócenie dawnej świetności gmachowi. Niestety obiekt przystosowany wyłącznie do funkcji kinowej, wymagający remontów, nie przynosił zysków, a z każdym rokiem jego utrzymanie pochłaniało coraz większe nakłady finan-

<sup>5</sup> Sprawozdanie z czynności Wydziału Towarzystwa Gimnastycznego „Sokół” w Łańcucie za rok 1895, s.16, MBP w Łańcucie, sygn. 208

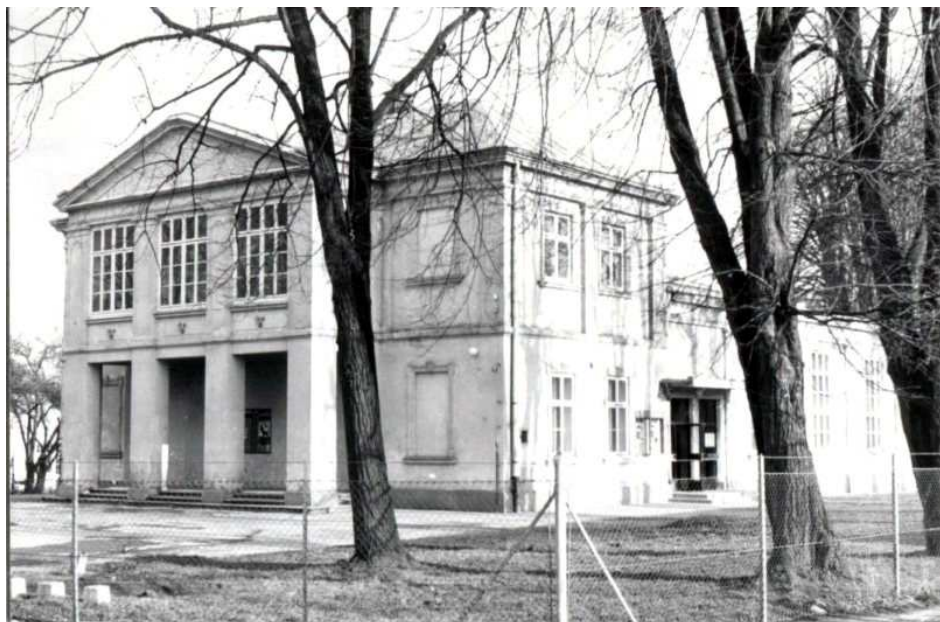
<sup>6</sup> Kozaczka M.: Życie kulturalne w Łańcucie po drugiej wojnie światowej, [w:] Studia i szkice z dziejów miasta, red W. Bonusiak, Rzeszów 1997.

<sup>7</sup> Serkowski I.: Notaty do mego dziennika, 25 X 1896r., rkps BMZŁ, sygn., R 55.

<sup>8</sup> Jasińska-Malec A., Malec T.: Analiza historyczna z badaniami architektonicznymi dla budynku Towarzystwa Gimnastycznego Sokół, przy ul. Sokoła w Łańcucie, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Kraków 2010

<sup>9</sup> Szul T.J.: Zarys historyczny dziejów „Gniazda Sokoła” w Łańcucie, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Łańcut 2003.





Ryc.3. Budynek „Sokoła” po wojnie. Wybito wejście od zachodu, nie ma sokoła na szczycie budynku. (Fotografie ze zbiorów Działu Historii Miasta i Regionu Muzeum-Zamku w Łańcutcie)

Fig.3. The „Sokol” building after the war. Minted entrance from the west, there is no falcon on top of the building. (Photos from the collection of The Town and Region History Department of the Castle Museum in Łańcut)

sowe. Wciąż niszczący budynek sprzedano nowemu inwestorowi z zamiarem zmiany dotychczas pełnionej funkcji.

Nowy inwestor przejął gmach „Sokoła” w stanie wymagającym pilnego remontu. Murowany, otynkowany obiekt składał się z dwóch części – piętrowej północnej oraz parterowej południowej, częściowo podpiwniczonej, w której zlokalizowana była kotłownia. Dach wielospadowy pokryty był blachą. Elewacja zachodnia, po przeprowadzonych modernizacjach otrzymała funkcję wejściową. W części centralnej zachowały się dwa wejścia wyposażone we współczesne, dwuskrzydłowe drzwi. W dwupiętrowej części, zlokalizowanej po lewej stronie od wejścia, znajdowały się cztery, symetrycznie rozmieszczone otwory okienne, po dwa na każdą kondygnację. Na prawo, natomiast trzy oryginalne otwory okienne oraz dwa niewielkie współcześnie przemurowane okna. Elewacja frontowa, skierowana na północ, z centralnie umieszczonym ryzalitem, z trójkątnym szczytem, który w parterze tworzył podcienie wsparte na czterech filarach, zwieńczona została figurą sokoła z rozpostartymi skrzydłami. Symetrycznie, po obu stronach ryzalitu, znajdowały się blendy na wysokość całego budynku. Wertykalne podziały na elewacjach zostały zaakcentowane pilastrami, które w części frontowej dodatkowo posiadały płyciny. Horyzontalnie dom

„Sokoła” podkreślony był cokołem, gzymsem pośrednim oraz zwieńczony gzymsem koronującym. Otwory okienne, które nie zostały przemurowane współcześnie, posiadały profilowane uszakowe obramienia z kluczem i profilowanymi parapetami. Elewacja południowa, jak i wschodnia w całości przemurowana była współczesnymi otworami okiennymi i drzwiowymi.

## 2.5. Ekspertyzy

Pierwsze ekspertyzy stanu technicznego budynku „Sokoła” wykonane zostały w 2001 roku. Zlecone zostały w celu zbadania możliwości adaptacji sali kinowej na gimnastyczną. Wykonano dwie odrębne dokumentacje. Pierwsza „Ekspertyza techniczna konstrukcji sali kinowej w budynku „Sokoła” w Łańcucie” opracowana w oparciu o wizję lokalną, miejscowe odkrywki, pomiary i obliczenia statyczne, dała podstawę do stwierdzenia, że „stan techniczny konstrukcji stropu stalowo-drewnianego nad salą kinową jest dobry.<sup>10</sup> Istnieje zapas o nośności stropu, natomiast przekroczone zostały dopuszczalne ugięcia. Oznacza to, że z uwagi na konstrukcję stropu sala może być bezpiecznie użytkowana. Ponadto w operacie podano, że „więźba dachowa drewniana jest w dobrym stanie technicznym. Należy systematycznie kontrolować stan pokrycia dachowego aby nie dopuścić do zamakania więźby i stropu”<sup>11</sup>. Ostatecznie zapisano konkluzję że, „pod względem konstrukcyjnym analizowana sala kinowa nadaje się do adaptacji na szkolną salę gimnastyczną, a przedsięwzięcie takie jest uzasadnione technicznie i ekonomicznie”<sup>12</sup>. Podobne wnioski wyciągnął Czesław Trela w „Opinii mykologiczno-budowlanej” po oględzinach budynku, dokonaniu miejscowych odkrywek i obliczeniach statycznych. Oceniał stan techniczny sali kinowej na dobry, uprzednio wykonując „obliczenia sprawdzające dachu, stropu oraz rozeznanie mykologiczne”<sup>13</sup>. Kolejna „Ekspertyza konstrukcyjno-budowlana” wykonana w 2008 roku przez A. Szluzę i D. Pilchę<sup>14</sup> miał na celu określenie możliwości rozbudowy i zmiany funkcji w aspekcie technicznym i ekonomicznym. Wnioski płynące z tej ekspertyzy były sprzeczne z poprzednimi. Stwierdzono, że ze względu na niezadawalający stan elementów konstrukcyjnych, ewentualna dalsza eksploatacja domu „Sokoła”, w jakimkolwiek charakterze, zagrażałaby zdrowiu i życiu przebywających w nim osób.

*Ponadto „oceniając możliwość i uwarunkowania remontu przedmiotowego budynku i zmiany jego sposobu użytkowania (np. jako hotel) stwierdzić należy,*

---

<sup>10</sup> Schab S.: Ekspertyza techniczna konstrukcji Sali kinowej w budynku „Sokoła” w Łańcucie, ul. Sokoła, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Rzeszów 2001.

<sup>11</sup> Tamże,

<sup>12</sup> Tamże,

<sup>13</sup> Trela C.: Opinia mykologiczno-budowlana dotycząca sali kinowej budynku Sokoła wraz z wyceną szacunkową przewidywanych robót remontowo – adaptacyjnych związanych z ewentualną zmianą jej użytkowania na salę gimnastyczną, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Rzeszów 2001.

<sup>14</sup> Szluz A., Pilch D.: Ekspertyza konstrukcyjno-budowlana, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Rzeszów 2008.

*że o ile część dwukondygnacyjną można w miarę łatwo dostosować do nowej funkcji to część, w której znajdowała się sala kinowa zarówno z technicznego jaki i ekonomicznego punktu widzenia do tego się nie nadaje.*"<sup>15</sup>

Wszelkie próby ratowania któregośkolwiek z elementów budynku dla autorów tej ekspertyzy były ocenione jako trudne technicznie, a zarazem kosztowne – „innymi słowy osiągnięty efekt byłby niewspółmierny do poniesionych nakładów”<sup>16</sup>. Zalecenia płynące z tej ekspertyzy jednoznacznie wskazywały, że zmiana sposobu użytkowania budynku będzie wiązała się z rozbiórką domu „Sokoła”. Opinia ta stała się podstawą do wykonania projektu budowlanego, który zakładał demontaż obiektu. Budynek dawnego „Sokoła” znajdował się jednak w spisie zabytków co wiązało się z uzgodnieniem projektu w Wojewódzkim Urzędzie Ochrony Zabytków w Przemyślu. Konserwator nakazał zachować i zaadoptować do nowej funkcji część frontową (ryzalit) od strony ulicy Sokoła. Niestety, prowadzony sposób rozbiórki budynku spowodował konieczność sporządzenia aneksu<sup>17</sup> do ekspertyzy z 2008 roku, w której wskazano, że niezabezpieczony ryzalit mógłby zagrażać bezpieczeństwu użytkowników działki i mógłby dojść do katastrofy budowlanej spowodowanej zawaleniem się pozostawionych ścian. Ponadto, autorzy aneksu stwierdzili, że elementy dawnego domu „Sokoła” były w na tyle w złym stanie, że „nie istnieją nawet techniczne możliwości ich pozostawienia i wykorzystania w projektowanej budowie hotelu”<sup>18</sup>. Ostatecznie, za zgodą konserwatora zabytków, który nakazał zrekonstruować frontową część elewacji, całkowicie rozebrano gmach „Sokoła”.

## 2.6. Nowa funkcja nowy budynek

Z formalnego punktu widzenia zrealizowane zamierzenie inwestycyjne można określić jako rozbudowę, nadbudowę i przebudowę dawnego kina „Sokół” na hotel wraz z restauracją. Pod względem zaś zachowania struktur materialnych, dawny-historyczny gmach został rozebrany, a w jego miejsce wybudowano nową kubaturę, która stanowi mniej lub bardziej poprawne odzwierciedlenie, jedynie w obrębie elewacji frontowej, domu „Sokoła”. Powierzchniowo, obiekt został powiększony ponad dwukrotnie, w rzucie natomiast, nie licząc obrysu elewacji frontowej, zmienił się całkowicie. W efekcie końcowym elewacja frontowa jest wątpliwą imitacją frontonu historycznego gmachu, pozostała część jest nowym obiektem.

---

<sup>15</sup> Tamże,

<sup>16</sup> Tamże,

<sup>17</sup> Szluz A., Rzepka S.: Aneks do ekspertyzy konstrukcyjno-budowlanej z września 2011 roku, Rzeszów, 2011

<sup>18</sup> Szluz A., Rzepka S.: Aneks do ekspertyzy konstrukcyjno-budowlanej z września 2011 roku, Rzeszów, 2011,

### 3. Wnioski

Generalna przebudowa i rozbudowa dawnego domu „Sokoła” jest przykładem działań, które już na poziomie projektowym negują potrzebę zachowywania w największym możliwym zakresie dobro kultury. Pomimo, że budynek znajdował się w spisie zabytków, co wiązało się z koniecznością uzgodnienia projektu z Wojewódzkim Konserwatorem Zabytków, to inwestor, posiłkując się ekspertyzą techniczną, zdecydował się na rozebranie dawnego domu „Sokoła”. Trudno zaakceptować taką decyzją, tym bardziej, że obiekt charakteryzował się dobrym stanem technicznym, na co wskazywały inne opracowania techniczne. Chęć wprowadzenia nowego programu funkcjonalnego do obiektu, wbrew jego możliwościom kubaturowym i konstrukcyjnym, przysłoniła aspekt niematerialny – symbol ruchu społecznego budującego tożsamość narodową i gotowość do walki z zaborcami, a następnie czynnie działającego w obronie odzyskanej niepodległości i granic młodego Państwa Polskiego. Wykonane ekspertyzy wykazują, że nadrzędnym problemem w przebudowie gmachu „Sokoła” nie był zły stan techniczny obiektu, lecz nowa funkcja, niedostosowana do możliwości przestrzennych budynku. Pojawił się znany konflikt występujący przy adaptacji zabytków, tzn., pomiędzy formą zabytkową obiektu a nową funkcją. Również opracowane oceny pod kątem finansowym wykazały, że przebudowa obiektu w tak dużym stopniu jest ekonomicznie nieuzasadniona. Ta ostatnia ocena może nie mijąć się z prawdą. Jednak na plan pierwszy wysuwa się pytanie, czy w przypadku obiektu o takiej randze, który był świadectwem dziedzictwa kulturowego i tożsamości narodowej, nie należy go uszanować i zaadaptować w taki sposób, by w jak najmniejszym stopniu ingerować w zabytkową tkankę? Z drugiej strony, przyjmując ideę zachowania zabytkowej architektury oraz dopuszczając możliwość rozbudowy, przy dzisiejszych, zaawansowanych technologiach budowlanych, możliwe było opracowanie projektu, który spełniłby wymogi funkcjonalne, pozostawiając wartościową oryginalną strukturę budynku. Nie wykluczają tego przecież przeprowadzone ekspertyzy lecz wskazują na wysokie koszty realizacji takiego rozwiązania. Wybrano drogę, która zakładała wyburzenie starego gmachu i ponowne częściowe jego odtworzenie z budową nowej kubatury, z myślą dostosowania do nowej funkcji. Rozwiązanie to, może uzasadnione ekonomicznie, pozostaje w opozycji z obowiązującą obecnie doktryną konserwatorską. Wybudowano nowy obiekt przyjmując imitację, a nie rekonstrukcję szaty zewnętrznej elewacji, co w efekcie końcowym doprowadziło do eliminacji zabytku architektury. Konsekwencją takiego postępowania, powinno być teraz skreślenie z ewidencji zabytków byłego domu „Sokoła” w Łąncucie. Omówiony proces inwestycyjny należy zakwalifikować do działań pozakonserwatorskich.<sup>19</sup> Przeanalizowane działania są przykładem

<sup>19</sup> Gosztyła M, Pasztor P.: Konserwacja i ochrona zabytków architektury, Wydanie II, Rzeszów 2013, s.27-35.

usuwania architektury dokumentującej daną epokę i zastępowania oryginalnej architektury imitacją.



Ryc.4. Budynek „Sokoła” po przebudowie – stan istniejący 2014r. (autor: T. Huk)

Fig.4. The „Sokół” building after rebuild - current state - year 2014 (author: T. Huk)

## Literatura

- [1] Sprawozdanie z czynności Wydziału Towarzystwa Gimnastycznego „Sokół” w Łąncucie za rok 1895, MBP w Łąncucie, sygn. 208.
- [2] Serkowski I.: Notaty do mego dziennika, 25 X 1896r., rkps BMZŁ, sygn., R 55.
- [3] Jasińska-Malec A., Malec T.: Analiza historyczna z badaniami architektonicznymi dla budynku Towarzystwa Gimnastycznego Sokół, przy ul. Sokoła w Łąncucie, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Kraków 2010.
- [4] Kozaczka M.: Życie kulturalne w Łąncucie po drugiej wojnie światowej, [w:] Studia i szkice z dziejów miasta, red W. Bonusiak, Rzeszów 1997.
- [5] Schab S.: Ekspertyza techniczna konstrukcji Sali kinowej w budynku „Sokoła” w Łąncucie, ul. Sokoła, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Rzeszów 2001.
- [6] Trela C.: Opinia mykologiczno – budowlana dotycząca sali kinowej budynku Sokoła wraz z wyceną szacunkową przewidywanych robót remontowo – adaptacyjnych związanych z ewentualną zmianą jej użytkowania na salę gimnastyczną, mpis, [w] Archiwum prywatne, Rzeszów 2001.
- [7] Szluz A., Pilch D.: Ekspertyza konstrukcyjno-budowlana, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Rzeszów 2008.
- [8] Szluz A., Rzepka S.: Aneks do ekspertyzy konstrukcyjno-budowlanej z września 2011 roku, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Rzeszów 2011.
- [9] Szul T.J.: Referat z okazji 110 rocznicy powstania „Sokoła” w Łąncucie, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Łąncut 2001.
- [10] Szul T.J.: Zarys historyczny dziejów „Gniazda Sokoła” w Łąncucie, mpis, [w:] Archiwum prywatne, Łąncut 2003.

- [11] Gosztyła M, Pasztor P.: Konserwacja i ochrona zabytków architektury, Wydanie II, Rzeszów 2013.
- [12] Muzeum Zamek Łańcut: Przedwojenny Łańcut, cz.II, Zasłużeni dla Łańcuta i zamku, [dostęp: 2 IV 2014, <<http://www.zamek-lancut.pl/pl/Historia/ZasluzeniDlaLancuta#StanislawCetnarski>>].

## RECONSTRUCTION OR JUST AN IMITATION OF THE "SOKÓŁ" GYMNASIUM BUILDING IN ŁAŃCUT

### Summary

Presented in the article reconstruction of the edifice of the "Sokół" Gymnastic Society in Łańcut is an example of modernization of a building from the List of Historic Monuments, though not registered - under the Law on the protection and conservation of monuments of 23 June 2003 [Journal of Laws no. 162.1568 of 17 September as amended] in the Register of Historic Monuments. Although, the edifice was on the List of Historic Monuments, the investor - recourse to technical expertise - have led to its demolition. The building in fact - according to technical documents - was still in a good condition. Hence, it is difficult to accept the decision of the investor. As the expert evaluations reveal, an overriding issue of the alteration was not the poor technical condition of the building but its new function, yet not adapted to its spatial possibilities. As a result, according to the above mentioned expertise, reconstruction in such a large degree seemed unprofitable. The modernization carried out over the edifice of the "Sokół" Gymnastic Society presents the widespread conflict concerning monuments conversion, i.e. between their historic forms and new functions. Due to the common conflicts of interests that occur between the investors and conservators, the reduction of interference in historic structure of converted buildings becomes irrelevant. Although, it would have been possible to develop a project meeting all the functional requirements - due to the access to proven and advanced construction technologies - maintaining simultaneously the valuable original structure of the building, the chosen solution - yet economically viable - remains at odds with the current doctrine of conservation. So finally, there is a completely new building with an imitation instead of reconstruction of the exterior façade, eventually resulting in elimination of the architectural monument.

**Keywords:** conversion, modernization, alteration, reconstruction, Galician architecture, monument.

DOI:10.7862/rb.2014.86

*Przesłano do redakcji: 25.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*



**Tomasz GRUDNIEWSKI<sup>1</sup>**  
**Sławomir CZERNIK<sup>2</sup>**  
**Zofia LUBAŃSKA<sup>3</sup>**  
**Roman LICHOGRAJ<sup>4</sup>**  
**Piotr LICHOGRAJ<sup>5</sup>**

## **PRÓBA MODYFIKACJI WŁASNOŚCI WARSTW OTRZYMYWANYCH W PROCESIE SPUTTERINGU MAGNETRONOWEGO Z WYKORZYSTANIEM ELEMENTÓW STEROWANYCH ZEWNĘTRZNIE**

Sputtering magnetronowy jest techniką napyłania warstw zdobywającą coraz większe zainteresowanie w procesach wytwarzania elementów elektronowych i ogniw fotowoltaicznych. Celem prezentowanych w artykule prac badawczych, była analiza możliwości modyfikacji składu i topografii warstw otrzymywanych w procesie sputteringu magnetronowego z wykorzystaniem elementów sterowanych zewnętrznie. Rolą wprowadzonych do układu elementów zewnętrznych było zaburzenie procesu nanoszenia warstw. Zaburzenie nanoszenia warstw może skutkować pozytywnie, powodując większe uporządkowanie struktury warstwy lub bardziej jednolitą powierzchnię, lub negatywnie - całkowicie uniemożliwiając prawidłowe napylenie warstwy. Oba rezultaty są pożądane z punktu widzenia zastosowań produkcyjnych. Z jednej strony poszukuje się cienkich i jednolitych warstw, a z drugiej - warstw o zmodyfikowanej topografii. W czasie eksperymentów autorzy użyli siatek stalowych oraz przewodników miedzianych umieszczonych w wybranych odległościach od siebie jak i podłoża, a następnie napyłali miedź na powierzchnię płytek ze szkła laboratoryjnego. Następnie próbki zostały przebadane przy pomocy mikroskopy wykrywającej skład atomowy substancji i mikroskopu sił atomowych celem analizy zmian w topografii. Autorzy spodziewali się otrzymać warstwy o zwiększonej powierzchni aktywnej. Zgodnie z przewidywaniami autorów otrzymane warstwy okazały się znacznie cieńsze. Interesujący jest natomiast fakt, że ich struktura była bardziej uporządkowana niż na próbce referencyjnej, a ich chropowatość znacznie mniejsza. Podczas eksperymentów nie do-

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Tomasz Grudniewski, Zakład Informatyki, Katedra Nauk Technicznych, Państwowa Szkoła Wyższa, Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska, 833449908, knt@pswbp.pl

<sup>2</sup> Sławomir Czernik, Centrum Badań nad Innowacjami, Państwowa Szkoła Wyższa, Sidorska 105, 21-500 Biała Podlaska, 608619570, czernikslawomir@gmail.com

<sup>3</sup> Zofia Lubańska, Zakład Informatyki, Katedra Nauk Technicznych, Państwowa Szkoła Wyższa, Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska, 833449908, knt@pswbp.pl

<sup>4</sup> Roman Lichograj, Zakład Informatyki, Katedra Nauk Technicznych, Państwowa Szkoła Wyższa, Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska, 833449908, knt@pswbp.pl

<sup>5</sup> Piotr Lichograj, Zakład Informatyki, Katedra Nauk Technicznych, Państwowa Szkoła Wyższa, Sidorska 95/97, 21-500 Biała Podlaska, 833449908, knt@pswbp.pl



szło także do wybijania materiału z dodatkowych elementów wprowadzonych do układu.

**Słowa kluczowe:** cienkie warstwy, modyfikacja warstw, chropowatość, skład atomowy.

## 1. Wstęp

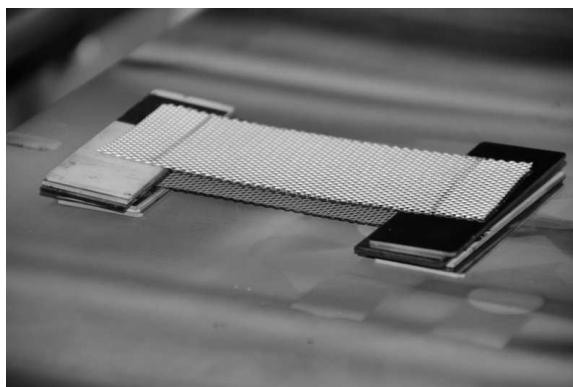
Napylanie z wykorzystaniem sputteringu magnetronowego jest jedną z technik wytwarzania warstw ultracienkich [1]. Do głównych zalet tej metody należą: brak konieczności stosowania wysokich temperatur w czasie procesu, oraz możliwość użycia substancji nieprzewodzących jako podłoże lub substancję napylaną. Proces sputteringu zachodzi w komorze próżniowej, do której wprowadza się gaz, najczęściej jest to argon wysokiej czystości rzadziej z niewielką domieszką tlenu lub azotu (sputtering reaktywny), następnie do targetu wykonanego z substancji, którą się napyła, podłączane jest stałe lub zmienne napięcie elektryczne, które doprowadza do jonizacji gazu w komorze [2-4]. Cząsteczki plazmy kierowane przez magnesy znajdujące się pod targetem bombardują jego powierzchnię i doprowadzają do wybijania cząstek, które następnie osadzają się na pierwszej napotkanej powierzchni. Celem pracy autorów było zbadanie możliwości modyfikacji struktury i jej topografii, tak aby uzyskać warstwę o dużym uporządkowaniu oraz powiększyć jej powierzchnię aktywną, co jest pożądane przy pracy nad ogniwami fotowoltaicznymi. Autorzy domniemywali, że zastosowanie siatki (dwóch siatek stalowych) jako przesłona na drodze wybitych atomów będzie skutkowało wzrostem uporządkowania nanoszonych warstw. Dodatkowo podejmowano próby zewnętrznego spolaryzowania siatek w celu sprawdzenia wpływu tego procesu na topografię naniesionych warstw. Wstępem do przeprowadzanych eksperymentów z użyciem siatek stalowych były badania wpływu nośnika (drut miedziany oraz siatka z drutu miedzianego) sterowanego wysokim napięciem, na zmiany w topografii warstwy [5,6].

## 2. Eksperyment

Eksperymenty były przeprowadzane z wykorzystaniem magnetronu Line 440 firmy Alliance Concept, pracującym w trybie odgórnym (target znajduje się nad podłożem, na które nanoszone są warstwy).

Jako podłoże do napylania wykorzystano szkiełka mikroskopowe. W czasie eksperymentów została zastosowana siatka stalowa o średnicy oczka 1 mm i poprzeczkach grubości ok 0,6 mm oraz drut miedziany grubości 0,2 mm.. Wykonano również siatkę z drutu miedzianego o średnicy oczka 5 mm z drutu o grubości 0,4 mm. Umieszczone w magnetronie siatki pokazano na Rys. 1. a konstrukcję płytki mikroskopowej z przewodami miedzianymi oraz

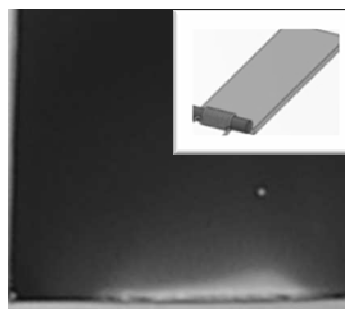
siatki miedzianej na Rys. 3a i Rys. 3b. Celem tak przygotowanego eksperymentu było zbadanie wpływu przeszkody znajdującej się bezpośrednio nad próbką. Eksperymenty przeprowadzone z użyciem siatki i drutu miedzianego nie przyniosły oczekiwanych rezultatów. Wpływ umieszczonych



Rys. 1. Stalowe siatki umieszczone w magnetronie

Fig. 1. Steel mesh placed in a magnetron

nad próbką przewodników polegał na realizacji fizycznej przesłony. Po analizie dotychczasowych eksperymentów z użyciem cewki (Rys. 2) i widocznego jej wpływu na napyłaną warstwę postanowiono wykorzystać zaobserwowany efekt do modulowania topografii próbki z użyciem miedzianej siatki [7,8].



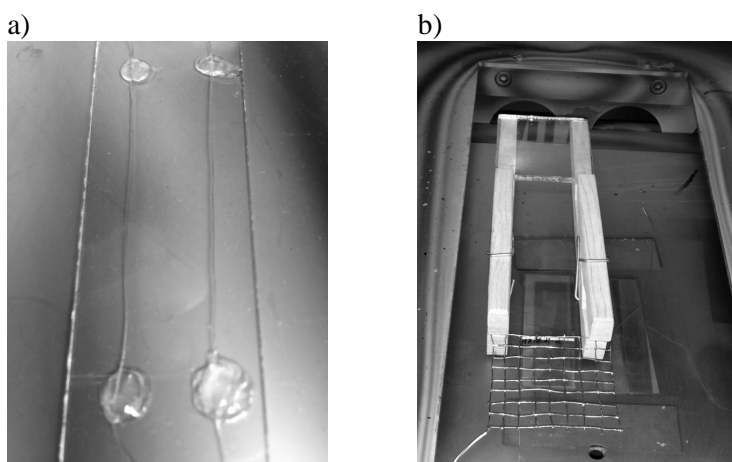
Rys. 2. Efekt działania cewki zlokalizowanej w pobliżu napyłanej warstwy

Fig. 2. Influence of the coil located near the sputtered layer

Przez wzgląd na dużo mniejszą średnicę przewodników użytych w siatce w stosunku do odległości od podłoża, na które nanoszona jest warstwa, modyfikacja wynikająca z przysłonięcia wybitych atomów była nieobserwowalna. Przyłożenie do siatki miedzianej zewnętrznego napięcia sterującego stałego jak i zmiennego o wartościach od 0 do 240 V

(spolaryzowanego zamiennie: dodatnio lub ujemnie względem podłoża) nie wpływało na zmiany w topografii.

Postanowiono zatem powtórzyć eksperymenty, ale tym razem z zastosowaniem siatki (siatek) stalowych. Rolą siatek było zwiększenie parametru uporządkowania, jak i również (poprzez zastosowanie dwóch siatek pod sobą) zwiększenie wpływu na przesłanianie wybitych atomów targetu. Proces sputteringu przeprowadzany był w warunkach zawartych w Tabeli 1. Pojedyncza siatka oraz dwie siatki były umieszczane bezpośrednio na próbce, 1 oraz 2 mm nad próbką. Pomiedzy siatkami zachowywane były odległości 1, 2 oraz 3mm. Wybór odległości był spowodowany rozmiarami oczek siatki i grubością drutu z jakiego zostały wykonane. Parametry procesu zawarto w Tabeli 2. Analizy właściwości otrzymanych warstw zostały wykonane przy pomocy mikroskopu elektronowego Hitachi TM3000 wyposażonego w mikrosondę Swift ED3000, oraz mikroskopu AFM NT-MDT Ntegra Spectra z wykorzystaniem sondy NSG03 (tryb bezkontaktowy).



Rys. 3. Płytkę z przymocowanymi drutami a) oraz przygotowaną siatkę miedzianą b)

Fig. 3. Plate with attached wires a) and prepared copper mesh b)

Tabela 1. Parametry napyłania

Table 1. Sputtering parameters

Target	<b>Cu</b>
Moc [W]	600
Generator	DC
Przepływ argonu[sccm]	100
Czas[s]	180

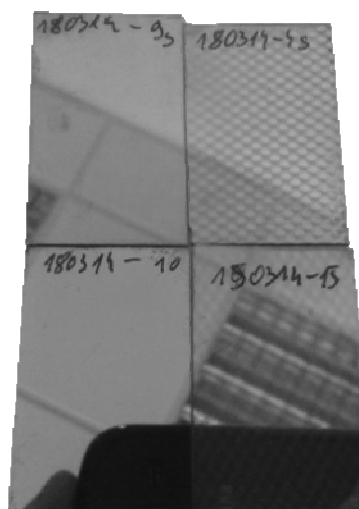
Tabela 2. Konfiguracje siatek nad próbką

Table 2. Configuration of the meshes over the sample

Odległość pomiędzy siatkami [mm]				Odległość siatki od próbki [mm]		
				0	1	2
	0	170314-4	170314-5	170314-7		
1	180314-2	180314-5	180314-9			
2	180314-4	180314-7	180314-11			
3	180314-13	180314-15	180314-17			

### 3. Rezultaty badań

W poprzednich badaniach zaobserwowano, że przewodnik z prądem elektrycznym oraz przeszkody nie mające bezpośredniego kontaktu z próbką lub targetem nie mają wpływu na zaburzenia w topografii nanoszonej warstwy.



Rys. 4. Zdjęcie wykonanych próbek

Fig. 4. Prepared samples

Pierwsze różnice jakie zostały zaobserwowane na próbkach to wygląd (Rys. 4). Próbki napyłone przez siatkę posiadały wizualnie znacznie cieńszą warstwę, a w przypadkach gdy odległość pierwszej siatki od próbki wynosiła 1 mm lub siatka leżała na próbce widoczny jest negatyw siatki odbity na powierzchni. Analiza składu atomowego próbki potwierdza obserwacje dokonane na podstawie wizualnej. Znacznie większy udział pierwiastków z podłoża w spektrum oznacza cieńszą warstwę miedzi napyłoną na szkiełko. Zostało

to przedstawione w Tabeli 3. Podczas przeprowadzonych prób nie zaobserwowano wybicia atomów żelaza z siatki.

Analiza obrazów AFM powierzchni uwidoczniała, że próbki napyłane przez przeszkodę mają znacznie mniejsze nanocząsteczki i są bardziej uporządkowane (Rys. 6, 7 i 8) niż w próbce kontrolnej (Rys. 5). Dodatkowo analiza chropowatości (Tabela 4) pokazuje że próbki napyłane przez siatkę mają znacznie mniej chropowatą powierzchnię, wartości  $S_y$  i  $S_a$  próbki kontrolnej są znacznie większe od wartości próbek umieszczanych pod przeszkodą.

Tabela 3. Skład atomowy próbek

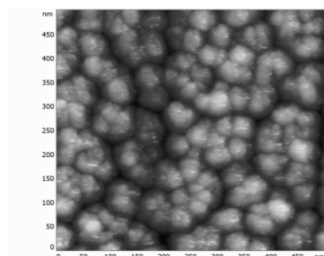
Table 3. Atomic composition of the samples

element	180314 - 4s	180414 - 9s	180414 - 10	190314 - 15
C	5,30%	5,94%	4,12%	4,97%
O	42,80%	43,00%	3,97%	41,53%
Na	7,11%	7,11%	0,00%	6,86%
Mg	1,78%	1,73%	0,00%	1,74%
Al	0,56%	0,55%	0,00%	0,48%
Si	27,21%	26,32%	1,90%	27,28%
K	0,51%	0,37%	0,00%	0,41%
Ca	3,92%	3,73%	0,85%	3,89%
Cu	10,82%	11,23%	89,16%	12,85%

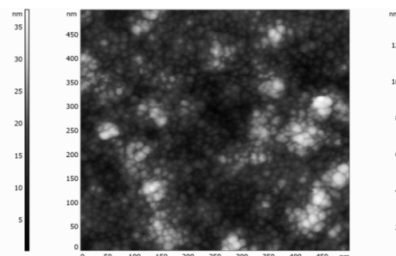
Tabela 4. Analiza chropowatości

Table 4. Roughness analysis

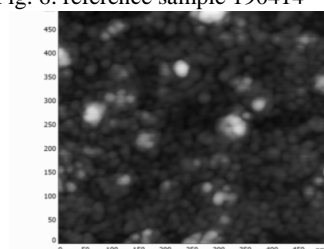
Próbka	4	9	10	15
Peak-to-peak, $S_y$	13,1776 nm	8,95665 nm	52,5045 nm	5,5593 nm
Average Roughness, $S_a$	1,47357 nm	0,848257 nm	6,5966 nm	0,579222 nm
Second moment	6,45738	4,77885	28,7668	3,54161
Root Mean Square, $S_q$	1,86459 nm	1,09442 nm	7,99165 nm	0,728104 nm
Surface skewness, $S_{sk}$	0,553752	0,619279	-0,0603602	0,316624
Coefficient of kurtosis, $S_{ka}$	0,344388	0,822452	-0,498264	0,146082
Entropy	6,18341	5,40936	8,30352	4,856
Redundance	-0,714682	-0,807842	-0,460184	-1,21856



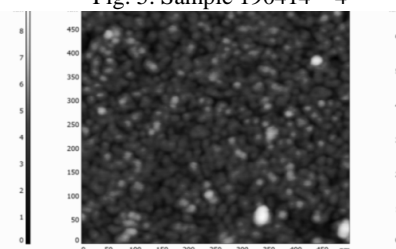
Rys. 5. Próbką referencyjna 190414 - 10  
Fig. 6. reference sample 190414 - 10



Rys. 6. Próbką 190414 – 4  
Fig. 5. Sample 190414 – 4



Rys. 7. Próbką 190414 – 9  
Fig. 7. Sample 190414 – 9



Rys. 8. Próbką 190414 – 15  
Fig. 8. sample 190414 – 15

#### 4. Wnioski

Naturalnym zaobserwowanym efektem było uzależnienie morfologii nanoszonej warstwy od położenia siatek. Siatki działały jako przesłony w skali makroskopowej – w powstałej warstwie modyfikacji podlegała jedynie jej grubość. Oznacza to, że siatka powstrzymuje część wybitych cząstek, a warstwa otrzymana pod siatką jest znacznie bardziej uporządkowana (a jej nanocząsteczki mniejsze). Chropowatość warstwy napyłonej pod siatką jest znacznie mniejsza niż próbki kontrolnej umieszczonej obok.

Efekt działania siatki jako maski i fakt że warstwa napyłona w ten sposób będzie cieńsza, były możliwe do przewidzenia, jednak interesującym jest fakt że warstwa jest bardziej uporządkowana i mniej chropowata.

#### Literatura

- [1] A. Sahin, H.Kaya, Thin-Film Solar Cells, (2010).
- [2] S.M. Rosnagel, SputterDeposition W.D. Sproul, K.O. Legg (Eds.), Opportunities for InnovationAdvancedSurface Engineering, Technomic Publishing Co, Switzerland, (1995).
- [3] M. W. Park, W. W. Lee, J. G. Lee, Ch. M. Lee, A Comparison of the Mechanical Properties of RF- and DC- Sputter-Deposited Cr ThinFilms, Materials Science Forum (Volumes 546 - 549), (2007).

- [4] M. Batzill, U. Diebold, The surface and materials science of thin oxide, Progress in Surface Science 79 (2005) 47-154.
- [5] Posadowski W. M.: Pulsed magnetron sputtering of reactive compounds, Thin Solid Films, vol. 343–344 (1999), s. 85–89.
- [6] Musil J., Baroch P., Vlcek J., Nam K.H., Han J.G.: Reactive magnetron sputtering of thin films: present and trends, Thin Solid Films, vol. 475 (2005), s. 208–218.
- [7] Kaczmarek D.: Modyfikacja wybranych właściwości cienkich warstw TiO<sub>2</sub>, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [8] Luhin V., Zarapin V., Zharski I., Zhukowski P.: Sensorowe właściwości cienkich warstw SnO<sub>2</sub> wytwarzanych rozpylaniem magnetronowym, Elektronika. Konstrukcje, technologie, zastosowania 11/2011, s.76-78.

## **ATTEMPT OF THE LAYER MODIFYCATION USING EXTERNALLY CONTROLLED ELEMENTS DURING MAGNETRON SPUTTERING.**

### **S u m m a r y**

Magnetron sputtering is a technic to spray sheets that acquire more interests in electronics and photovoltaic fabrication. The aim of the research presented in present paper was to analyze the possibility of modifying of the layers obtained by the magnetron sputtering - using elements controlled externally. Those elements can modify obtained layers in two different ways: positive by greater orderliness of structure or more uniform surface, or negative causing gaps in sputtered coating. Both results are desirable from the applications point of view. On the one hand seeking to thin and uniform layers on the other layers of the modified topography. During the experiments, the authors used a wire mesh and copper conductors located in some distance from each other and the substrate. Then the samples were tested using the SEM microscope witch detection probe that allow to detect the layer composition substances and atomic force microscope for analysis of changes in topography. Authors hoped to achieve layers with greater active surface area. As authors suspected, sputtered layers were a lot thinner. Interesting fact is that their structure was a lot more ordered than the reference sample, and their roughness was smaller. During the experiment there was no material extraction from additional elements.

**Keywords:** thin films, modification of the layers, roughness, atomic composition

DOI:10.7862/rb.2014.87

*Przesłano do redakcji: 25.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Sławomir GUŁKOWSKI<sup>1</sup>

## MODELOWANIE CHARAKTERYSTYK I-V OGNIW SŁONECZNYCH W ŚRODOWISKU MATLAB/SIMULINK

Pogarszająca się sytuacja energetyczna dzisiejszego świata skłania rządy wielu krajów do działań, związanych z poszukiwaniem alternatywnych rozwiązań w tym sektorze. Nowe, bardziej przyjazne środowisku technologie otrzymywania „czystej” energii mają szansę stać się w przyszłości poważną alternatywą dla paliw kopalnych, takich jak węgiel, ropa czy gaz, które są na wyczerpaniu. Bardzo obiecującym źródłem energii jest promieniowanie słoneczne, ze względu na jego wszechobecność i proekologiczność. Fotowoltaika jest jedną z najszybciej rozwijających się technologii konwersji energii ze źródeł odnawialnych z uwagi na niskie koszty utrzymania systemów. Czynnikiem hamującym powszechne wykorzystanie systemów fotowoltaicznych, jako źródła energii, są jednak wciąż zbyt wysokie ceny modułów PV, na które składa się zarówno koszt materiałów bazowych jak i koszt technologii wytwarzania modułów. Jedną z metod wspomagających proces badań nad zwiększeniem sprawności przy jednoczesnym obniżeniu kosztów ogniw słonecznych jest modelowanie i symulacja komputerowa oparta na tzw. modelach zastępczych ogniw słonecznych. Jednym z takich modeli jest jednodiodowy model ogniwa słonecznego. Rezultaty obliczeń komputerowych wykonanych na podstawie modelu jednodiodowego pozwalają określić parametry pracy ogniwa przy różnych warunkach nasłonecznienia czy temperatury.

W artykule przedstawione zostały rezultaty dostosowania uniwersalnego modelu zastępczego ogniwa do przykładowego modułu komercyjnego KC32T02 oraz zaprezentowano wyniki obliczeń charakterystyk prądowo-napięciowych dla różnych warunków nasłonecznienia i temperatury. Otrzymane zależności są zgodne z wynikami podanymi przez producenta modułu.

**Słowa kluczowe:** fotowoltaika, ogniwa słoneczne, charakterystyka I-V, modelowanie komputerowe

### 1. Wprowadzenie

Podstawowe zjawisko fizyczne odpowiedzialne za wytworzenie energii elektrycznej w ogniwie fotowoltaicznym zaobserwowane zostało w XIX wieku. Chociaż już wówczas przewidywano zastosowanie na szerszą skalę pierwszych

---

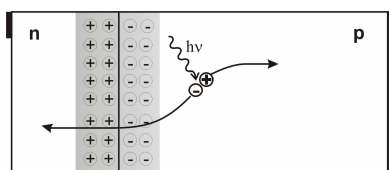
<sup>1</sup> Sławomir Gułkowski, Politechnika Lubelska, Nadbystrzycka 38, 20-618 Lublin,  
tel. (+81) 538 47 00, s.gulkowski@pollub.pl



ogniw w produkcji energii, to dopiero na początku lat pięćdziesiątych XX wieku wraz z rewolucją krzemową nastąpił znaczny przełom technologiczny w tej dziedzinie. Krzem jest obecnie najszerszej stosowanym materiałem do produkcji struktur stosowanych we współczesnych ogniwach fotowoltaicznych, ze względu na powszechność jego występowania, odpowiednią dla technologii PV przewagę energetyczną oraz nietoksyczność [1,4]. Maksymalne sprawności konwersji krzemowych ogniw krystalicznych mieszczą się w granicach 7 – 17% dla krzemu polikrystalicznego oraz do 21% dla krzemu o strukturze monokrystalicznej.

## 2. Budowa ogniwa słonecznego

Rysunek 1 przedstawia schematycznie strukturę typowego ogniwa słonecznego. Wnętrze ogniwa stanowią dwa obszary: obszar typu p - baza oraz obszar typu n – emiter. Obszar p jest zwykle domieszkowany borem, a obszar n fosforem. Obszary w pobliżu kontaktów zawierają większą koncentrację domieszek niż w regionach p i n. Oznaczone są jako p+ i n+ . Odpowiednio dobrany poziom domieszkowania zapobiega w ten sposób stratom ładunku na kontaktach. Obydwie powierzchnie ogniwa zawierają kontakty metaliczne.



Rys. 1. Schemat struktury ogniwa słonecznego

Fig. 1. Scheme of the solar cell structure

Podstawą działania ogniwa słonecznego jest efekt fotowoltaiczny. Polega on na wygenerowaniu siły elektromotorycznej w wyniku oświetlenia złącza p-n [4]. Nie wszystkie fotony mają wystarczającą energię do uwolnienia elektronu z wiązań w kryształach półprzewodnika. Charakterystycznym parametrem wpływającym na efektywność fotokonwersji jest szerokość przerwy energetycznej. Jeśli na obszar złącza p-n pada foton o energii większej od wielkości przerwy energetycznej krzemu, traci tę energię na rzecz kreacji pary ładunków dziura – elektron. Ładunki w wyniku działania pola elektrycznego wzdłuż złącza zostają rozdzielone a następnie wędrując przez ogniwo osiągają kontakty metaliczne. Jeżeli obwód jest zamknięty to będzie w nim płynął prąd elektryczny. Energia słoneczna jest zatem w ogniwie zamieniana na energię elektryczną w sposób czysto elektronowy, bez udziału jakichkolwiek reakcji chemicznych [1-3].

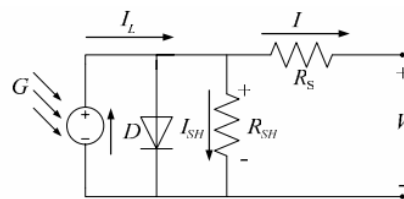
### 3. Modelowanie charakterystyk I-V

W przypadku idealnego ogniwa charakterystyka I-V może być opisana wzorem [6]:

$$I = I_{ph} - I_o \left( \exp\left(\frac{qV}{kT}\right) - 1 \right), \quad (1)$$

gdzie  $k$  to stała Boltzmana,  $T$  – temperatura w Kelwinach,  $q$  ( $>0$ ) – ładunek elektronu,  $V$  – napięcie na zaciskach ogniwa,  $I_o$  – prąd nasycenia.

$I_{ph}$  jest generowanym fotoprądem związanym z padającymi na ogniwo fotonami. Jak pokazano na rysunku 2 ogniwo słoneczne może być modelowane za pomocą układu składającego się ze źródła prądu  $I_{ph}$  oraz równolegle połączonej diody. Jej zadaniem w obwodzie jest uwzględnienie zjawiska rekombinacji w obszarze quasi-neutralnym ogniwa [6]. Bardziej dokładny od prezentowanego jest model dwudiodowy, w którym uwzględnia się również zjawisko rekombinacji w obszarze zubożonym.



Rys. 2. Obwód zastępczy ogniwa słonecznego, na podstawie [5]

Fig. 2. Equivalent electrical circuit of the solar cell, based on [5]

W obwodzie przedstawionym na rysunku 2 uwzględnione zostały również tzw. rezystancje pasożytnicze  $R_s$  i  $R_{SH}$  wpływające na końcowy kształt charakterystyki a więc także na efektywność ogniwa. Uwzględniając powyższe parametry równanie (1) będzie miało postać:

$$I = I_{ph} - I_o \left( \exp\left(\frac{q(V + IR_s)/nkT}{kT}\right) - 1 \right) - \frac{(V + IR_s)}{R_{SH}} \quad (2)$$

gdzie  $n$  jest współczynnikiem jakości złącza i przyjmuje wartości pomiędzy 1 a 2. W przypadku ogniw dobrej jakości rezystancja  $R_{SH}$  jest dużo mniejsza niż  $R_s$  i zazwyczaj jest pomijana w obliczeniach.

W oparciu o rozwiązania przedstawione w pracy [5] a także następujące wartości współczynników:  $n=1.2$  oraz  $G=1000W/m^2$  równanie (2) po obliczeniach może być zapisane w następującej postaci:

$$I = I_{ph} - I_0 \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \left( \frac{V}{36} + 0.0079 \cdot I \right)}{nkT} \right) - 1 \right], \quad (3)$$

gdzie

$$I_0 = 0.000000022 \cdot \left( \frac{T}{298} \right)^{2.5} \cdot \exp \left[ \frac{-1.12 \cdot q}{1.2 \cdot k} \cdot \left( \frac{1}{T} - \frac{1}{298} \right) \right], \quad (4)$$

oraz

$$I_{ph} = 3.8 + 0.0024 \cdot (T - 298). \quad (5)$$

Należy zwrócić uwagę, że w równaniu (3) natężenie prądu  $I$  występuje zarówno z lewej jak i z prawej strony równania. W celu rozwiązania równania (3) posługujemy się iteracyjną metodą Newtona, następującej postaci:

$$I^{n+1} = I^n - \frac{f(I)}{f'(I)}, \quad \text{gdzie } I^{n+1}, I^n, f'(I) \text{ oznaczają odpowiednio wartość}$$

natężenia w następnym kroku iteracyjnym, bieżącą wartość natężenia wartość oraz pochodną funkcji  $f(I)$ . Iteracje rozpoczyna się od  $I=0$ . Funkcja  $f(I)$  oraz jej pochodna będą miały postać (6) i (7):

$$f(I) = I_L - I - I_0 \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \left( \frac{V}{36} + 0.0079 \cdot I \right)}{nkT} \right) - 1 \right]. \quad (6)$$

$$f'(I) = -1 - I_0 \cdot \left[ \exp \left( \frac{q \left( \frac{V}{36} + 0.0079 \cdot I \right)}{nkT} \right) - 1 \right] \cdot \frac{0.0079 \cdot q}{nkT}. \quad (7)$$

Dokonując implementacji równań (3)-(7) w środowisku Matlab/Simulink otrzymuje się wykres charakterystyki I-V dla danego parametru T. Na podstawie wykresu można określić podstawowe parametry pracy ogniwa a zatem także wpływ temperatury pracy modułu na efektywność przetwarzania energii słonecznej w elektryczną. Analogicznie można określić równania modelu w celu zbadania wpływu nasłonecznienia na końcowy kształt charakterystyki I-V.

#### 4. Rezultaty obliczeń i ich analiza

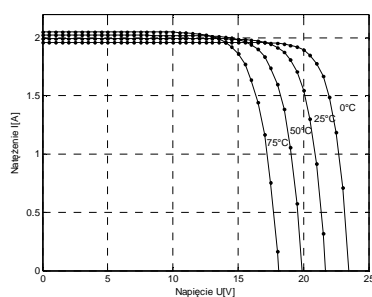
W tabeli 1 przedstawione zostały parametry modułu Kyocera KC32T02. Na podstawie parametrów dokonano implementacji modelu w środowisku Ma-

tlab/Simulink oraz przeprowadzono obliczenia charakterystyk I-V modułu w funkcji temperatury i nasłonecznienia. Rezultaty obliczeń przedstawiono na rysunkach 3-4.

Tabela 1. Specyfikacja modułu KC32T02 [7]

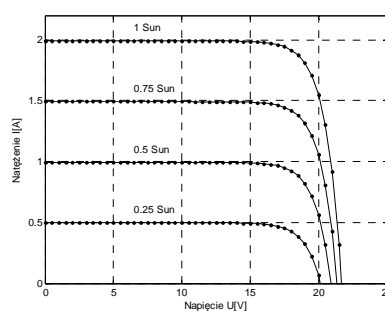
Table 1. Specification of the KC32T02 module [7]

MODEL	KC32T02
Moc	32 W
Vm	17.4 V
Im	1.84 A
Voc	21.7 V
Isc	1.99 A



Rys. 3. Obliczone charakterystyki modułu I-V w funkcji temperatury

Fig. 3. Module characteristic calculated as a function of temperature



Rys. 4. Obliczone charakterystyki modułu I-V w funkcji nasłonecznienia

Fig. 4. Module characteristic calculated as a function of irradiance

W oparciu o rezultaty obliczeń przedstawione na rysunkach można określić parametry pracy modułu dla różnych warunków nasłonecznienia oraz temperatury modułów. W konsekwencji oznacza to możliwość określenia zmiany mocy generowanej przez system fotowoltaiczny w przypadku zmiany wartości nasłonecznienia a także określenie mocy generowanej przez system w funkcji temperatury.

## 5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono komputerową metodę otrzymywania charakterystyk I-V modułu słonecznego w oparciu o jednodiodowy model zastępczy ogniwa. Do symulacji wybrano komercyjny moduł Kyocera KC32T02. Model komputerowy ogniwa zaimplementowany został w środowisku Matlab/Simulink z uwzględnieniem technicznych parametrów wybranego modułu. Rezultaty obliczeń pokazują zmianę przebiegu charakterystyki I-V modułu dla różnych

warunków natężenia promieniowania słonecznego oraz dla różnych temperatur modułu.

### Literatura

- [1] E. Klugmann, E. Klugmann-Radziemska. Ogniwa i moduły fotowoltaiczne oraz inne niekonwencjonalne źródła energii. Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok 2005.
- [2] W. Lewandowski. Proekologiczne źródła energii odnawialnej. WNT, Warszawa 2005.
- [3] Z. Jarzębski. Energia słoneczna. Konwersja fotowoltaiczna. PWN, Warszawa 1990.
- [4] J. M. Olchowik. Cienkie warstwy w strukturach baterii słonecznych. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin, 2006.
- [5] F. M. Gonzalez-Longatt. Model of Photovoltaic Module in Matlab. 2do Congreso Iberoamericano de Estudiantes de Ingeniería Eléctrica, Electronica Y Computation, II CIBELEC 2005
- [6] T. Markvart, L. Castaner. Practical Handbook of Photovoltaics. Fundamentals and Applications. Elsevier, USA, 2003.
- [7] <http://www.kyocera.com.sg/products/solar/pdf/kc32t02.pdf> [dostęp: maj 2014]

## MODELING OF THE I-V CHARACTERISTICS OF SOLAR MODULE IN MATLAB/SIMULINK ENVIRONMENT

### Summary

The world energy situation force the governments of many countries to find alternative solutions in this sector. New, more environmentally friendly technologies of producing energy have a big potential to become alternative technique for producing energy from coal, petroleum or gas. Very promising source of energy is Sun. Photovoltaics is the one of the highest growth potential method of producing energy from renewable sources because of the low maintenance cost of the system. However, the price of modules are still high because of the cost of obtaining very pure silicon substrates for the solar cells. For this reason many researches focus on the increasing efficiency of the solar cells with decreasing the cost of production.

One of the method is computer modeling of I-V curve of solar cell with use of one-diode model. Results of computer analysis allow to obtain optimal parameters of the module for different environmental conditions. This paper presents modeling of I-V power output characteristics of solar module with use of PV one-diode cell equivalent circuit. Computational model has been implemented in Matlab/Simulink environment. On the basis of the model and parameters of the module delivered by manufacturer computer calculations of the I-V curves has been carried out. Results presented in this paper have shown possibility of behavior prediction of solar module in different weather condition, especially for varying cell temperature and solar radiation.

**Keywords:** photovoltaics, solar cell, I-V characteristics, computer modeling.

DOI:10.7862/rb.2014.88

*Przesłano do redakcji: 07.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Marek HAJTO<sup>1</sup>

## ZASOBY I MOŻLIWOŚCI ZAGOSPODAROWANIA WÓD TERMALNYCH W REJONIE POGÓRZA ŚRODKOWOBESKIDZKIEGO, BESKIDU ŚRODKO- WEGO ORAZ BESKIDU LESISTEGO

Artykuł przedstawia wyniki oszacowań zasobów energii geotermalnej zakumulowanej w utworach formacji fliszowej oraz w skałach podłoża fliszu karpackiego w rejonie polskiej części Karpat wschodnich, od południka Gorlic, po Bieszczady. Obszar ten obejmuje powierzchnię ok. 9830 km<sup>2</sup>, co stanowi ok. 3,2% powierzchni Polski. Przedstawiono także lokalizację perspektywicznych stref oraz wskazano możliwości i kierunki optymalnego wykorzystania wód geotermalnych do celów ciepłowniczych i/lub balneoterapeutycznych w omawianym rejonie. Prezentowane wyniki badań są efektem pogłębionych analiz, wykonanych w ramach prac statutowych Katedry Surowców Energetycznych AGH wykonanych na kanwie projektu pt. "Atlas geotermalny Karpat wschodnich", zrealizowanego przez AGH na zlecenie Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w latach 2010-2013. Obliczenia zasobów przeprowadzono z uwzględnieniem przyjętej klasyfikacji zasobów energii geotermalnej - zgodnie z diagramem McKelvey'a. Podano wielkości szacunkowe energii zakumulowanych w poszczególnych zbiornikach geotermalnych, a wyniki obliczeń odniesiono do wielkości zasobów energii geotermalnej zakumulowanych w innych regionach Polski. Relatywnie niski potencjał geotermalny stwierdzono zarówno w obrębie utworów fliszowych, jak i w zbiornikach geotermalnych mezozoiczno-paleozoicznego podłoża Karpat fliszowych. Przeprowadzone analizy wskazują, że utwory miocenu, występujące pod nasunięciem fliszu, lokalnie charakteryzują się korzystnymi własnościami zbiornikowymi. Najbardziej interesująco, z punktu widzenia możliwości wykorzystania wód geotermalnych do celów grzewczych, prezentuje się rejon Błędowej Zgłobieńskiej, ok. 15 km na zachód od Rzeszowa. Według oszacowań możliwe jest tam uzyskanie wydajności ujęć wód termalnych na poziomie ok. 30 m<sup>3</sup>/h, o temperaturze ok. 72°C i mineralizacji ok. 54 g/dm<sup>3</sup>.

**Słowa kluczowe:** energia geotermalna, zasoby geotermalne, Karpaty wschodnie, Beskidy

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Marek Hajto, AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, Wydział Geologii, Geofizyki i Ochrony Środowiska, Katedra Surowców Energetycznych, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel: +4812 617-38-39, mhajto@agh.edu.pl

## 1. Wstęp

Rejon Karpat uważany jest za światową kolebkę przemysłu naftowego. Pierwsza polska kopalnia ropy naftowej powstała w 1854 r. z inicjatywy Ignacego Łukasiewicza w Bóbrce koło Krosna. Pierwszy polski zakład destylacji ropy naftowej powstał w 1856 r. w Ulaszowicach koło Jasła, drugi w 1858 w Klęczanach, a trzeci w 1861 roku w Polance. Jedną z najstarszych rafinerii na świecie powstała w Gorlicach w 1884 roku. Analiza materiałów archiwalnych oraz baz danych, w tym PGNiG S.A. wskazuje, że we wschodniej części polskich Karpat odwiercono ponad 7500 otworów, w tym otwory poszukiwawcze, badawcze (PIG-PIB<sup>1</sup>) i eksploatacyjne. W latach 1990-2012 odwiercono na obszarze wschodniej części Karpat 245 otworów poszukiwawczych, z czego w ostatnich latach, tj. po 2010 roku 10 otworów. Od początku poszukiwań w opisywanej części Karpat odkryto 47 złóż ropy naftowej bądź ropy naftowej i gazu ziemnego. W rejonie Polskich Karpat wschodnich w 1988 roku odwiercono otwór Kuźmina-1, o głębokości 7541 m, który do tej pory jest najgłębszym otworem w Polsce. W otworze tym dokonano pomiaru najwyższej temperatury górotworu w rejonie polskich Karpat wschodnich - 178,5°C. Najwyższą temperaturę wód geotermalnych w rejonie Karpat wschodnich stwierdzono zaś w otworze Brzegi Dolne IG-1 (gm. Ustrzyki Dolne). W otworze tym, z poziomu warstw inoceramowych jednostki skolskiej, występujących na gł. ok. 4300 m, uzyskano przypływ wód o temperaturze 105°C [3]. Ostatnimi otworami, odwierconymi w tym rejonie są otwory: Niebieszczy-1 (gł. 4219 m) oraz Dukla-1 (gł. 5500 m), odwiercone w roku 2012.

Pomimo dużej ilości odwierconych otworów dotychczasowe rozpoznanie Karpat wschodnich pod względem geotermalnym jest relatywnie słabe. W zasadzie w tym rejonie Karpat nie odwiercono żadnego głębokiego, typowego otworu geotermalnego, a rozpoznanie w tym zakresie oparte jest na informacji geologicznej zawartej w dokumentacjach naftowych. W rejonie polskich Karpat wschodnich udzielono dotychczas czterech koncesji<sup>2</sup> na poszukiwanie, rozpoznanie oraz wydobywanie wód leczniczych, termalnych i solanek, w miejscowościach: Wapiennem, Wysowej, Rymanowie, Iwoniczu i Polańczyku. Jedyną wodą termalną wykorzystywaną na analizowanym obszarze jest woda kwasowęgłowa, która została udostępniona odwiertami ponaftowymi w rejonie Iwonicza: Lubatówka 12, o głębokości 1151,5 m i Lubatówka 14, o głębokości 820 m.

---

<sup>1</sup> PIG-PIB – Państwowy Instytut Geologiczny-Państwowy Instytut Badawczy

<sup>2</sup> zgodnie z obowiązującym obecnie Prawem geologicznym i górniczym (Dz.U. 2011 r. Nr 163, poz. 981) poszukiwanie, rozpoznawanie oraz wydobywanie niskotemperaturowych zasobów wód podziemnych w celach energetycznych jest działalnością nie podlegającą procedurze koncesyjnej

## **2. Lokalizacja oraz charakterystyka geograficzna i geologiczna rejonu badań**

Obszar badań zlokalizowany jest w południowo-wschodniej Polsce i obejmuje południową część województwa podkarpackiego oraz skrajną, wschodnią część województwa małopolskiego, od południka Gorlic. Oszacowania zasobów energii geotermalnej dokonano w obszarze ograniczonym linią wododziałową drugiego rzędu – na rzece Biała (na W od Gorlic) – na zachodzie, granicą państwa na wschodzie i południu oraz granicą nasunięcia Karpat fliszowych – na północy. Obszar ten zajmuje powierzchnię ok. 9830 km<sup>2</sup>, co stanowi 3,2% powierzchni Polski. Lokalizację obszaru badań na tle mapy geologiczno-strukturalnej wschodniej części Karpat Polskich przedstawiono na rysunku 1.

### **2.1. Charakterystyka geograficzna**

Zgodnie z podziałem fizyczno-geograficznym przyjętym przez Kondrackiego [10] obszar badań należy w przeważającej części do podprowincji zewnętrznych Karpat zachodnich, a niewielki fragment obejmuje Beskidy Wschodnie (Góry Sanocko-Turczańskie oraz Bieszczady Zachodnie), które należą do podprowincji Karpat wschodnich. Rzeszów zlokalizowany jest w obrębie mezoregionu Podgórze Rzeszowskiego będącego fragmentem rozciągającej się na północ makroregionu Kotliny Sandomierskiej. W obrębie Zewnętrznych Karpat zachodnich na analizowanym obszarze znajduje się Beskid Niski, będący częścią Beskidów Środkowych oraz Pogórze Środkowobeskidzkie będące pasmem wzgórz i kotlin śródgórskich o szerokości kilkudziesięciu kilometrów i wysokościach od 300 do 500 m n.p.m. z kilkoma wyższymi pasmami. Najwyższym pasmem górskim jest Pasma Połonin zaczynające się grzbietem Durnej (979 m n.p.m.). Za przełomem Wołosatki pod Ustrzykami Górnymi znajduje się najwyższa i najpiękniejsza krajobrazowo grupa Tarnicy (1346 m n.p.m.) [10].

### **2.2. Zarys budowy geologicznej**

Karpaty polskie, na wschód od południka Gorlic, graniczą z Karpatami słowackimi - od południa, a od wschodu z Karpatami ukraińskimi. Obszar wschodniej części Karpat polskich obejmuje Karpaty zewnętrzne (eksternidy), w których obrębie odsłaniają się stratygraficznie ciągłe serie osadów ilastopiaszczystych, z niewielkim udziałem skał węglanowych i tufogenicznych [1] zwanych fliszem karpackim. Allochtoniczne, głębokomorskie sfałdowane utwory fliszowe nasunięte są na młodsze, mioceńskie serie osadowe wypełniające zapadlisko przedkarpackie.

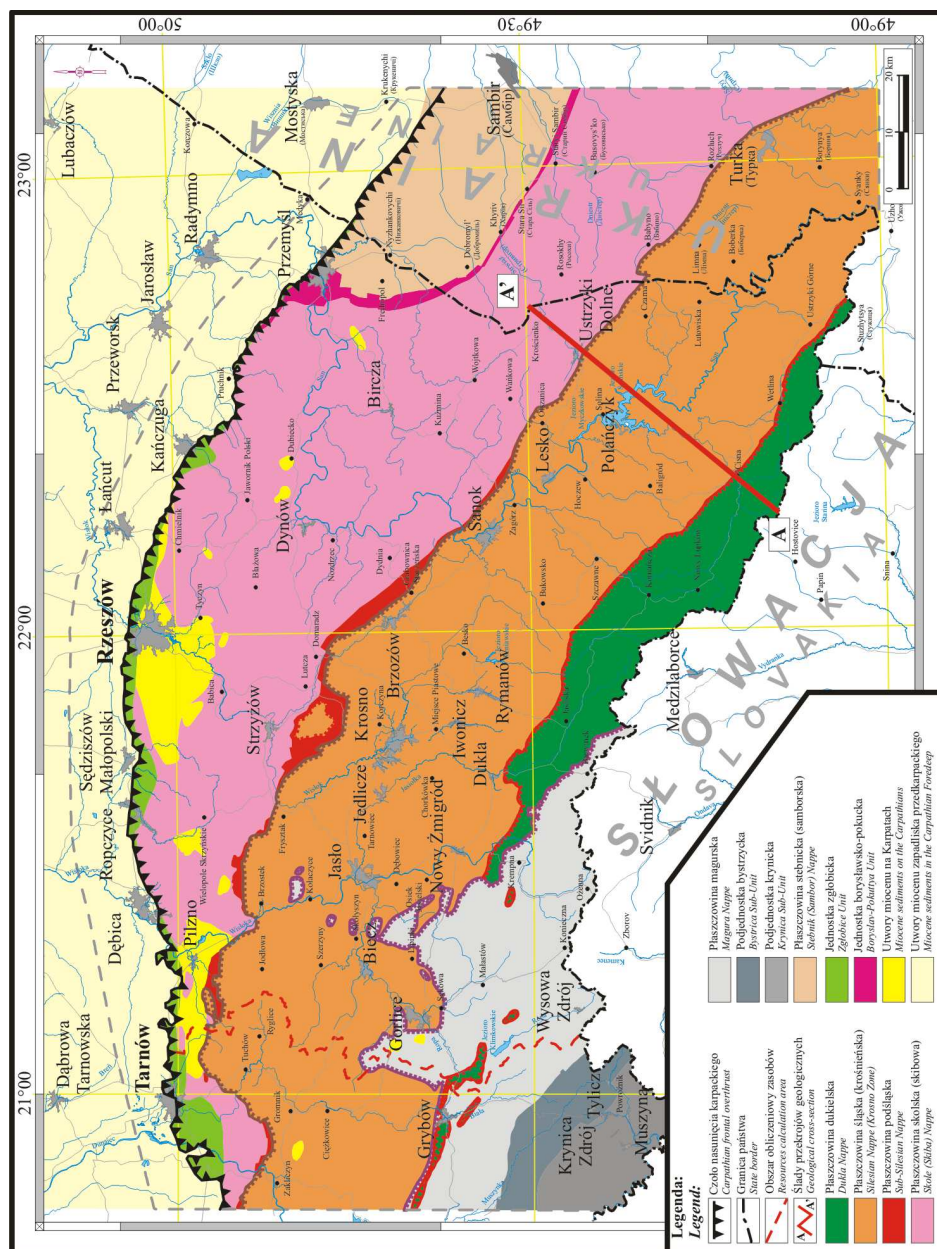
Fałdowanie Karpat zewnętrznych, w tym Beskidów, miało miejsce w końcowej fazie ruchów górotwórczych orogenezy alpejskiej, fazy sawskiej, na przełomie paleogenu i neogenu, czyli około 23 mln lat temu. Z końcem burdy-



gału w wyniku kolizji między płytą europejską i teranami Alcapy i Tiszy-Dacii Karpaty zewnętrzne zostały sfałdowane i wypiętrzone. Równocześnie został zapoczątkowany proces nasuwania Karpat na północ, połączony z formowaniem się zapadliska przedkarpackiego. Sfałdowane masy skalne zostały odrwane od podłoża, pchnięte na północ i nasunięte w formie płaszczowin na osady powstałego przed czołem Karpat zapadliska. We wschodniej strefie polskich Karpat zewnętrznych wydziela się trzy grupy jednostek strukturalno-facjalnych: magurską, średnią i brzeżną, w obrębie których można wyróżnić odrębne płaszczowiny lub jednostki strukturalno-facjalne charakteryzujące się zróżnicowanym wykształceniem litostratygraficznym i tektonicznym. Na mapie geologiczno-strukturalnej od południa możemy wyróżnić płaszczowiny: magurską, dukielską, śląską, podśląską, skolską (tzw. grupa średnia) oraz: borysławsko-pokucką, stebnicką i zgłobicką (Rys.1). Utwory serii magurskiej rozwinięte są głównie w zachodniej części Karpat polskich.

Jednostki grupy brzeżnej Karpat wschodnich: borysławsko-pokucka, zgłobicka i stebnicka [4]; [11]; [12]; [13], rozwinięte są u czoła tektogenu, a ich zasięg i miąższość redukują się drastycznie na zachód od tzw. *sigmoidy przemyskiej* [13]. Głębokość zalegania spągu utworów fliszowych, oceniona na podstawie wykonanych wierceń oraz badań sejsmicznych, jest znaczna i przekracza miejscami 6500 m p.p.m..

Miąższość pokrywy fliszowej wzrasta w kierunku południowym w kierunku tzw. *centralnej depresji karpackiej*. Podłoże tektogenu karpackiego w rejonie wschodniej części Karpat polskich zostało rozpoznane licznymi wierceniami w obszarze przedgórze, a pod nasunięciem karpackim ograniczone do strefy czołowej Karpat, o maksymalnej szerokości ok. 20-23 km. Budują go różnowiekowe skały wieku proterozoicznego, paleozoicznego oraz mezozoicznego i kenozoicznego, które wchodzi w skład bloku małopolskiego. Najstarszymi, rozpoznanymi skałami w opisywanym rejonie są zdiagenezowane i słabo zmetamorfizowane fyllity, zaliczone do późnego neoproterozoiku (ediacar) – wczesnego kambru [31]; [5]; [27]. W rozpatrywanej strefie nie stwierdzono utworów permu. Na osadach karbonu lub starszych leżą utwory triasu ([20];[21];[22]; [23];[25]). W dolnej części rozwinięte są głównie jako osady klastyczne: zlepieńce, pstry piaskowce i iłowce reprezentujące pstry piaskowiec dolny i środkowy. Wyżej występują osady węglanowe należące do retu: wapienie, dolomity oraz margle z przewarstwieniami i gniazdami anhydrytów. Wapień muszlowy (trias środkowy) wykształcony jest głównie w postaci wapieni krystalicznych. Najwyższą część triasu budują utwory kajpru, w opisywanym obszarze obecność tych utworów odnotowano tylko w odwiercie Zagorzyce-6 [19].



Rys. 1. Mapa geologiczno-strukturalna wschodniej części Karpat polskich (na podst.: [36]; [8])

Fig. 1. Geological-structural map of the Polish Eastern Carpathians (based on: [36]; [8])

Wapień muszlowy (trias środkowy) wykształcony jest głównie w postaci wapieni krystalicznych. Najwyższą część triasu budują utwory kajpru, w opi-

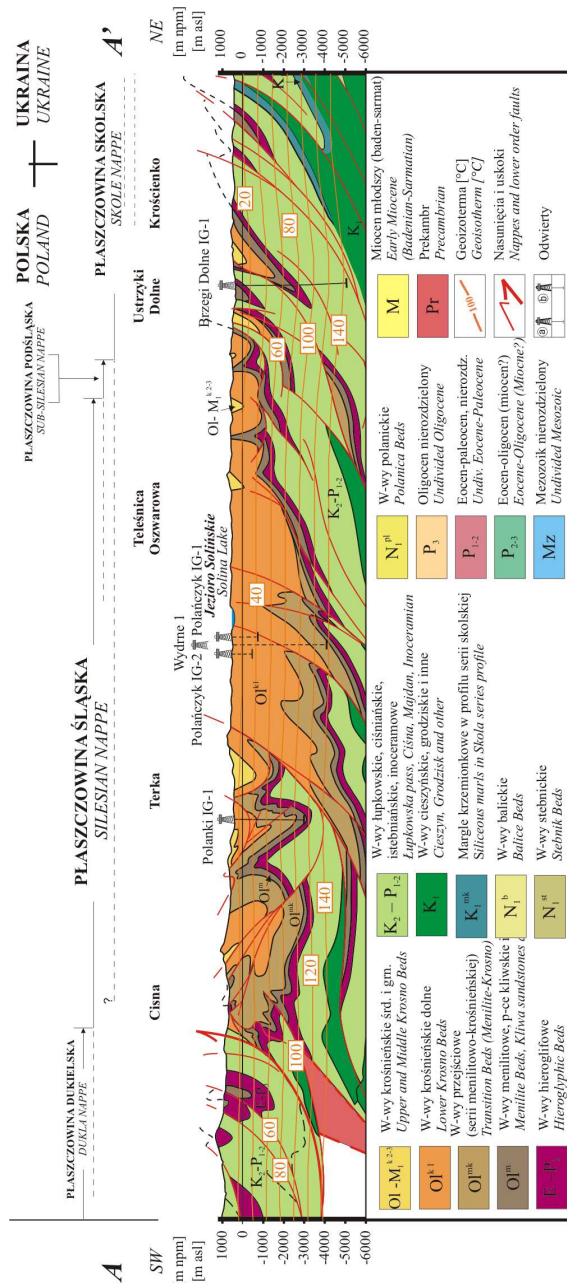
sywanym obszarze obecność tych utworów odnotowano tylko w odwiercie Zagorzycy-6 [19]. Utwory wczesnej jury, na skutek erozji, występują na bardzo ograniczonym obszarze.

Osady jurajskie reprezentowane są przez utwory jury środkowej (doggeru) - głównie piaskowce, piaskowce mułowcowe, mułowce i łupki oraz późnej jury (malmu) – utwory węglanową oksfordu, z możliwymi formami rafopodobnymi oraz wapienie i dolomity kimerydu. Całkowita miąższość utworów górnojurajskich osiąga ok. 1300 m. Kreda dolna (neokom) w obszarze polskich Karpat wschodnich występuje tylko fragmentarycznie w rejonach Dębicy i Ropczyc-Zagorzyc [9]; [26]; [34]. Są to utwory węglanowe organogeniczne i ciemne mułowce i iłowce.

Kreda górna w rejonie bloku małopolskiego reprezentowana jest przez utwory klastyczne cenomanu, są to głównie piaskowce i zlepieńce. Utwory cenomanu w rejonie polskich Karpat wschodnich mają ograniczony zasięg oraz miąższości. Wyżej tylko lokalnie występują silnie zerodowane utwory węglanowe turonu, santonu kampanu i mastrychtu. W rejonie pomiędzy Sędziszowem a Rzeszowem, w erozyjnych paleorynnach, występują osady lądowe [24] - zlepieńce, mułowce oraz iłowce, którym przypisuje się wiek paleogeński.

Najmłodsze osady występujące w podłożu utworów fliszowych to utwory molasowe miocenu tworzące tzw. zapadlisko wewnętrzne. Wiek najstarszych autochtonicznych utworów miocenu, w świetle aktualnego rozpoznania, datowany jest na *karpac* [28]. W podłożu Karpat wschodnich rozpoznane zostały dotychczas głównie morskie osady wieku środkowo-miocenowego, należące do formacji skawińskiej (baranowskiej), ewaporatów oraz formacji z Machowa. W rejonie wschodniej części Karpat polskich najdalej na południe, utwory miocenu autochtonicznego nawiercono w otworze Kuźmina-1. Utwory miocenu to głównie zlepieńce, iłowce, mułowce i piaskowce zasilone oraz utwory ewaporatowe: anhydryty, gipsy.

Wgłębną budowę geologiczną wzdłuż przekroju Cisna-Krościeno, z uwzględnieniem lokalizacji otworów Polańczyk IG-1 oraz IG-2 przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Przekrój geologiczny Cisna-Krościenko (A-A') w rejonie wschodniej części Karpat polskich (na podst.: [17])

Fig. 2. Geological cross-section Cisna-Krościenko (A-A') in the area of the Polish Eastern Carpathians (based on: [17])

### 3. Identyfikacja oraz charakterystyka potencjalnych zbiorników wód geotermalnych w rejonie polskich Karpat wschodnich

W rejonie wschodniej części polskich Karpat zbiorniki wód geotermalnych związane są głównie ze skałami klastycznymi – piaskowcami, występującymi w profilu geologicznym pokrywy fliszowej. W podłożu tektogenu występują zbiorniki hydrotermalne związane zarówno ze skałami klastycznymi, jak i węglanowymi: wapieniami i/lub dolomitami. Poniżej powierzchni nasunięcia Karpat fliszowych wody geotermalne mogą występować w zbiornikach hydrogeologicznych związanych z klastycznymi utworami: miocenu, cenomanu i kredy dolnej, jury środkowej, triasu dolnego (Tp1+Tp2), klastycznymi utworami karbonu oraz klastycznym utworami dewonu dolnego. Lokalnie, pod nasunięciem fliszowym, korzystnymi własnościami zbiornikowymi mogą charakteryzować się skały węglanowe: wapień kredy górnej (bez cenomanu), jury górnej, triasu środkowego (T2+Tp3) oraz wapień i dolomity dewonu górnego i karbonu dolnego, które tworzą jednolity poziom hydrogeologiczny. Dobre własności zbiornikowe utworów dewonu-karbonu węglanowego potwierdzono lokalnie w zachodniej części polskich Karpat zewnętrznych, w rejonie Ustronia i Bielska Białej [6].

Podstawowym litotypem skał zbiornikowych pokrywy fliszowej, występującym w rejonie polskich Karpat wschodnich są piaskowce reprezentujące niemal wszystkie poziomy stratygraficzne, począwszy od dolnej kredy, po oligocen włącznie [14]. Piaskowce fliszu charakteryzują się znacznym zróżnicowaniem litologicznym, co obserwuje się nawet w obrębie poszczególnych poziomów litostratygraficznych występujących w danej jednostce tektonicznej. Potencjalne poziomy zbiornikowe należy wiązać m.in. z utworami kredy dolnej, które stwierdzono w licznych otworach w obrębie płaszczowin: śląskiej, podśląskiej oraz skolskiej. W płaszczowinie skolskiej warstwy potencjalnie zbiornikowe dla wód geotermalnych reprezentowane są przez piaskowce występujące w obrębie serii ciemnych *tupków spaskich*, gdzie duży udział w utworzeniu ich własności zbiornikowych ma szczelinowatość.

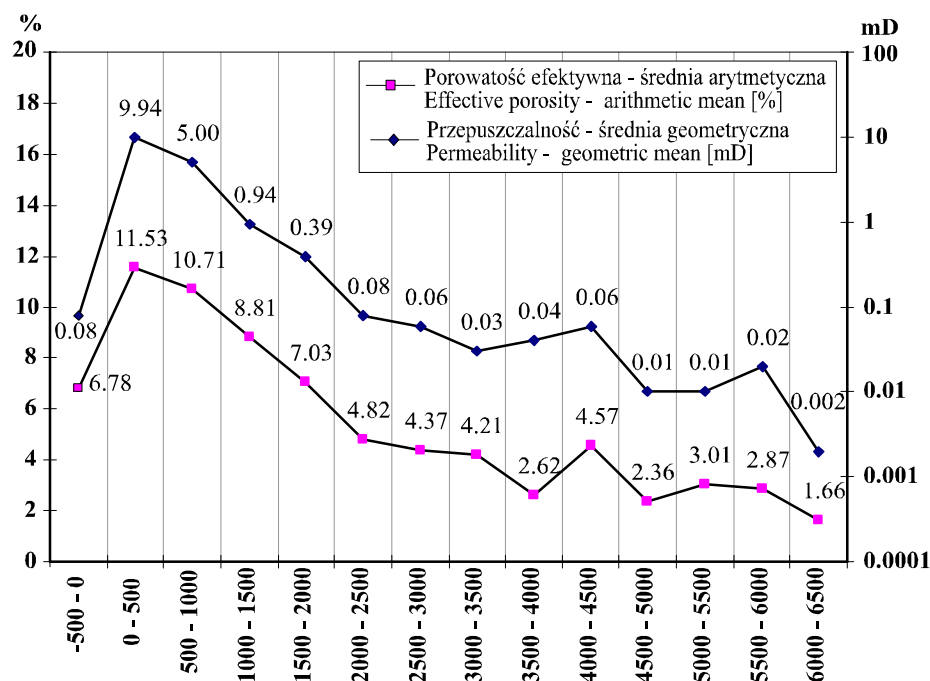
W utworach kredy górnej (senon)-paleocenu, w obrębie płaszczowiny śląskiej, występuje kompleks skał zbiornikowych, tzw. *piaskowców istebniańskich*, które osiągają największe miąższości (niesfałdowane) w rejonie jasielsko-krośnieńskim (do 2000 m) [15]. Własności zbiornikowe *piaskowców istebniańskich* są na ogół dobre. Porowatości tych piaskowców sięgają 10-15%. W obrębie płaszczowin: magurskiej, dukielskiej i skolskiej utwory kredy górnej *facji inoceramowej*, charakteryzujące się zwykle niską porowatością mogą stanowić zbiornik dla wód geotermalnych w strefach spękań w obszarach brzeżnych nasunięć. W warstwach inoceramowych płaszczowiny skolskiej porowatości wynoszą 3-18% (Słonne, Babica, Brzegi Dolne), a w płaszczowinie magurskiej ok. 11% (Sękowa, Siary). Dobre własności zbiornikowe w płaszczowinie dukielskiej stwierdzono w *warstwach ciśnieńskich*. Druga, obok *piaskowców*

*istebniańskich*, potencjalna formacja zbiornikowa dla wód geotermalnych o zasięgu regionalnym to *piaskowce ciężkowickie* wieku eocen, które stanowią najlepszą skałę zbiornikową fliszu karpackiego. W skali regionalnej w obrębie formacji ciężkowickiej zaznacza się tendencja do redukcji miąższości poszczególnych poziomów w kierunku południowo-wschodnim. Największe sumaryczne miąższości piaskowców stwierdzono w rejonie gorlicko-krośnieńskim [2], [35]. Najbardziej korzystna sytuacja, z punktu widzenia poszukiwań wód geotermalnych w obrębie *zbiornika ciężkowickiego*, występuje w rejonie Gorlic, Krosna oraz Bóbrki-Iwonicza, gdzie *piaskowce ciężkowickie* posiadają wychodnie powierzchniowe, które mogą stanowić strefy zasilania zbiornika wodami opadowymi. Piaskowce te charakteryzują się korzystnymi własnościami zbiornikowymi, tj. porowatością rzędu 15-20% oraz przepuszczalnością od ok. 50 do 600 mD [18]; [14]; [16]. W obrębie płaszczowiny skolskiej skały zbiornikowe eocenu to głównie *piaskowce hieroglifowe* występujące wśród pstrych łupków. Piaskowce występują jednak w formie soczewek o niewielkim zasięgu, są przy tym cienkoławicowe i przewarstwione łupkami, stąd ich potencjał geotermalny należy uznać jako słaby. W płaszczowinie dukielskiej występuje poziom *piaskowców przybyszewskich* w obrębie piętra hieroglifowego. Własności zbiornikowe są zbliżone do *piaskowców ciężkowickich*, lecz ich występowanie jest lokalne (np. rejon Ropianki), co w zasadniczy sposób ogranicza możliwości zakwalifikowania tego poziomu zbiornikowego jako perspektywicznego w skali regionalnej do celów eksploatacji wód geotermalnych.

Nad poziomem stratygraficznym *margli globigerynowych*, we wszystkich jednostkach strukturalno-facjalnych grupy średniej, zalega pokrywa najmłodszych osadów fliszowych, wydzielana pod nazwą serii *menilitowo-krośnieńskiej*. Piaskowce na ogół charakteryzują się słabymi własnościami zbiornikowymi, chociaż w rejonie Polańczyka, na gł. 1000-1154 m p.p.t nawiercono wodonośny poziom tych piaskowców. Wody chlorkowe eksploatowane otworami Polańczyk IG-1 oraz Polańczyk IG-2 i wykorzystywane są do celów balneoterapeutycznych, w tym krenoterapii (picia). Ujęcia charakteryzują się relatywnie niskimi wydajnościami, a zasoby eksploatacyjne zostały określone odpowiednio na 0,5 oraz 0,3 m<sup>3</sup>/h (otw. Polańczyk IG-1, IG-2). W rejonie Gorlic, występują gruboławicowe *piaskowce magdaleńskie* [33], które mogą charakteryzować się korzystnymi własnościami zbiornikowymi. Jednakże przeprowadzone dotychczas badania nie potwierdziły potencjału geotermalnego w obrębie ww. warstw.

Analiza własności hydrogeologicznych utworów fliszowych wskazuje na znaczne zróżnicowanie parametrów petrofizyczno-pojemnościowych w obrębie tych samych interwałów głębokościowych. Zmniejszenie ilości oznaczeń parametrów petrofizycznych oraz hydrogeotermalnych w obrębie głębszych partii fliszu ogranicza możliwości interpretacyjne, w tym obiektywną ocenę i określenie prawidłowości związanych z występowaniem, genezą oraz odnawialnością zasobów wód geotermalnych. Wyniki badań laboratoryjnych wskazują, że war-

tości parametrów dla utworów fliszowych zawierają się w przedziale od 0,02 do 47,8% (średnia – 9%) w przypadku porowatości efektywnej oraz od 0,001 do 2998 mD (średnia – 1,4 mD) dla przepuszczalności, natomiast dla wydzielonych przedziałów rzędnych wartości średnie mieszczą się w zakresie od 1,7 do 11,5% i od 0,002 do 9,94 mD. Zmienność wartości przepuszczalności sięga nawet kilku rzędów wielkości w podobnym przedziale głębokościowym. Według podziału Pazdry i Kozerskiego [29] utwory fliszowe można zaliczyć do półprzepuszczalnych, a lokalnie do słabo lub średnio przepuszczalnych (maks. od 2553 do 2998 mD). Zakres zmian podstawowych parametrów zbiornikowych utworów fliszowych, przedstawiona jako średnia wartość tych parametrów w interwałach głębokościowych (co 500 m), w odniesieniu do poziomu morza, przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Rozkład uśrednionych wartości porowatości i przepuszczalności utworów pokrywy fliszowej w rejonie wschodniej części Karpat polskich, w interwałach głębokościowych, co 500 m, w odniesieniu do poziomu morza

Fig. 3. Distribution of the average values of porosity and permeability of flysch cover sediments in the area of the Polish Eastern Carpathians, in the intervals of depth every 500 m to the sea level

Słabe własności hydrogeologiczne przekładają się na niskie wartości przewidywanych wydajności ujęć wód. Przy założeniu optymalnego ujęcia warstw wodonośnych, z większości wydzielonych interwałów oraz poziomów zbiornikowych nie należy spodziewać się osiągnięcia wydajności powyżej 10 m<sup>3</sup>/h

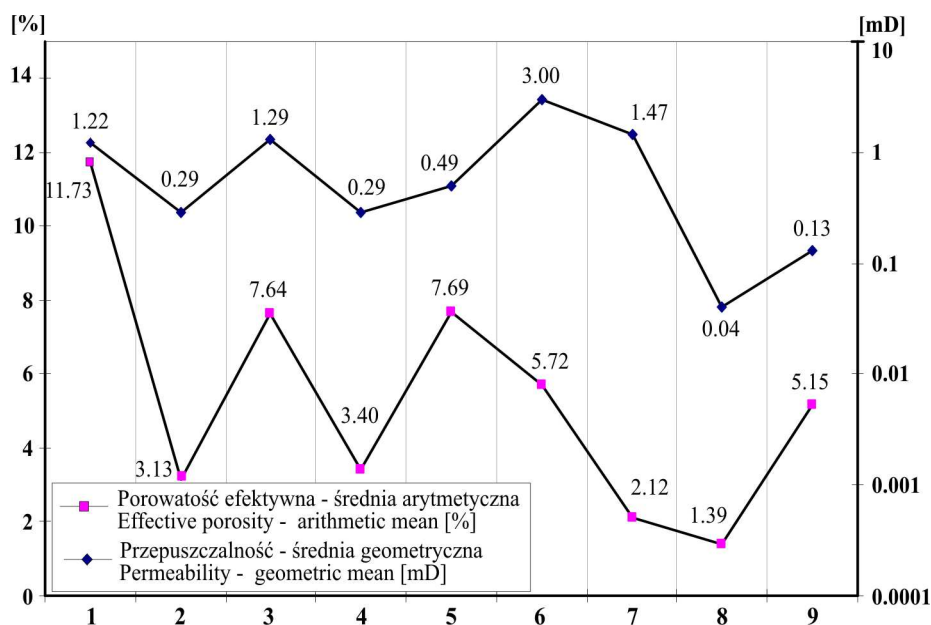


wód geotermalnych. Wody te mogą charakteryzować się zróżnicowaną temperaturą od 20 do ponad 150°C.

U czoła nasunięcia karpackiego oraz w podłożu utworów fliszowych wschodniej części Karpat polskich występują skały mioceneskie oraz mezozoiczne i paleozoiczne, których wykształcenie litologiczne wskazuje na możliwość występowania warstw wodonośnych dla wód geotermalnych. Pod nasunięciem Karpat fliszowych znajduje się zapadlisko wewnętrzne, gdzie rozpoznane zostały dotychczas głównie morskie osady wieku środkowo-mioceneskiego, które w znacznym stopniu zdominowane są przez osady ilaste i charakteryzują się niekorzystnymi własnościami zbiornikowymi. W przeważającej większości warstwy zbiornikowe zbiornika mioceneskiego charakteryzują się niską porowatością (do 5%) i niską przepuszczalnością (do 1 mD). Przy brzegu Karpat, w miejscach gdzie występują grubsze serie piaszczyste, porowatość wzrasta do 10-12%, a przepuszczalność – do ponad 10 mD. Według klasyfikacji Pazdry, Kozerskiego [29] skały te można uznać za półprzepuszczalne. Średnie wartości podstawowych parametrów zbiornikowych, określone na podstawie zgromadzonych archiwalnych badań laboratoryjnych (na rdzeniach) wynoszą: porowatość - 11,7%, a przepuszczalność ok. 1,2 mD (Rys.4). Ze względu na niezbyt korzystne właściwości zbiornikowe utworów miocenu w trefie nasunięcia karpackiego należy spodziewać się niskich wydajności ujęć wód, które na przeważającym obszarze rozpoznania zbiornika nie będą przekraczały 5 m<sup>3</sup>/h. W pojedynczych strefach, związanych głównie z lokalizacją złóż gazu oraz ropy naftowej, zauważalna jest poprawa własności zbiornikowych. Dotyczy to m.in. rejonów: Brzeźówki, Ropczyc, Husowa, Jodłówki oraz Przemyśla, gdzie potencjalne wydajności ujęć wód geotermalnych oszacowano na 5-10 m<sup>3</sup>/h. Wyjątkowo wyższych wydatków, do 20-30 m<sup>3</sup>/h, można spodziewać się na południowo-zachód od Rzeszowa, gdzie zlokalizowano złoża Nosówka i Kielanówka, a w szczególności w rejonie Błędowej Zgłobieńskiej, gdzie można oczekiwać wydajności ujęć ok. 30 m<sup>3</sup>/h. Przeprowadzone analizy wskazują, że spośród powyższych utworów, lokalnie osady miocenu charakteryzują się korzystnymi własnościami zbiornikowymi, ze średnią porowatością efektywną wynoszącą 11,7% i przepuszczalnością 1,2 mD (Rys.4). Niestety ze względu na małą ilość oznaczeń parametrów petrofizycznych, określenie średnich wartości porowatości i przepuszczalności skał zbiornika triasu środkowego nie było możliwe.

W przypadku pozostałych wydzieleni stratygraficznych, średnia porowatość efektywna utworów wynosi na ogół kilka procent, a przepuszczalność nie przekracza 1 mD. Zgodnie z klasyfikacją Pazdry i Kozerskiego (1990) można je zaliczyć do skał nieprzepuszczalnych bądź słabo przepuszczalnych.





Rys. 4. Rozkład uśrednionych wartości porowatości i przepuszczalności utworów miocenu oraz utworów mezozoiczno-paleozoicznego podłoża w rejonie wschodniej części Karpat polskich.

1- miocen, 2- kreda górna bez cenomanu, 3- cenoman-kreda dolna, 4- jura górna, 5- jura środkowa, 6- trias dolny, 7- karbon klastyczny, 8- karbon i dewon węglanowy, 9- dewon dolny

Fig. 4. Distribution of the average values of porosity and permeability of Miocene sediments and Mesozoic-Paleozoic basement in the area of the Polish Eastern Carpathians.

1- Miocene, 2- Upper Cretaceous without Cenomanian, 3- Cenomanian-Lower Cretaceous, 4- Upper Jurassic, 5- Middle Jurassic, 6- Lower Triassic, 7- Carboniferous (clastic), 8- Carboniferous and Devonian (carbonate), 9- Lower Devonian

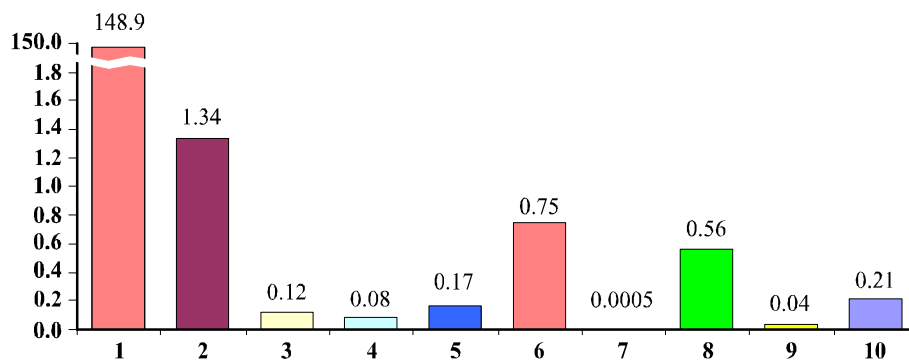
Utworky zaliczone do średnio przepuszczalnych występują w obrębie miocenu, gdzie maksymalne wartości przepuszczalności sięgają 3102 mD. Skały o wyższej przepuszczalności występują sporadycznie w utworach kredy dolnej (max. 605 mD), jur górnej (max. 474 mD) oraz triasu dolnego (max. 901 mD). Wody stwierdzone w utworach młodszego paleozoiku należą do silnie zmineralizowanych solanek chlorkowo-sodowo-wapiennych. Mineralizacja ogólna wód jest wysoka, od ok. 120-150 g/dm<sup>3</sup> – w rejonie Gromnika i Zakliczyna, do 210-240 g/dm<sup>3</sup> – między Tarnowem i Pilzmem oraz w rejonie Rzeszowa.

#### 4. Zasoby energii geotermalnej w rejonie polskich Karpat wschodnich

Dotychczasowe rozpoznanie warunków geotermalnych oraz zasobów energii cieplnej zakumulowanych w wodach podziemnych w rejonie Karpat wschodnich ma charakter punktowy, a informacje dotyczą zwykle możliwości

wykorzystania wód geotermalnych dla wskazanej lokalizacji. Wielkości zasobów energii geotermalnej oszacowano zgodnie z podziałem zastosowanym przez McKelvey'a, gdzie wydziela się zasoby: dostępne, statyczne, statyczne-wydobywalne, dyspozycyjne oraz eksploatacyjne. Ocenie zasobów energii geotermalnej poddano dwanaście potencjalnych zbiorników wód wstępnych zlokalizowanych w rejonie polskich Karpat wschodnich. Są to zbiorniki: fliszowe (skolski, śląski, dukielski), mioceński, górnokredowy (bez cenomanu), cenomanu-kredy dolnej, górnourajski, środkourajski, triasu środkowego (ret – wapień muszlowy), dolnotriasowy (dolny i środkowy pstry piaskowiec), karboński (karbon klastyczny), dewońsko-karboński (zbiornik węglanowy).

Oszacowania zasobów geotermalnych wskazują na szczególnie niski potencjał geotermalny polskich Karpat wschodnich. Zasoby dostępne energii geotermalnej zostały oszacowane na  $2,95 \cdot 10^{21} \text{J}$  (ok. 3,8% zasobów Niżu Polskiego), statyczne na  $6,37 \cdot 10^{20} \text{J}$  (ok. 4,4%), a statyczne-wydobywalne na  $1,52 \cdot 10^{20} \text{J}$  (5,2%) [7]. Rysunek 5 przedstawia wielkości zasobów statycznych-wydobywalnych energii zakumulowanych w skałach i wodach wydzielonych zbiorników geotermalnych. Regionalna analiza parametrów hydrogeologicznych, uzupełniona wskaźnikowa analizą ekonomiczną, wskazuje na brak zasobów dyspozycyjnych i bardzo ograniczone możliwości ekonomicznego wykorzystania wód geotermalnych do celów grzewczych w badanym rejonie. Wydajności ujęć i temperatury wód, wskazują na możliwości budowy niewielkich instalacji ciepłowniczych o mocach od kilkuset kW, do maksymalnie 5 MWt.



Rys. 5. Zasoby statyczne-wydobywalne energii geotermalnej zakumulowane w poszczególnych zbiornikach wód geotermalnych w Karpatach wschodnich.

1- flisz (łącznie), 2- miocen, 3- kreda górna bez cenomanu, 4- cenoman-kreda dolna, 5- jura górna, 6- jura środkowa, 7- trias środkowy, 8- trias dolny 9- karbon klastyczny, 10- karbon i dewon węglanowy

Fig. 5. Static-recoverable resources of energy accumulated in selected geothermal reservoirs in the Eastern Carpathians.

1- Flysch (together), 2- Miocene, 3- Upper Cretaceous without Cenomanian, 4- Cenomanian-Lower Cretaceous, 5- Upper Jurassic, 6- Middle Jurassic, 7- MiddleTriassic, 8- Lower Triassic, 9- Carboniferous (clastic), 10- Carboniferous and Devonian (carbonate)

## 5. Obszary perspektywiczne dla wykorzystania wód geotermalnych w rejonie polskich Karpat wschodnich

Analiza warunków hydrogeologicznych występowania wód wgłębnych oraz charakterystyka podstawowych parametrów zbiornikowych utworów fliszowych oraz potencjalnych poziomów zbiornikowych miocenu i mezozoiczno-paleozoicznego podłoża Karpat wschodnich wskazuje na relatywnie słabe własności hydrogeologiczne utworów budujących profil geologiczny do gł. 4000 m p.p.m. Przekłada się to na niskie wartości przewidywanych wydajności ujęć wód. Przy założeniu optymalnego ujęcia warstw wodonośnych z większości wydzielonych interwałów oraz poziomów zbiornikowych nie należy spodziewać się osiągnięcia wydajności powyżej 10 m<sup>3</sup>/h wód geotermalnych. Wody te mogą charakteryzować się zróżnicowaną temperaturą od 20 do ponad 150°C. Nieco bardziej korzystne parametry hydrogeologiczne związane są z kilkoma interwałami głębokościowymi występującymi w obrębie utworów fliszowych płaszczowiny skolskiej i ślaskiej oraz w utworach miocenu, środkowej jury i w utworach dewonu-karbonu węglanowego. W rejonach o nieco lepszych parametrach hydrogeologicznych można ewentualnie rozważyć możliwości wykorzystania ciepła wód geotermalnych do zastosowań grzewczych, przy wspomaganie przez inne źródła ciepła, np.: pompa ciepła, kocioł na biomasę itp. Obszarem perspektywicznym, dobrze rozpoznany i udokumentowany do wykorzystania zasobów wód termalnych kwasowęglowych w balneoterapii jest rejon Lubatówki. Wody termalne eksploatowane są dwoma odwiertami Lubatówka 12 i Lubatówka 14 i są one wykorzystywane jedynie częściowo. W obrębie utworów fliszowych można wydzielić kilka obszarów gdzie nieco lepsze parametry zbiornikowe występują w obrębie różnych interwałów głębokościowych, są to np. rejony: Rzeszów-Tyczyn-Chmielnik (gł. 500-1000 m ppm, 10-12 m<sup>3</sup>/h, temp. wód 30-31°C, mineralizacja 40-60g/dm<sup>3</sup>), Krościenko-Wojtkowa (gł. 500-1000 m ppm, ok. 12 m<sup>3</sup>/h, temp. wód 30-34°C, mineralizacja 40-50g/dm<sup>3</sup>), rejon Brzozowa (gł. 2000-2500 m ppm, 10-13 m<sup>3</sup>/h, temp. wód 80°C, mineralizacja 40-60g/dm<sup>3</sup>), Zagorzyce-Babica-Strzyżów-Domaradz (gł. 2500-3000 m ppm, 10-13 m<sup>3</sup>/h, temp. wód ok. 80-95°C, mineralizacja wód ok. 30-60 g/dm<sup>3</sup>), Dubiecko (gł. 2500-3000 m ppm, 15 m<sup>3</sup>/h, temp. ok. 80°C, mineralizacja wód ok. 40-60 g/dm<sup>3</sup>), rejon Dynowa (gł. 3000-3500 m ppm, 8 m<sup>3</sup>/h, po intensyfikacji 12 m<sup>3</sup>/h, temperatura wód ok. 95-100°C, mineralizacja wód ok. 43 g/dm<sup>3</sup>), NE od Krosna (gł. 3000-3500 m ppm, 24 m<sup>3</sup>/h, temperatura wód pow. 110°C, mineralizacja wód ok. 40-60 g/dm<sup>3</sup>), na E od Błazowej (gł. 3500-4000 m ppm, potencjalne wydajności ujęć ok. 10-12 m<sup>3</sup>/h, temperatura wód ok. 110-115°C, mineralizacja wód ok. 40-50 g/dm<sup>3</sup>), na E od Frysztaka (gł. 3500-4000 m ppm, wydajności ujęć do ok. 24 m<sup>3</sup>/h, temperatura wód ok. 110-120°C, a mineralizacja wód ok. 40-50 g/dm<sup>3</sup>), rejon Jedlicz (gł. 2500-3000 m ppm, potencjalne wydajności ujęć do 20 m<sup>3</sup>/h, temperatura wód ok. 90°C, mineralizacja wód ok. 20-30 g/dm<sup>3</sup>), Gorlice (gł. 3500-4000, wydajności ujęć ok. 10

$\text{m}^3/\text{h}$ , temperatura wód ok.  $120\text{-}130^\circ\text{C}$ , mineralizacja wód poniżej  $30 \text{ g}/\text{dm}^3$ ), rejon Szczawnego (potencjalne wydajności ujęć do ok.  $30 \text{ m}^3/\text{h}$ , temperatura wód ok.  $130^\circ\text{C}$ , mineralizacja wód ok.  $20 \text{ g}/\text{dm}^3$ ). W obrębie utworów miocenu najbardziej perspektywicznie prezentuje się rejon Błędowej Zgłobieńskiej, na SW od Rzeszowa. W powyższej lokalizacji należy spodziewać się potencjalnych wydajności ujęć ok.  $32 \text{ m}^3/\text{h}$ , o temperaturze wód ok.  $72^\circ\text{C}$  i mineralizacji ok.  $54 \text{ g}/\text{dm}^3$ .

Z pozostałych zbiorników niewielki potencjał wód geotermalnych związany jest ze szczelinowymi zbiornikami jury środkowej oraz karbonu-dewonu. Analizy wykazały, że w rejonie Tarnowa oraz Sędziszowa Małopolskiego można spodziewać się wydajności ujęć ok.  $16\text{-}20 \text{ m}^3/\text{h}$ . Przewidywane temperatury wód będą wnosiły ok.  $70\text{-}80^\circ\text{C}$ . Wody te będą charakteryzowały się znaczną mineralizacją, powyżej 120, a nawet, w przypadku zbiornika karbonu-dewonu -  $200 \text{ g}/\text{dm}^3$ .

Zasadniczy problem przy projektowaniu ujęć wód termalnych w rejonie karpackim może być związany z wydajnością ujęć. Jak wskazują dotychczasowe badania, zbiorniki wód w obrębie utworów fliszowych mają charakter zamknięty i nie posiadają dostatecznego zasilania wodami meteorycznymi. Dotychczasowe badania wskazują, że wody podziemne są mieszaną wód dehydracyjnych, reliktowych wód morskich zmienionych diagenetycznie w różnym stopniu oraz podrzędnie wód meteorycznych, t.j. wód infiltracyjnych współczesnego cyklu hydrologicznego i/lub paleoinfiltracyjnych [30]. Na obszarze Karpat wschodnich występują również cenne wody mineralne i lecznicze. Są to szczawy i wody kwasowęglowe, wody siarczkowe wyprowadzane licznymi źródłami, oraz wody chlorkowe (solanki) często termalne, udokumentowane licznymi wierceniami poszukiwawczymi i nie są obecnie wykorzystywane. Wody o podwyższonych temperaturach, głównie typu Cl-Na+I, kwalifikujące się do potencjalnego wykorzystania występują powszechnie w obrębie całych Karpat wschodnich. Składnikiem swoistym występującym powszechnie w wodach chlorkowych Karpat wschodnich jest jod (I-). Szczawy i wody kwasowęglowe na analizowanym obszarze występują w rejonie miejscowości uzdrowskich: Wysowa, Iwonicz i Rymanów. Wody typu szczawy i wody kwasowęglowe występują również w Rabem koło Baligrodu, gdzie nie są wykorzystywane. Wody siarczkowe na obszarze Karpat wschodnich wykorzystywane są w balneoterapii jedynie w uzdrowisku Wapienne, gdzie istnieje możliwość zwiększenia bazy leczniczej. Wody siarczkowe udokumentowano w miejscowościach: Nieborów, Folsz, Lesko, Czarna, Lubenia, Szklary.

Bogactwo wód mineralnych i leczniczych w rejonie polskich Karpat wschodnich daje szerokie możliwości rozwoju regionu karpackiego, na drodze inwestycji w rozbudowę bazy leczniczej i sanatoryjnej.

## Literatura

- [1] Bieda F. Geroch S., Koszarski L., Książkiewicz M., Żytko K., 1963: stratigraphie des Karpates externes Polonaise. Biuletyn Instytutu Geologicznego, 181: 5-174.
- [2] Bromowicz J., Górniak K., Przysaś G., Rembiś M., 2001: Wyniki badań petrograficznych typowych litofacji zbiornikowych fliszu karpackiego. [W:] Kuśmierek et al. (red.): Charakterystyka parametrów petrofizycznych fliszowych serii ropogazonośnych Karpat polskich. Polish Journal of Mineral Resources, 4: 31-75.
- [3] Chowaniec J., Poprawa D., Witek K., 2001: Występowanie wód termalnych w polskiej części Karpat. [W:] Rola energii geotermalnej w zrównoważonym rozwoju regionów”, IV Seminarium Bukowina Tatrzańska, 8-10 Października 2001, Wyd. IGSMiE PAN. Kraków. 89-114.
- [4] Gluško V. V., 1968: Tektonika i neftegazonosnost' Karpat i prilegajűschih progibov. Nedra, Moskwa, 1-263.
- [5] Głowacki E., Karnkowski P., Źak C., 1963: Prekambr i kambr w podłożu przedgórza Karpat środkowych i w Górach Świętokrzyskich. Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego, 33, 3: 321-338.
- [6] Górecki W. (red.), 2011: Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat zachodnich. Wyd. AGH KSE, Kraków.
- [7] Hajto M., 2013: Ocena zasobów wód i energii geotermalnej w Karpatach wschodnich [W:] Atlas zasobów wód i energii geotermalnej Karpat zachodnich. Wyd. AGH KSE, Kraków 499-595.
- [8] Jankowski L., Kopciowski R., Ryłko W., 2004: Geological Map of the Outer Carpatians: Borderlands of Poland, Ukraine and Slovakia 1:200 000. Wydawnictwo PIG, Warszawa.
- [9] Kijakowa S., Moryc W., 1991: Nowe stanowisko z epikontynentalnymi utworami kredy dolnej w rejonie Dębicy. Kwartalnik Geologiczny, 35, 4: 421- 436.
- [10] Kondracki J., 2009: Geografia regionalna Polski. Wyd. Nauk. PWN, Warszawa.
- [11] Książkiewicz M., 1972: Budowa geologiczna Polski. IV – Tektonika, 3-Karpaty. Wyd. Geol. Warszawa, 228: 1-228.
- [12] Kuśmierek J., 1984: Uzasadnienie perspektyw ropo- i gazonośności formacji fliszowej we wschodniej części polskich Karpat i propozycje udokumentowania zasobów. [W:] Ocena prognoz i efektywności poszukiwań ropy i gazu ziemnego w Polsce. Materiały Konferencji Komitetu Gospodarki Surowcami Mineralnymi, PAN. Wydawnictwa AGH, Kraków, 27-49.
- [13] Kuśmierek J., 1990 – Zarys geodynamiki centralnokarpackiego basenu naftowego. Polska. Prace Geol. Kom. Nauk Geol. PAN. Oddz. w Krakowie, 1-135.
- [14] Kuśmierek J. (red.) et. al., 2001a: Charakterystyka parametrów petrofizycznych fliszowych serii ropogazonośnych Karpat Polskich. Polish Journal of Mineral Resources. Kraków. Towarzystwo Geosynoptyków „GEOS”.
- [15] Kuśmierek J. et al., 1991-94: Bilans zasobów węglowodorów basenu centralnokarpackiego. Projekt badawczy nr 9 0427 91 01, finansowany przez KBN, Warszawa, 1-105.
- [16] Kuśmierek J., Semyrka R., 2003: Zmienność cech zbiornikowych przestrzeni porowoszczelinowej piaskowców karpackich i ich kwalifikacja naftowa. Przegląd Geologiczny, 51(9): 732-743.

- [17] Kuśmierek J., Baran U., Golonka J., 2013: Charakterystyka tektoniczna i geologiczna wschodniej części Karpat polskich oraz strefy transgranicznej z Ukrainą. [W:] Górecki (red.) - Atlas geotermalny Karpat wschodnich. Wyd. AGH KSE, Kraków.
- [18] Lenk T., 1980: Charakterystyka facjalno-strukturalna serii zbiornikowych fliszu karpackiego w aspekcie poszukiwań naftowych. Prace IGNiG, Kraków.
- [19] Maksym A., Liszka B., Petrosiak M., 1998: Analiza geologiczno – geofizyczna utworów autochtonicznych miocenu i jego podłoża w rejonie Sędziszów – Rzeszów – Zalesie. Etap I. Podłoże trzeciorzędu. Arch. Biura Geologicznego Geonafta, Jasło.
- [20] Moryc W., 1971a: Katalog wierceń górnictwa naftowego w Polsce. Synklinorium Miechowskie, Wyd. Geol. Warszawa. 223-322.
- [21] Moryc W., 1971b: Trias Przedgórze Karpat środkowych. Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego, 41, 3: 419-484.
- [22] Moryc W., 1971c: Trias przedgórze Karpat Środkowych. Rocznik Polskiego Towarzystwa Geologicznego, 41, 3: 419-486.
- [23] Moryc W., 1992: Budowa geologiczna utworów podłoża miocenu w rejonie Sędziszów Młp. – Rzeszów i ich perspektywiczność. Nafta-Gaz, 9-10: 205-223.
- [24] Moryc W., 1995: Lądowe utwory paleogenu na obszarze przedgórze Karpat. Nafta-Gaz, 5: 181-195.
- [25] Moryc W., 1996: Budowa geologiczna podłoża miocenu w rejonie Pilzno – Dębica – Sędziszów Małopolski. Nafta-Gaz, 12: 521-550.
- [26] Moryc W., 1997: The Lower Cretaceous in the pre – Miocene substratum of the southern part of the Carpathian Foredeep in Poland. Annal. Societ. Geol. Polon. 67: 287-296.
- [27] Moryc W., Łydka K., 2000: Sedimentation and tectonics of the Upper Proterozoic-Lower Cambrian deposits of the southern Małopolska Massif (SE Poland). Kwartalnik Geologiczny, 44, 1: 47-58.
- [28] Oszczytko N., 2006: Powstanie i rozwój polskiej części zapadliska przedkarpackiego. Przegląd Geologiczny, 54, 5: 396-403.
- [29] Pazdro Z., Kozerski B., 1990: Hydrogeologia ogólna. Wydanie IV, uzupełnione. Wyd. Geol., Warszawa: 1-624.
- [30] Porowski A., 2006: Origin of mineralized waters in the Central Carpathians Synclinorium, SE Poland. Studia Geol. Pol. Hydrogeology and Hydrogeochemistry, 125: 1-67.
- [31] Samsonowicz J., 1955: O górnym prekambrze (ryfeju) w Polsce. Przegląd Geologiczny, 3, 12: 588-589.
- [32] Świdzki B., 1952: Z zagadnień tektoniki Karpat północnych. Prace Instytutu Geologicznego, Warszawa. 8.
- [33] Świdziński H., 1947: Słownik stratygraficzny północnych Karpat fliszowych. Biuletyn PIG, 37, Warszawa.
- [34] Urbaniec A., Bobrek L., Świetlik B., 2010: Litostratygrafia i charakterystyka mikropaleontologiczna utworów kredy dolnej w środkowej części przedgórze Karpat. Przegląd Geologiczny, 58, 12: 1161-1175.
- [35] Żytka K. (red.), 1973: Przewodnik geologiczny „Po wschodnich Karpatach fliszowych”. Wyd. Geol. Warszawa. 1-222.
- [36] Żytka K., Gucik S., Oszczytko N., Zając R., Garlicka I., Nemčok J., Eliaš M., Menčík E., Dvorak J., Stranik Z., Rakuš M., Matejovska O., 1989: Geological Map of the

Western Outer Carpathians and their foreland without Quaternary formations, [In:] Poprawa D., Nemčok J., (eds.) Geological Atlas of the Western Carpathians and their Foreland. Państwowy Instytut Geologiczny, Warszawa, Poland.

## **GEOHERMAL RESOURCES AND POSSIBILITIES OF USE OF GEOHERMAL WATERS I THE AREA OF ŚRODKOWOBESKIDZKE FOOTHILLS, MIDDLE BESKIDY AND BESKID LESISTY**

### **S u m m a r y**

The article presents the results of estimation of geothermal energy resources in flysch formations, and the Miocene, Mesozoic and Paleozoic basement of the flysch in the area of the Polish Eastern Carpathians from the meridian of Gorlice to the Bieszczady Mts. This area covers approximately 9830 km<sup>2</sup>, which is ca. 3.2% of the Polish territory. The paper also shows the location of the prospective zones, possibilities and directions of optimal use of geothermal waters for heating purposes and/or balneotherapy in this area. The study represents the result of profound analyzes, carried out within the framework of the statutory work of the Department of Fossil Fuels, AGH-UST, supplied in the project entitled "Geothermal Atlas of the Eastern Carpathians", issued by AGH-UST, on behalf of the Ministry of Science and Higher Education in the years 2010-2013. The calculations were carried out according to the McKelvey's geothermal energy resources classification. The estimates of energy accumulated in individual geothermal aquifers and the results of calculations are referred to the size of geothermal energy resources accumulated in other geothermal provinces of Poland. The relatively low geothermal potential was found as well in the flysch cover as in the geothermal aquifers of the Mesozoic-Paleozoic basement. The analyzes show that the Miocene aquifers covered with flysch sediments are locally characterized by favourable reservoir properties. The most interesting aquifers, from the point of view of possibility of using geothermal water for heating purposes, are present in the area of Błędowa Zgłobieńska, about 15 km west of Rzeszów. According to the estimates, it is possible to set up a small power plant which will use thermal water with intakes at approximately 30 m<sup>3</sup>/h, with a temperature of about 72°C and TDS of ca. 54 g/dm<sup>3</sup>.

**Keywords:** geothermal energy, geothermal resources, Eastern Carpathians, Beskydy Mts.

*"Artykuł przygotowano w ramach prac statutowych Katedry Surowców Energetycznych AGH nr 11.11.140.321"*

DOI:10.7862/rb.2014.89

*Przesłano do redakcji: 06.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Arkadiusz JAMROZIK<sup>1</sup>

Adam GŁUSZEK<sup>2</sup>

Arkadiusz OLEJNIK<sup>3</sup>

## NOWOCZESNE METODY MAGAZYNOWANIA ENERGII

W najbliższych latach, wraz z pogłębianiem się problemów energetycznych świata i coraz szerszym wykorzystywaniem odnawialnych źródeł energii bardzo istotnym zagadnieniem stanie się magazynowanie energii. Opracowywane i ciągle udoskonalane technologie gromadzenia energii mają przyczynić się przede wszystkim do rozwiązania problemu pokrycia zapotrzebowania na energię w okresach szczytów energetycznych wywołanych nagłymi zmianami zużycie energii elektrycznej. W pracy przedstawiono najbardziej obiecujące rozwiązania w zakresie kumulacji energii z różnych źródeł. Omówiono wybrane metody magazynowania energii, w tym metody chemiczne, elektrochemiczne, mechaniczne oraz elektryczne. W metodach chemicznych, energię najczęściej gromadzi się produkując paliwa tj. wodór. Odzyskanie energii z paliw może być zrealizowane np. na drodze ich spalania. Metody elektrochemiczne bazują na akumulatorach, w tym najnowocześniejszych akumulatorach przepływowych. W metodach mechanicznych na szczególną uwagę zasługuje magazynowanie energii w sprężonym powietrzu, a wśród metod elektrycznych przyszłością jest superkondensator, przykład bezpośredniego magazynu energii. Aby móc efektywnie wykorzystywać prezentowane rozwiązania, znaczna ich część wymaga jednak udoskonalenia, poprawy sprawności i obniżenia kosztów eksploatacji. Należy przypuszczać, że zwłaszcza ekologiczne korzyści stosowania systemów magazynujących energię, spowodują w najbliższej przyszłości wzrost zainteresowania i inwestycji dla tego typu instalacji. Dopóki jednak koszty instalacyjne takich przedsięwzięć nie zmaleją, a sprawności ogólne nie wzrosną, będą one w większości przypadków wykorzystywane jedynie do badań i prób, a nie do realnego podniesienia sprawności energetycznej przedsiębiorstw produkujących energię elektryczną.

**Słowa kluczowe:** energia elektryczna, odnawialne źródła energii, kumulacja energii, magazyny energii

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Arkadiusz Jamrozik, Instytut Maszyn Ciepłych, Politechnika Częstochowska, Armii Krajowej 21, 42-201 Częstochowa, jamrozik@imc.pcz.czyst.pl

<sup>2</sup> Adam Głuszek, Politechnika Częstochowska, adam\_ga@poczta.fm

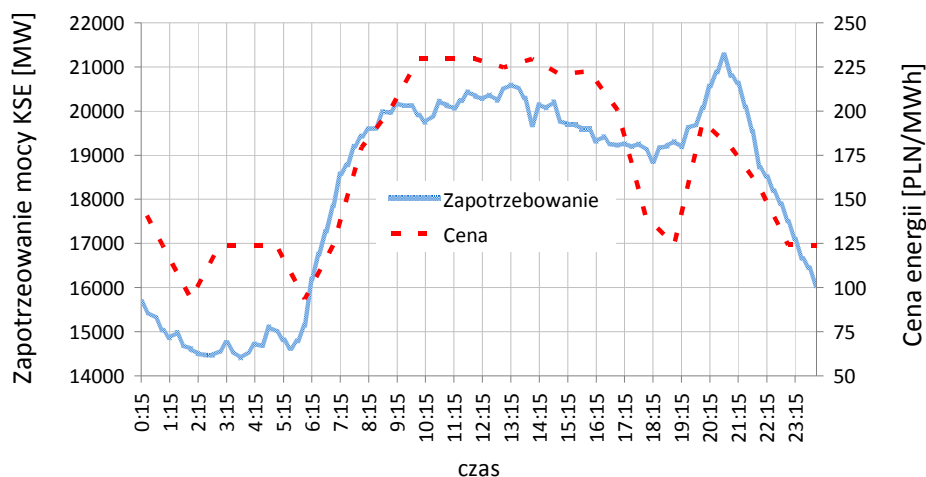
<sup>3</sup> Arkadiusz Olejnik, Politechnika Częstochowska, olejnik.arkadiusz@gmail.com



## 1. Wprowadzenie

W dzisiejszych czasach, bardzo uzależniliśmy się od dostaw energii elektrycznej i nie wyobrażamy sobie życia bez bieżącego dostępu do niej. Prąd elektryczny jest specyficznym rodzajem energii, którego produkcja musi w tej samej chwili pokrywać się z zapotrzebowaniem. Największe jednostki produkujące prąd to zazwyczaj elektrownie opalane węglem bądź elektrownie atomowe. Charakteryzują się one bardzo niską elastycznością na obciążenie, a także spadkiem sprawności podczas pracy odbiegającej od warunków nominalnych. W związku z tym nie nadążają za zmianami zużycia energii elektrycznej, które uzależnione jest od wielu czynników takich jak: pora dnia, pora roku, temperatura itp.

Na rysunku 1 możemy zauważyć szczyty i doliny dobowego zapotrzebowania na moc w Polsce. Widać, że w godzinach porannych następuje gwałtowny wzrost, a w nocy gwałtowny spadek zapotrzebowania na moc, sięgający około 5500 MW [1]. Aby zrekompensować taką różnicę należałoby w ciągu doby raz dostarczyć, a raz ograniczyć doprowadzaną moc o wartości porównywalnej do mocy elektrowni w Bełchatowie - 5342 MW, która jest największą elektrownią w Polsce. Uruchomienie bądź zatrzymanie elektrowni o takiej mocy jest jednak procesem złożonym i musi trwać co najmniej kilka godzin. W tak długim okresie czasu mogłoby się okazać, że zapotrzebowanie nagle się zmieniło. Próby reagowania na ciągłe zmiany w zapotrzebowaniu na moc (wygaszanie i rozpalamie na nowo kotłów parowych w elektrowniach) generuje ogromne straty, zwiększa zużycie węgla i powoduje spadek sprawność.



Rys. 1. Wykres krajowego dobowego zapotrzebowania na energię i jej cena w dniu 22 kwietnia 2014 roku, na podstawie [1]

Fig. 1. Chart of the national daily demand for energy and its price on 22 April 2014, based on [1]

Powstaje więc pytanie: co zrobić z nadmiarem energii? Odpowiedź nasuwa się sama - magazynować, i wykorzystywać w czasie „szczytów zapotrzebowania”. Patrząc na magazynowanie energii pod kątem bilansu energetycznego, nie jest to praktyczne rozwiązanie gdyż, energia którą zużyjemy w celu jej zmagazynowania będzie zawsze większa od tej której uzyskamy z „magazynu”. Nie wolno nam jednak rozpatrywać tego zagadnienia tylko pod jednym kątem. Analizując problem z ekonomicznego punktu widzenia, rozwiązanie to może być opłacalne. Magazynowanie będzie rentowne wtedy, gdy zużywać będziemy energię podczas gdy jej ceny są niskie, a oddawać (sprzedawać) w momencie najwyższych cen. Również pod względem technicznym magazynowanie spełnia swoje cele, gdyż poprawia jakość prądu w sieci elektroenergetycznej.

Obecnie wzrost popularności „magazynów” energii, wynika z rozwoju odnawialnych źródeł energii OZE, ponieważ produkcja energii z takich źródeł jest bardzo zmienna i lepiej jest ją zmagazynować i oddać w sposób zrównoważony. Do racjonalnego wykorzystania OZE niezbędne jest więc magazynowanie używanej energii.

## 2. Rodzaje metod magazynowania energii

### 2.1 Metody chemiczne

Nadmiar energii możemy wykorzystać do produkcji paliw takich jak metanol, metan czy wodór, a następnie odzyskać zawartą w nich energię, najczęściej na drodze spalania. Wydaje się, że najbardziej przyszłościowym paliwem jest wodór, ze względu na wysoką wartość opałową, dostępność, jak i szerokie możliwości jego wytwarzania [2]. Wodór w czystej postaci jest atrakcyjnym paliwem, gdyż jego wartość opałowa wynosi około 120 MJ/kg. W warunkach normalnych jest gazem i wystarczy około 4% mieszanina z powietrzem, aby mógł się spalać. Zaletą tego pierwiastka jest brak emisji szkodliwych substancji podczas spalania, gdyż produktem spalania jest jedynie woda. Kolejnym argumentem przemawiającym za wodorem, jest jego dostępność na Ziemi. Nie występuje on jednak w czystej postaci. Aktualnie wodór pozyskuje się używając następujących metod:

- procesu reformingu benzyny – proces ten polega na zwiększeniu liczby oktanowej benzyny poprzez odwodornienie węglowodorów nasyconych;
- procesu reformingu metanu parą wodną – proces produkcji wodoru z metanu i pary wodnej. W temperaturze 700–1100°C, w obecności katalizatora metalicznego, para wodna reaguje z metanem tworząc gaz syntezowy złożony z tlenku węgla i wodoru;
- procesu elektrolizy wody – proces polega na uporządkowanym przepływie jonów w elektrolicie wodnym, pomiędzy elektrodami, pod wpływem przyłożonego pola elektrycznego. W wyniku elektrolizy wody otrzymuje się

wodór, który wytwarza się na jednej z elektrod – katodzie oraz tlen, który powstaje na drugiej elektrodzie zwanej anodą;

- metod biologicznych – w tego typach metodach, wykorzystuje się mikroorganizmy, które podczas procesu fotosyntezy wytwarzają wodór. Przykładem mogą być algi, które zaczynają produkować wodór w chwili braku w ich pożywkach soli kwasu siarkowego tzw. siarczanów;
- metody Habera–Boscha – metoda ta polega na rozkładzie pary wodnej, za pomocą koksu o temperaturze 1200°C. Powstały wodór jest mocno zanieczyszczony tlenkiem węgla, którego można się pozbyć za pomocą reakcji katalitycznej w obecności np.  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (tlenek żelaza) [3].

Jednym z głównych problemów w energetycznym wykorzystaniu wodoru jest jego składowanie. Jako pierwiastek wodór ma najniższą gęstość spośród znanych pierwiastków na Ziemi. W normalnych warunkach (20°C, 1 atm) jego gęstość wynosi około 0,08 kg/m<sup>3</sup>. Obecnie wykorzystuje się kilka sposobów magazynowania wodoru, są to:

- magazynowanie w postaci sprężonego gazu – wodór jest sprężany do ciśnienia od 150 do 800 bar w temperaturze około 298K. Dzięki tej metodzie możliwa ilość przechowywanego wodoru w specjalnym zbiorniku pod ciśnieniem 700 bar równa jest około 12% masy całego zbiornika;
- magazynowanie w postaci ciekłej – przechowywanie wodoru w takiej formie jest energochłonne gdyż musimy utrzymywać temperaturę wodoru na poziomie 20K. Jeżeli zdecydujemy się na ten sposób magazynowania, musimy wziąć pod uwagę dość duże straty przez parowanie pierwiastka. Plussem tego sposobu przechowywania jest zwiększona gęstość wodoru do około 70 kg/m<sup>3</sup>;
- magazynowanie z wykorzystaniem fizycznych wodorków metalu – metoda ta polega na magazynowaniu wodoru za pomocą stopów niklu ( $\text{LaNi}_5$ ) i chromu ( $\text{ZrCr}_2$ ). W metodzie tej zbiorniki zbudowane z takich stopów wypełnia się wodorem, który jest absorbowany na powierzchni wewnętrznej zbiornika. Podczas zachodzącej tam reakcji wydzielą się ciepło. Gdy chcemy odzyskać wodór, dostarczamy ciepło i zachodzi reakcja odwrotna. Szybkość wydzielania wodoru zależy od ilości dostarczanej energii. Obecnie metodą tą potrafimy zmagazynować wodór w ilości równej około 5% masy całego zbiornika;
- magazynowanie z wykorzystaniem chemicznych wodorków metali – metoda polega na magazynowaniu wodoru w postaci związków chemicznych tj. KH (wodorek potasu), NaH (wodorek sodu),  $\text{NaBH}_4$  (borowodorek sodu). Uwalnianie pierwiastka np. z borowodorku sodu polega na reakcji rozbitcia związku wywołanej dostarczeniem wody i katalizatora. Metoda ta jest dość efektywna, gdyż dostajemy więcej wodoru niż było pierwotnie zmagazynowane, gdyż rozbitciu na tlen i wodór ulegają także cząstki doprowadzanej wody [3].

Produkcja i przechowywanie wodoru to nie wszystko. Rodzi się pytanie jak wykorzystać to „zielone” paliwo? Możemy je na przykład spalać w silnikach z zapłonem iskrowym. Wodór świetnie się do tego nadaje gdyż ma dużą zdolność do zapłonu oraz szerokie granice palności mieszanki. Sprawność konwencjonalnego silnika spalinowego jest jednak stosunkowo niska i wynosi około 33% [4,5]. Alternatywą mogą być ogniwa paliwowe, których sprawność sięga nawet 70%. Zaletami ogniw paliwowych są, niewielka emisja związków szkodliwych, dość krótki czas rozruchu, oraz stabilność dostarczenia prądu. Minusem (w pewnych wypadkach jest to plus) jest produkcja prądu stałego, oraz dosyć wolna reakcja na zmianę obciążenia. Wiele do życzenia pozostawia również żywotność takich urządzeń, ale wraz z postępem materiałoznawstwa i odkrywania nowych materiałów, czas „życia” takich ogniw wydłuża się.

## 2.2 Metody elektrochemiczne

Metody elektrochemiczne są najbardziej rozwiniętymi i rozpowszechnionymi, sposobami magazynowania energii. Opierają się na „przechowywaniu” energii w akumulatorach elektrochemicznych. Ich zasada działania i budowa jest bardzo prosta. W elektrolicie znajdują się dwie różne elektrody. W wyniku reakcji chemicznych pomiędzy elektrolitem, a elektrodami na jednej z nich pojawia się niedobór elektronów, natomiast na drugiej nadmiar. Dzięki temu energię chemiczną możemy zamienić na energię elektryczną. Obecnie wyróżniamy następujące rodzaje akumulatorów: ołowiowo-kwasowe, niklowo-kadmowe, niklowo-żelazowe, litowo-jonowe, oraz wiele innych. Różnią się one od siebie budową elektrod i rodzajem elektrolitu. Takie rodzaje akumulatorów stosuje się głównie do urządzeń mobilnych, takich jak komórki, laptopy, a także w przemyśle motoryzacyjnym.

W ostatnich latach największy rozwój przypadł akumulatorowi wanadowemu. Jest to pierwszy akumulator przepływowy. Nie różni się on zasadą działania od innych, odróżnia go za to budowa. Dwie komory oddzielone od siebie półprzepuszczalną membraną, stanowią elektrody akumulatora. Wtłacza się do nich wodny roztwór jonów wanadu w kwasie siarkowym, do każdej komory inny, o różnym stopniu utlenienia. W wyniku reakcji zachodzących pomiędzy roztworami, w jednej z komór-elektrod pojawia się nadmiar elektronów, w drugiej niedobór. Dużą zaletą akumulatora jest możliwość tłoczenia roztworów z dwóch osobnych zbiorników. Dzięki temu po rozładowaniu, możemy taki akumulator naładować, albo po prostu wymienić roztwory na naładowane [6].

Wadą akumulatorów elektrochemicznych jest stosunkowo krótki okres rozładowywania, i problem z ich utylizacją, gdyż są zbudowane najczęściej z związków, które nie są przyjazne środowisku.

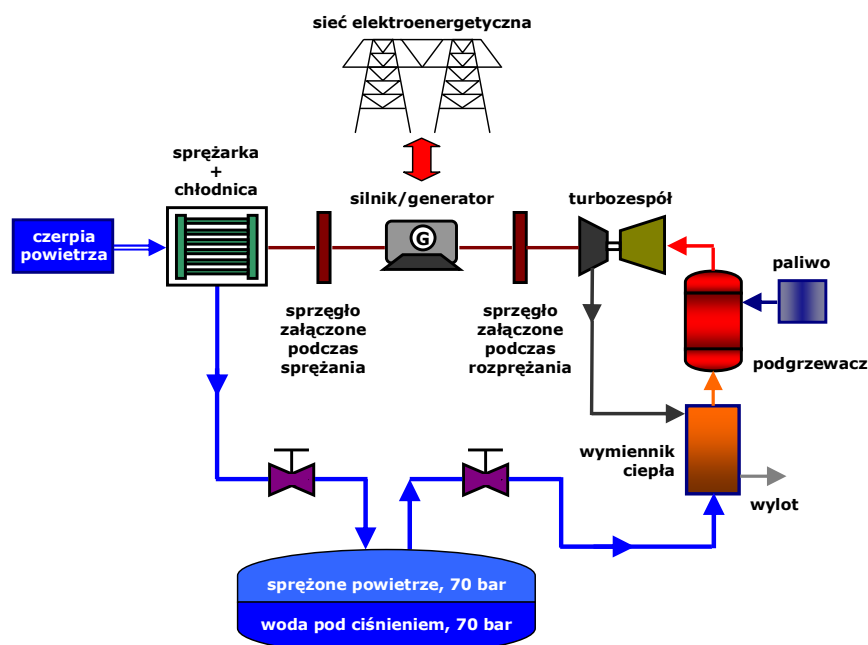
### 2.3. Metody mechaniczne

Spośród mechanicznych sposobów magazynowania energii możemy wyróżnić trzy najbardziej popularne metody, są to: elektrownie szczytowo-pompowe, koła zamachowe oraz magazynowanie w postaci sprężonego powietrza. Najpopularniejszą z nich, od dawna wykorzystywaną, są elektrownie szczytowo-pompowe. Wadą tego rozwiązania są jednak niewielkie możliwości jego rozwoju i udoskonalenia. To samo dotyczy sposobu magazynowania w postaci energii kinetycznej w kole zamachowym. Technologia ta nie znalazła szerszej rzeszy odbiorców ze względu na bardzo krótki czas magazynowania.

Wśród mechanicznych metod na uwagę zasługuje sposób magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza. Podstawową zaletą tej metody jest aspekt ekonomiczny nośnika, którym jest ogólnie dostępne i przede wszystkim darmowe powietrze. Sposób ten na pierwszy rzut oka jest dość atrakcyjny i polega na wykorzystaniu nadmiaru energii w momencie znikomego obciążenia sieci, na spręż powietrza. Głównym problemem w tym rozwiązaniu jest konieczność magazynowania dużych ilości powietrza pod wysokim ciśnieniem. Powietrze charakteryzuje się niską gęstością energii na poziomie  $29 \text{ MJ/m}^3$  dla ciśnienia sprężania 70 barów [7]. Jest to stosunkowo niska wartość w odniesieniu do zapotrzebowań energetyki zawodowej, gdyż aby można było mówić o wykorzystaniu tej metody na cele pokrycia szczytów obciążeń należałoby się liczyć z budową wielkogabarytowych zbiorników.

Rozwiązaniem tego problemu mogą być kawerny, czyli puste przestrzenie w skałach służące za ogromne zbiorniki sprężonego powietrza. Rozwiązanie to ma również walor ekonomiczny, ponieważ magazyny owe są znacznie tańsze, aniżeli budowa napowietrznych czy też jeszcze droższych, budowanych od podstaw magazynów podziemnych nie mających pochodzenia naturalnego.

Na rys. 2 przedstawiono zasadę działania instalacji CAES (Compressed Air Energy Storage) uruchomionej w Alabamie/USA wykorzystującej metodę magazynowania energii za pomocą sprężonego powietrza [8,9]. Podczas gdy zapotrzebowanie na energię elektryczną jest znikome, a więc jej cena jest najniższa, w instalacji uruchamiana jest sprężarka napędzana silnikiem elektrycznym, która wtłacza sprężone, schłodzone powietrze do podziemnej kawerny. Znajduje się w niej woda, która przez swoje ciśnienie hydrostatyczne zapewnia stałe ciśnienie wtłoczonemu powietrzu. W momencie wzrostu zapotrzebowania na energię, zmagazynowane powietrze poddaje się dwustopniowemu podgrzaniu, najpierw w rekuperatorowym wymienniku ciepła, a następnie w podgrzewaczu. Tak przygotowane powietrze dostarczane jest do turbiny gazowej która napędza generator prądotwórczy. Wymiennik wykorzystuje ciepło spalin wylotowych z turbiny, natomiast źródłem ciepła w podgrzewaczu jest spalane tam paliwo gazowe.



Rys. 2. Zasada działania instalacji CAES w Alabamie, na podstawie [7]

Fig. 2. The principle of CAES plant in Alabama, based on [7]

Niewielkie do tej pory zainteresowanie na świecie tym rodzajem magazynu energii, tłumaczy konieczność dostępu do naturalnych kavern, gdyż tworzenie od podstaw zbiorników nie ma szerszych przesłanek ekonomicznych. Aby jeszcze bardziej usprawnić tego typu elektrownie, dąży się do adiabatyczności procesów towarzyszących magazynowaniu sprężonego powietrza. Cel ten można osiągnąć między innymi przez magazynowanie ciepła odpadowego powstającego przy sprężaniu czy chłodzeniu powietrza, a następnie jego wykorzystanie do podgrzania powietrza podawanego na turbinę. W ten sposób całkowicie można wyeliminować zapotrzebowanie na zewnętrzne źródło ciepła, jak np. ciepło ze spalania paliwa gazowego w podgrzewaczu (instalacja w Alabamie). Badania instalacji CAES prowadzone od wielu lat na całym świecie zmierzają do opracowania technologii magazynowania energii w sprężonym powietrzu z wykorzystaniem przemian adiabatycznych.

#### 2.4. Metody elektryczne - kondensatory i superkondensatory

Wszystkie przedstawione dotychczas metody magazynowania energii należą do metod pośrednich, w których energia w pierwszym etapie zamieniana jest na inny rodzaj energii, jak np. w przypadku sprężonego powietrza, a następnie ponownie konwertowana na energię elektryczną. Jednym z nielicznych bezpo-

średnich magazynów energii elektrycznej jest superkondensator, który łączy cechy tradycyjnego akumulatora oraz znanego i często spotykanego w różnego rodzaju urządzeniach - kondensatora. Superkondensator może mieć budowę zwijaną lub składaną. Jego zasada działania polega na gromadzeniu ładunku elektrycznego w obrębie podwójnej warstwy zwanej warstwą Helmholtza (podwójnej warstwie elektrycznej). Odpowiednia budowa i rodzaj materiału na warstwy o dużej aktywnej powierzchni elektrycznej (węgle aktywne, grafen) pozwala na osiągnięcie dużych pojemności kondensatora. Przedrostek „super”, superkondensator zawdzięcza swoim właściwościom. Przede wszystkim bardzo szybkiemu ładowaniu i rozładowaniu. Dzięki tej własności kondensatory tego typu uzyskują bardzo dużą gęstość mocy. W tabeli 1 porównano własności trzech wybranych urządzeń magazynujących energię, takich jak akumulator kwasowo-ołowiowy tradycyjny kondensator oraz superkondensator [10].

Tabela 1. Zestawienie najważniejszych cech trzech wybranych magazynów energii, na podstawie [10]

Table 1. Summary of important features three selected energy storage, based on [10]

	Akumulator kwasowo-ołowiowy	Tradycyjny kondensator	Superkondensator
Czas ładowania	1-5 godz.	$10^{-3}$ - $10^{-6}$ s	0,3-30 s
Czas rozładowania	0,3-3 godz.	$10^{-3}$ - $10^{-6}$ s	0,3-30 s
Energia właściwa, Wh/kg	od 10 do 100	< 0,1	od 1 do 10
Liczba cykli	1000	< 500 tys.	< 500 tys.
Moc właściwa, W/kg	< 1000	< 100 tys.	< 10 tys.
Sprawność ładowania/rozładowania	0,7-0,85	> 0,95	0,85-0,98

Superkondensatory w odniesieniu do akumulatorów wyróżniają się niezwykle dużą żywotnością, dużą mocą właściwą oraz wysoką sprawnością cykli pracy. Jednak czas ich rozładowania jest bardzo krótki, a energia zmagazynowana niewielka. Dlatego ten rodzaj magazynu nie ma swojej przyszłości w energetyce zawodowej jako źródło mocy w celu wyrównania szczytów, aczkolwiek może posłużyć do kondycjonowania mocy oraz podniesienia stabilności sieci. Superkondensatory mogą natomiast znaleźć zastosowanie w napędzie hybrydowym pojazdów samochodach. W tego typu pojazdach coraz szerzej stosuje się system odzysku energii hamowania, wykorzystywanej następnie podczas przyspieszania w czasie zwiększonego zapotrzebowania na moc. Zarówno hamowanie jak i przyspieszanie pojazdu samochodowego to procesy chwilowe, wymagające zastosowania szybkich reakcji urządzeń magazynujących energię. W tym przypadku zastosowanie superkondensatora wydaje się

rozwiązaniem celowym ponieważ charakteryzuje się on odpowiednio krótkimi czasami ładowania i rozładowywania energii.

Innym zastosowaniem superkondensatorów mogą być systemy podtrzymywania pracy UPS, w których spełniałyby one rolę zasilaczy rezerwowych.

### 3. Podsumowanie

W najbliższych latach, wraz z pogłębianiem się problemów energetycznych świata i coraz szerszym wykorzystywaniem odnawialnych źródeł energii bardzo istotnym zagadnieniem stanie się magazynowanie energii. OZE cechuje losowy charakter produkcji oraz znaczna zmienność generowanej mocy dlatego efektywne wykorzystanie tych źródeł jest możliwe tylko dzięki stworzeniu skutecznych metod kumulacji energii.

Należy mieć nadzieję, że korzyści ekonomiczne, a zwłaszcza ekologiczne stosowania systemów magazynujących energię spowodują wzrost zainteresowania i inwestycji dla tego typu instalacji. Przepuszczalnie względy ekologiczne wymuszą również wprowadzanie odpowiedniego prawa nakazującego wytwórcom stosowanie wysokowydajnych systemów odzysku i magazynowania energii. Dopóki jednak koszty instalacyjne takich przedsięwzięć nie zmaleją, a sprawności ogólne nie wzrosną, będą one w większości przypadków wykorzystywane jedynie do badań i prób, a nie do realnego podniesienia sprawności energetycznej przedsiębiorstw produkujących energię elektryczną.

### Literatura

- [1] Dane Krajowego Systemu Elektroenergetycznego, [www.pse-operator.pl](http://www.pse-operator.pl), 2014.
- [2] Domański R.: Magazynowanie energii cieplnej, PWN, Warszawa 1990.
- [3] Feldzensztajn A., Pacuła L., Pusz J.: Wodór „paliwem” przyszłości, INTECH, Instytut Wdrożeń Technicznych, 2003, s. 1-17.
- [4] Szwaja S., Jamrozik A., Tutak W.: A two-stage combustion system for burning lean gasoline mixtures in a stationary spark ignited engine, *Applied Energy*, 105, 2013, s. 271-281.
- [5] Jamrozik A., Tutak W.: A study of performance and emissions of SI engine with two-stage combustion system, *Chemical and Process Engineering*, vol. 32, no 4, 2011, s. 453-471.
- [6] Tyczkowski J.: Kłopoty z akumulatorem, *Wiedza i Życie*, nr 12, 1999
- [7] Klimstra J., Hotakain M.: *Smart Power Generation - Inteligentna Energetyka Przyszłości*, Avain Publishers, Helsinki 2012.
- [8] Dzierżanowski Ł.: Elektrownie CAES, *Energia Elektryczna*, nr 2-3, 2011.
- [9] Badyta K., Milewski J.: Elektrownie CAES - możliwości akumulacji energii oraz współpracy ze źródłami odnawialnymi, *Instal*, nr 2, 2010.
- [10] Tomczyk P.: Zasobniki energii, Katedra zrównoważonego rozwoju energetycznego, Seminarium Wydziału Energetyki i Paliw AGH, Kraków 2011



## MODERN METHODS OF ENERGY STORAGE

### Summary

In the coming years, with the deepening of the energy problems of the world and an increasing use of renewable energy sources very important issue becomes energy storage. Developed and constantly improved energy storage technologies are expected to contribute mainly to solve the problem of covering the demand for energy during periods of peak energy caused by sudden changes in electricity consumption. The paper presents the most promising solutions for the accumulation of energy from different sources. The selected method of storing energy, including chemical methods, electrochemical, mechanical and electrical. In the chemical methods, most often accumulates energy consumption that is producing hydrogen. Recovery of energy from fossil can be realized for example by burning them. Electrochemical methods are based on batteries, including batteries, most of the flow. The methods of mechanical deserve special attention storing energy in compressed air and electrical methods for the future of the supercapacitor, such as direct store energy. To be able to effectively use the presented solutions, a substantial portion, however, requires improvements to improve efficiency and reduce operating costs. It must be assumed that especially the ecological benefits of energy storage systems, will in the near future increase in interest and investment for this type of installation. But as long as the installation costs of such ventures will decrease and not increase overall efficiency, they will in most cases be used only for research and testing, and not to the real increase energy efficiency of enterprises producing electricity.

**Keywords:** electricity, renewable sources of energy, accumulation of energy, energy storage

DOI:10.7862/rb.2014.90

*Przesłano do redakcji: 18.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Marcin KACZMARZYK<sup>1</sup>

## OCENA EFEKTYWNOŚCI IZOLACYJNO- AKUMULACYJNEJ PRZEGRÓD ZEWNĘTRZNYCH

Celem niniejszego opracowania jest określenie wpływu izolacyjności termicznej i pojemności cieplnej przegród zewnętrznych budynku na panujące w nim warunki termiczne. W artykule przybliżono pojęcia izolacyjności i akumulacyjności termicznej w kontekście aktualnych badań naukowych i obowiązujących wymogów krajowych. Aktualne polskie przepisy stawiają wobec przegród zewnętrznych wymagania dotyczące jedynie ich izolacyjności termicznej, podczas gdy, z zaprezentowanych badań naukowych wynika, że akumulacyjność termiczna przegród budowlanych jest często niedocenianym czynnikiem, który odpowiednio wykorzystany, może w zauważalnym stopniu obniżyć energetyczne koszty całorocznego utrzymania budynku i wpływać pozytywnie na odczuwanie komfortu cieplnego przez jego użytkowników. Na podstawie analiz prowadzonych przez innych autorów. Określono także optymalną, dla klimatu Polski, lokalizację warstwy termoizolacyjnej w przegrodzie.

Analizę tytułowego problemu, prowadzoną w dalszej części pracy oparto na sprawdzeniu i porównaniu odpowiedzi termicznych wewnętrznych powierzchni przegród zewnętrznych na relatywnie krótkotrwałe zmiany temperatury powietrza wewnętrznego i zewnętrznego. Wykorzystano w tym celu metodę różnic skończonych za pomocą której przeprowadzono symulacje dwóch niezależnych przypadków obciążeń termicznych, dla ścian o zróżnicowanej budowie. Wybrane wyniki przeprowadzonych symulacji zostały zaprezentowane w tekście. W ocenie warunków termicznych występujących w budynku podczas analizowanych zmian temperatur posłużono się, specjalnie w tym celu wprowadzonym, współczynnikiem efektywności izolacyjno-akumulacyjnej. Tak przeprowadzona analiza posłużyła sformułowaniu stosownych wniosków końcowych.

**Słowa kluczowe:** pojemność cieplna, bezwładność termiczna, przegrody zewnętrzne, metoda różnic skończonych

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: mgr inż. Marcin Kaczmarzyk, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska, Zakład Budownictwa Ogólnego, kaczmar@prz.edu.pl

## 1. Wykaz oznaczeń

Symbol	Jednostka	Opis
a	$\frac{m^2}{h}$	współczynnik wyrównania temperatur, dyfuzyjność termiczna materiału
$C_{.s}$	$\frac{Wh}{m^2 \cdot K}$	powierzchniowa pojemność cieplna przegrody
$C_{.v}$	$\frac{Wh}{m^3 \cdot K}$	objętościowa pojemność cieplna materiału
$d_n$	m	całkowita grubość warstwy materiału n
$T_e$	°C	temperatura powietrza zewnętrznego w danej chwili
$T_i$	°C	temperatura powietrza wewnętrznego w danej chwili
$T_{s.ext.k}$	°C	temperatura zewnętrznej powierzchni przegrody, po kroku czasowym K
$T_{s.int.k}$	°C	temperatura wewnętrznej powierzchni przegrody, po kroku czasowym K
U	$\frac{W}{m^2 \cdot K}$	współczynnik przenikania ciepła przegrody
$\Delta T_{.extr}$	°C	maksymalna różnica temperatur powierzchni ściany
$\lambda_n$	$\frac{W}{m \cdot K}$	współczynnik przewodzenia ciepła materiału n
$\mu_{I-A}$	nieistotny	współczynnik efektywności izolacyjno-akumulacyjnej
$T_{.T.const}$	h	czas stabilizacji temperatury wewnętrznej powierzchni przegrody
$T_{.T.max}$	h	czas wystąpienia najwyższej temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody
$T_{.T.min}$	h	czas wystąpienia najniższej temperatury na wewnętrznej powierzchni przegrody
$q_{.0}$	$\frac{W}{m^2}$	Gęstość strumienia ciepła od powietrza wewnętrznego do przegrody w stanie ustalonym
$q_{.max}$	$\frac{W}{m^2}$	Maksymalna gęstość strumienia ciepła od powietrza wewnętrznego do przegrody
$q_{.med}$	$\frac{W}{m^2}$	najwyższa spośród średnich gęstości strumienia ciepła od powietrza wewnętrznego do przegrody
$CM_{RT}$	%	Stosunek wartości oporu cieplnego materiału konstrukcyjnego do całkowitego oporu cieplnego ściany

## 2. Izolacyjność termiczna

Izolacyjność termiczna jest cechą materiału, lub struktury złożonej z kilku materiałów, określającą prędkość przepływu ciepła przez dany materiał lub strukturę. W odniesieniu do jednorodnych materiałów lub komponentów z nich wykonanych, miarą izolacyjności jest przewodnictwo cieplne, wyrażane ilościowo przez współczynnik przewodzenia ciepła  $\lambda$ .

W odniesieniu do przegród budowlanych, złożonych z kilku materiałów, o odmiennych wartościach przewodnictwa cieplnego, miarą izolacyjności termicznej jest całkowity opór cieplny, lub obliczony na jego podstawie współczynnik przenikania ciepła  $U$ .

Izolacyjność termiczna ma zasadniczy wpływ na wysokość strat ciepła budynku, stanowi także o temperaturze przegród zewnętrznych, [4] co przekłada się na komfort użytkownika obiektu [5].

Obecnie, zwłaszcza w budownictwie jednorodzinym widoczna jest tendencja minimalizowania wartości współczynnika  $U$  przegród zewnętrznych [6]. Aktualne wymagania krajowe stawiane budynkom, ograniczają maksymalną dopuszczalną wartość współczynnika przenikania ciepła dla ścian zewnętrznych w budynkach mieszkalnych do  $0,25 \frac{W}{m^2 \cdot K}$  [2].

## 3. Akumulacyjność termiczna

Jak opisano w [7] innym, nie mniej istotnym, a niestety często niedocenianym parametrem cieplnym odnoszącym się do przegród budowlanych, jest ich akumulacyjność termiczna. Mianem akumulacyjności termicznej lub pojemności cieplnej określa się zdolność materiału, komponentu lub przegrody do magazynowania energii cieplnej.

Akumulacyjność termiczna komponentów budowlanych wynika z ciepła właściwego oraz gęstości substancji z jakiej dany komponent jest wykonany [4]. Można wyróżnić akumulacyjność cieplną objętościową  $C_v \left[ \frac{J}{m^3 K} \right]$  oraz

powierzchniową  $C_s \left[ \frac{J}{m^2 K} \right]$ . Odpowiadają one ilości energii jaką należy dostarczyć, w celu podgrzania o 1K jednostkowej objętości lub powierzchni materiału.

Pojemność termiczna nie ma bezpośredniego wpływu na wysokość strat ciepła przez przegrodę w warunkach ustalonego przepływu ciepła, ale wysoka masa akumulacyjna zapewnia obiektowi dużą bezwładność cieplną, czyniąc środowisko wewnętrzne niepodatnym na krótkotrwałe zmiany temperatury [6], co wpływa pozytywnie na odczuwanie komfortu cieplnego przez użytkowników budynku a w całorocznej perspektywie, redukuje wydatki energetyczne na cele ogrzewania i chłodzenia obiektu [8]. Taką funkcję ciężkich materiałów konstrukcyjnych opisano w [9].

Połączenie wysokiej izolacyjności i akumulacyjności termicznej przegród zewnętrznych umożliwia zatem obniżenie strat ciepła przez przenikanie oraz gwarantuje dużą stabilność cieplną budynku.

#### 4. Optymalna lokalizacja izolacji termicznej w przegrodzie

Jak pokazują symulacje komputerowe [6] usytuowanie materiału termoizolacyjnego w przegrodzie ma niewielki wpływ na warunki termiczne budynku zlokalizowanego w ciepłym klimacie śródziemnomorskim. Autorzy tych badań wykazują jednocześnie zauważalną przewagę zewnętrznej izolacji termicznej nad wewnętrzną w lokalizacjach o chłodniejszym klimacie (np. w przypadku umiarkowanego klimatu Polski). Wynika to z wykorzystania masy materiału konstrukcyjnego jako bufora energii cieplnej. Autorzy ci wykazują także radykalne zmniejszenie ryzyka wystąpienia kondensacji pary wodnej w przegrodach w których materiał termoizolacyjny zainstalowano po stronie zewnętrznej [6].

Wymierne korzyści płynące z umieszczenia warstwy termoizolacji na zewnątrz budynku, przy jednoczesnym zastosowaniu masywnej warstwy konstrukcyjnej zaprezentowano w [7]. Autorzy tej Publikacji wyznaczyli optymalne grubości warstw termoizolacyjnej i konstrukcyjnej, w odniesieniu do konkretnego budynku i cyklicznych zmian temperatury powietrza zewnętrznego.

Zauważyć należy, że przewodnictwo cieplne oferowanych obecnie materiałów murowych jest na tyle wysokie, że spełnienie krajowych wymogów dotyczących izolacyjności termicznej implikuje konieczność stosowania nieracjonalnie grubych ścian jednowarstwowych.

Tabela 1. Minimalne grubości ścian jednowarstwowych spełniające aktualne wymogi dotyczące przenikalności cieplnej

Table 1. Minimal thickness of monolayer walls that meet actual thermal insulating requirements

Element	$\lambda$	$d_{min}$
Styropianowa płyta warstwowa	0,04	0,19
Drewno sosnowe	0,16	0,77
Cegła ceramiczna poryzowana	0,283	1,37
Ceramiczny pustak szczelinowy	0,33	1,59
Beton komórkowy	0,38	1,84
Cegła ceramiczna kratówka	0,56	2,70
Cegła ceramiczna pełna	0,77	3,72
Cegła silikatowa drążona	0,8	3,86
Cegła silikatowa pełna	0,9	4,35
Beton zwykły	1,7	8,21

Wadą murowych ścian jednowarstwowych jest także niekorzystny rozkład temperatur, w przekroju przegrody skutkujący znacznym zmniejszeniem ilości

energii cieplnej akumulowanej w przegrodach jednowarstwowych, w stosunku do przegród dwuwarstwowych o tej samej izolacyjności termicznej.

Obecnie wielu producentów materiałów budowlanych dąży do obniżenia przewodnictwa cieplnego swoich wyrobów, a w przypadku wszystkich materiałów murowych, stwierdzić można prawidłowość, że redukcja przewodnictwa cieplnego odbywa się kosztem objętościowej pojemności cieplnej komponentu.

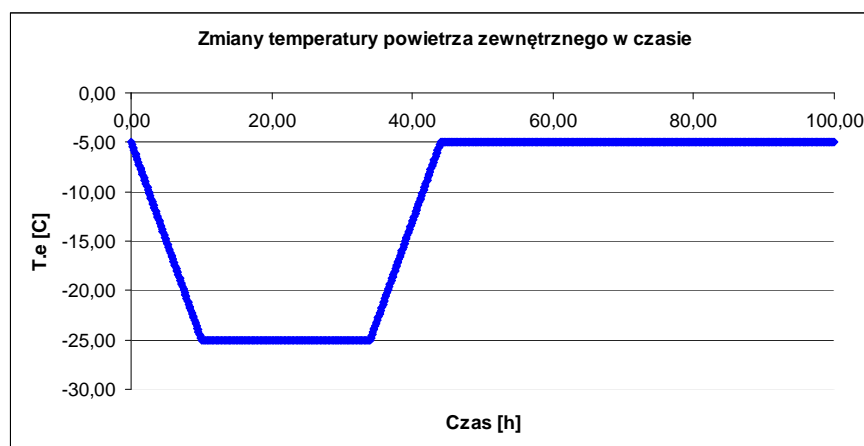
Jak wykazano we wstępie, izolacyjność termiczna i pojemność cieplna przegród zewnętrznych są istotnymi czynnikami mającymi zauważalny wpływ na komfort cieplny budynku.

Celem niniejszego opracowania jest zbadanie wpływu różnych konstrukcji ścian zewnętrznych na warunki cieplne budynku. Drugorzędnym celem tego opracowania jest prezentacja współczynnika efektywności izolacyjno - akumulacyjnej, jako nowatorskiej metody oceny parametrów cieplnych przegród zewnętrznych budynków.

W celu określenia wpływu zarówno izolacyjności termicznej jak i pojemności cieplnej konkretnej przegrody zasugerowano przeprowadzenie symulacji odpowiedzi termicznej przegrody na relatywnie krótkotrwałe zmiany temperatury powietrza zarówno zewnętrznego jak i wewnętrznego. W tym celu zasymulowano dwa niezależne przypadki zmian termicznych otoczenia przegród, które zaprezentowano na wykresach zamieszczonych na rys 1 i 2.

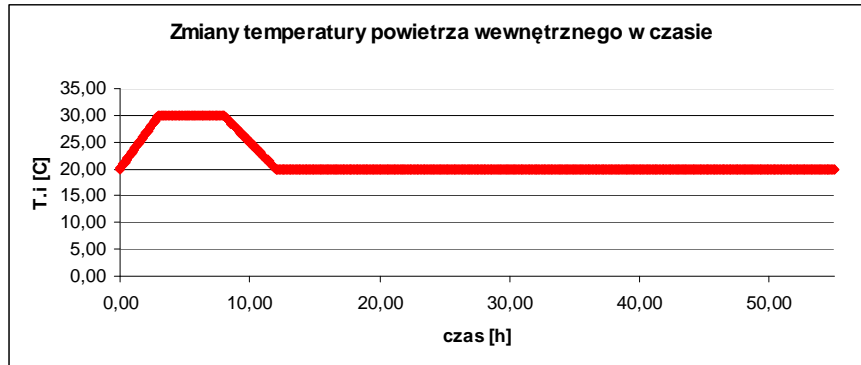
W obu przypadkach symulacja trwa do momentu ponownego ustalenia się temperatury wewnętrznej powierzchni przegrody.

Do przeprowadzenia symulacji wykorzystano Metodę Różnic Skończonych opisaną w [3], obliczenia prowadzono w arkuszu kalkulacyjnym Microsoft Excel 2003.



Rys. 1. Przebieg spadku temperatury zewnętrznej

Fig. 1. Illustration of external temperature decrease



Rys. 2. Przebieg wzrostu temperatury wewnętrznej

Fig. 2. Illustration of internal temperature increase

## 5. Mierzone wartości

Za istotne dla potrzeb dalszej analizy uznano niżej wymienione wartości:

- współczynnik przenikania ciepła  $U$ ,
- temperatura wewnętrznej powierzchni przegrody w stanie ustalonym  $T_{i-1,0}$ ,
- gęstość strumienia ciepła od powietrza wewnętrznego do ściany, w stanie ustalonym  $q_{0,0}$ ,
- największa różnica temperatury wewnętrznej powierzchni ściany  $\Delta T_{,extr}$ ,
- największa gęstość strumienia ciepła od powietrza wewnętrznego do ściany,  $q_{max}$ ,
- najwyższa, średnia gęstość strumienia ciepła od powietrza wewnętrznego do ściany,  $q_{med}$ .

Wartość ta była wyliczana dla kroków czasowych, w których temperatura wewnętrznej powierzchni ściany dążyła z powrotem do wartości początkowej. W przypadku symulacji wzrostu temperatury wewnętrznej, wartość maksymalna pojawiała się wraz z początkiem fazy powrotu temperatury powietrza do wartości początkowej, w przypadku symulacji spadku temperatury zewnętrznej, występowało tu pewne opóźnienie, wynikające z bezwładności termicznej przegrody - stąd nazwa "najwyższa średnia". Wartość ta jest średnią wartością gęstości strumienia ciepła w poszczególnych krokach czasowych od początku symulacji, do danej chwili, spełniającej w/w warunek.

- czas wystąpienia ekstremalnej temperatury na wewnętrznej powierzchni ściany  $\tau_{T,min} / \tau_{T,max}$ ,
- czas stabilizacji temperatury na wewnętrznej powierzchni ściany  $\tau_{T,const}$ .

Za moment stabilizacji temperatury przyjęto moment, w którym temperatura powierzchni ściany zbliżyła się ponownie do wartości początkowej na  $0,005^{\circ}\text{C}$ . Przyjęcie większej dokładności nie zostało uznane za celowe, jako że

wraz ze spadkiem gradientu temperatur, czas potrzebny na zmianę temperatury o jednostkową wartość znacznie się wydłużał (szczególnie w przypadku ścian o dużej akumulacyjności), w konsekwencji, niewielki wzrost dokładności skutkował nieproporcjonalnie dużym zwiększeniem objętości obliczeń. Czas  $\tau_{T, \text{const}}$  mierzony był od momentu ustania obciążenia termicznego.

- objętościowa i powierzchniowa pojemność cieplna materiału lub przegrody  $C_v / C_s$ ,
- procentowy udział materiału konstrukcyjnego w oporze cieplnym przegrody,
- procentowy udział materiału termoizolacyjnego w akumulacyjności termicznej przegrody.

Zastosowana metoda obliczeniowa nie uwzględnia wpływu wymiany ciepła między powietrzem wewnętrznym, a przegrodą na temperaturę powietrza wewnętrznego. W rzeczywistości, wpływ ten jest zauważalny, zwłaszcza w przypadku przegród o znacznej akumulacyjności termicznej, a obliczone tą metodą gęstości strumieni ciepła dają wyobrażenie o potencjalnych możliwościach przegród do stabilizowania temperatury powietrza w budynku.

W celu dokonania oceny wpływu konstrukcji przegrody na warunki termiczne wewnętrznej powierzchni przegród zewnętrznych budynku, a więc także na komfort cieplny obiektu, zdecydowano się na wprowadzenie tzw. współczynnika efektywności izolacyjno-akumulacyjnej  $\mu_{I-A}$ . Na wartość tego współczynnika wpływ ma zarówno izolacyjność, jak i bezwładność termiczna przegrody. Ze względu na różny charakter zmian warunków brzegowych przy spadku temperatury zewnętrznej i wzroście temperatury wewnętrznej, dla każdej z tych sytuacji, współczynnik efektywności wyznaczany był w odmienny sposób.

Współczynnik efektywności (przy spadku temperatury zewnętrznej) wyliczany był ze wzoru:

$$\mu_{I-A} = \frac{1}{(q_{med} - q_0) \cdot U} \quad (1)$$

W rozpatrywanej sytuacji, przegrody odznaczające się minimalnymi zmianami wartości strumienia ciepła podczas symulacji i jednocześnie posiadające niski współczynnik przenikania ciepła, zapewniały najlepsze warunki termiczne budynku. Takie ściany charakteryzowały się wysokimi wartościami współczynnika efektywności.

W tym przypadku (wzrost temperatury wewnętrznej) współczynnik efektywności izolacyjno-akumulacyjnej obliczany był następująco:

$$\mu_{I-A} = \frac{q_{med} - q_0}{U} \quad (2)$$



Przy wzroście temperatury powietrza wewnątrz budynku, ściana powinna ogrzewać się w jak najmniejszym stopniu, co skutkować będzie powstaniem strumienia ciepła o dużej wartości. Jeżeli przy dużej bezwładności cieplnej, przegroda cechowała się niską wartością współczynnika  $U$ , to tak wyliczony współczynnik efektywności miał wysoką wartość, co oznaczało że przegroda zapewniała bardzo korzystne warunki termiczne w budynku.

Symulacje przeprowadzono dla ścian zarówno jednowarstwowych jak i dwuwarstwowych. Analizie poddano przegrody o zmiennych grubościach warstw konstrukcyjnych i termoizolacyjnych, a także przegrody o różnej budowie, lecz o zdefiniowanych wartościach współczynnika przenikania ciepła  $U$ .

Analizie poddano przegrody z cegieł i pustaków: ceramicznych i silikatowych, bloczków z betonu komórkowego a także ściany z bali sosnowych, kamienia łamanego i żelbetowe ściany monolityczne. W murowych i betonowych ścianach dwuwarstwowych jako zewnętrzną termoizolację wykorzystano styropian EPS70, a przegrody drewniane docieplono wełną mineralną.

## 6. Wyniki

### 6.1. Tabelaryczne i graficzne przedstawienie wyników

Dla potrzeb prowadzonej analizy, wykonano łącznie około czterystu symulacji dla przegród w różnych konfiguracjach materiałowych, pogrupowanych w taki sposób, aby możliwe było zaobserwowanie wpływu zmian poszczególnych parametrów rozpatrywanych przegród, na ich odpowiedzi termiczne

Liczebność przeprowadzonych symulacji i ilość uzyskanych w nich danych uniemożliwia prezentację wszystkich wyników w tym artykule. Z tego względu, poniżej zamieszczono jedynie wyniki uzyskane z symulacji obu sytuacji termicznych dla różnych ścian dwuwarstwowych.

Zaprezentowane wyniki przedstawiają wyraźną przewagę ciężkich, dobrze przewodzących ciepło materiałów murowych nad lekkimi materiałami o niskim przewodnictwie cieplnym. Materiały konstrukcyjne o dużej gęstości wolno reagują na zmiany temperatury otoczenia, ich wysokie przewodnictwo ciepłe umożliwia akumulowanie energii cieplnej w znacznej objętości materiału, a nie, jak ma to miejsce w przypadku lekkich materiałów, tylko w płytkiej przypowierzchniowej warstwie ściany która szybko ulega nagrzaniu. Ciepło nagromadzone w takim buforze np. podczas słonecznego dnia lub podczas spotkania znacznej liczby osób, zostanie oddane do powietrza wewnętrznego wieczorem i w nocy, gdy temperatura naturalnie spada. Wykorzystanie akumulacyjności termicznej ciężkich murów umożliwia odpowiednią grubość warstwy termoizolacyjnej, co zaprezentowano poniżej.

Tabela 2. Wyniki symulacji spadku temperatury zewnętrznej, przeprowadzonej dla ścian dwuwarstwowych składających się z 25 cm warstwy konstrukcyjnej i 15 cm warstwy termoizolacji

Table 2. The results of simulation of external temperature decrease, conducted for multilayer walls made of 25 cm of construction material and 15 cm of thermal insulation

Lp	Element konstrukcyjny	U	CM <sub>RT</sub>	T <sub>i,1</sub>	Δ T <sub>max</sub>	q <sub>0</sub>	q <sub>med</sub>	q <sub>max</sub>	U <sub>f,A</sub>	τ <sub>T,min</sub>	τ <sub>T,const</sub>	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub>	λ	a
		[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	[%]	[C]	[C]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	--	[h]	[h]	[Wh/(m <sup>3</sup> ·K)]	[Wh/(m <sup>2</sup> ·K)]	[W/(m·K)]	[m <sup>2</sup> /h] · 10 <sup>-3</sup>
1	Beton monolit	0,246	3,77%	19,20	0,34	6,15	6,20	8,76	76,66	41,60	108,80	583,33	146,76	1,70	2,91
2	Cegła ceramiczna pełna	0,236	7,97%	19,23	0,32	5,89	5,95	8,35	70,43	43,50	110,50	440,00	110,92	0,77	1,75
3	Cegła silikatowa pełna	0,238	6,90%	19,23	0,33	5,96	6,02	8,49	65,11	43,00	109,00	464,44	117,03	0,90	1,94
4	Kamień łamany	0,249	2,60%	19,19	0,35	6,22	6,31	8,91	44,13	40,80	103,90	613,33	154,26	2,50	4,08
5	Cegła klinkierowa	0,240	5,97%	19,22	0,34	6,01	6,13	8,63	35,35	42,00	102,50	464,44	117,03	1,05	2,26
6	Bale sosna	0,182	31,91%	19,41	0,17	4,56	4,75	5,87	28,85	57,75	218,50	383,47	96,50	0,16	0,42
7	Cegła silikatowa drążona	0,236	7,69%	19,23	0,35	5,91	6,07	8,60	25,91	42,00	97,50	391,11	98,70	0,80	2,05
8	Cegła ceramiczna "kratówka"	0,229	10,64%	19,26	0,34	5,73	5,94	8,34	20,36	42,50	94,50	317,78	80,37	0,56	1,76
9	Ceramiczny pustak szczelinowy	0,214	16,81%	19,31	0,33	5,34	5,63	7,88	16,39	42,75	91,36	225,62	57,33	0,33	1,46
10	Cegła ceramiczna poryzowana	0,208	19,07%	19,32	0,33	5,20	5,55	7,74	13,91	42,64	87,04	195,20	49,72	0,28	1,45
11	Beton komórkowy	0,218	14,93%	19,29	0,37	5,46	5,94	8,31	9,56	40,50	70,00	186,67	47,59	0,38	2,04
Grubość warstwy konstrukcyjnej d.k			0,25 m												
Grubość warstwy termoizolacyjnej d.i			0,15 m												

Tabela 3. Wyniki symulacji wzrostu temperatury wewnętrznej, przeprowadzonej dla ścian dwuwarstwowych składających się z 25 cm warstwy konstrukcyjnej i 20 cm warstwy termoizolacji

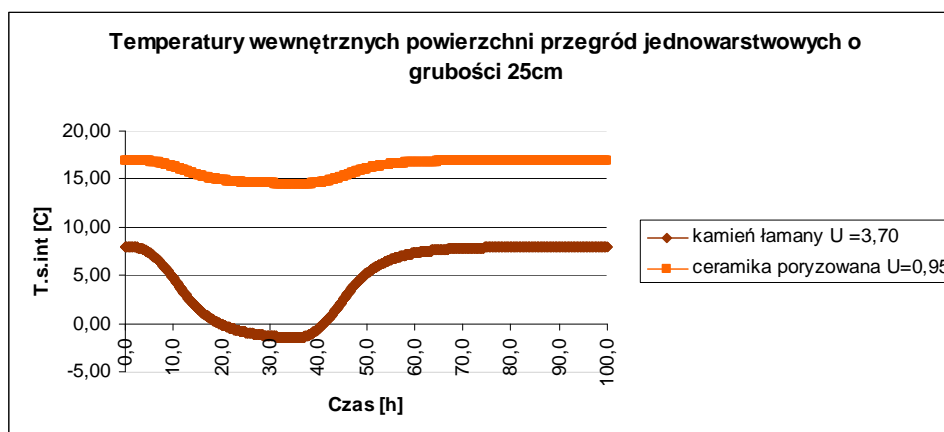
Table 3. The results of simulation of internal temperature increase, conducted for multilayer walls made of 25 cm of construction material and 20cm of thermal insulation

Lp	Element konstrukcyjny	U	CM <sub>RT</sub>	T <sub>i,1</sub>	Δ T <sub>max</sub>	q <sub>0</sub>	q <sub>med</sub>	q <sub>max</sub>	H <sub>1-A</sub>	τ <sub>T,max</sub>	τ <sub>T,const</sub>	C <sub>v</sub>	C <sub>s</sub>	λ	a
		[W/(m <sup>2</sup> ·K)]	[%]	[C]	[C]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	[W/m <sup>2</sup> ]	--	[h]	[h]	[Wh/(m <sup>3</sup> ·K)]	[Wh/(m <sup>2</sup> ·K)]	[W/(m·K)]	[m <sup>2</sup> /h] ·10 <sup>-3</sup>
1	Kamień łamany	0,190	1,96%	19,38	3,93	4,74	48,34	111,90	229,75	8,10	146,70	613,33	154,56	2,50	4,08
2	Beton monolit	0,188	2,86%	19,39	4,42	4,70	45,69	115,62	217,94	8,10	150,00	583,33	147,06	1,70	2,91
3	Cegła klinkierowa	0,185	4,55%	19,40	5,33	4,62	40,79	122,55	195,60	8,10	137,10	464,44	117,34	1,05	2,26
4	Cegła silikatowa pełna	0,184	5,26%	19,40	5,51	4,59	39,90	123,90	192,37	8,10	142,80	464,44	117,34	0,90	1,94
5	Cegła ceramiczna pełna	0,182	6,10%	19,41	5,77	4,55	38,53	125,86	186,71	8,10	142,50	440,00	111,23	0,77	1,75
6	Cegła silikatowa drążona	0,182	5,88%	19,41	5,90	4,56	37,58	126,87	181,03	8,10	127,20	391,11	99,01	0,80	2,05
7	Cegła ceramiczna "kratówka"	0,178	8,20%	19,42	6,59	4,45	33,65	132,07	163,99	8,10	119,10	317,78	80,68	0,56	1,76
8	Bale sosna	0,149	26,01%	19,52	7,73	3,71	26,39	140,10	152,67	8,00	202,80	383,47	96,71	0,16	0,42
9	Beton komórkowy	0,172	11,63%	19,44	7,63	4,29	26,74	139,91	130,84	7,80	86,40	186,67	47,90	0,38	2,04
10	Ceramiczny pustak szczelnowy	0,169	13,16%	19,45	7,65	4,22	25,32	139,99	125,09	7,80	106,56	225,62	57,64	0,33	1,46
11	Cegła ceramiczna poryzowana	0,165	15,02%	19,46	7,94	4,13	23,16	142,13	115,20	7,80	99,54	195,20	50,03	0,28	1,45

Grubość warstwy konstrukcyjnej d<sub>k</sub>                    0,25 m

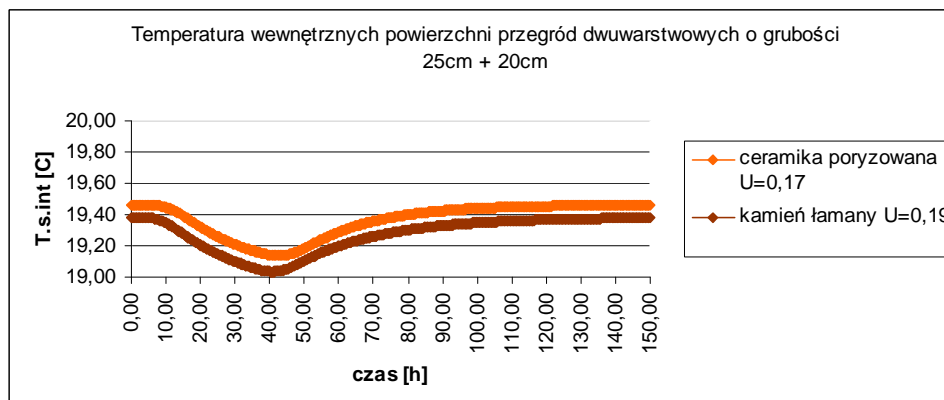
Grubość warstwy termoizolacyjnej d<sub>i</sub>                0,20 m

Na rys. 3 i 4 przedstawiono sytuację przy spadku temperatury zewnętrznej.



Rys. 3. Temperatura wewnętrznej powierzchni przegród jednowarstwowych z kamienia łamanego i ceramiki poryzowanej podczas spadku temperatury zewnętrznej

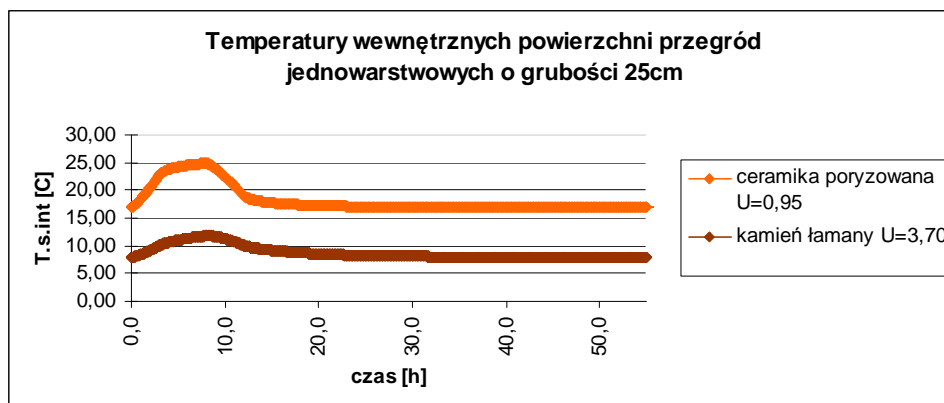
Fig. 3. Temperature of internal surface of monolayer walls made of crushed stone and porous ceramics during external temperature decrease



Rys. 4. Temperatura wewnętrznej powierzchni przegród dwuwarstwowych z kamienia łamanego i ceramiki poryzowanej podczas spadku temperatury zewnętrznej

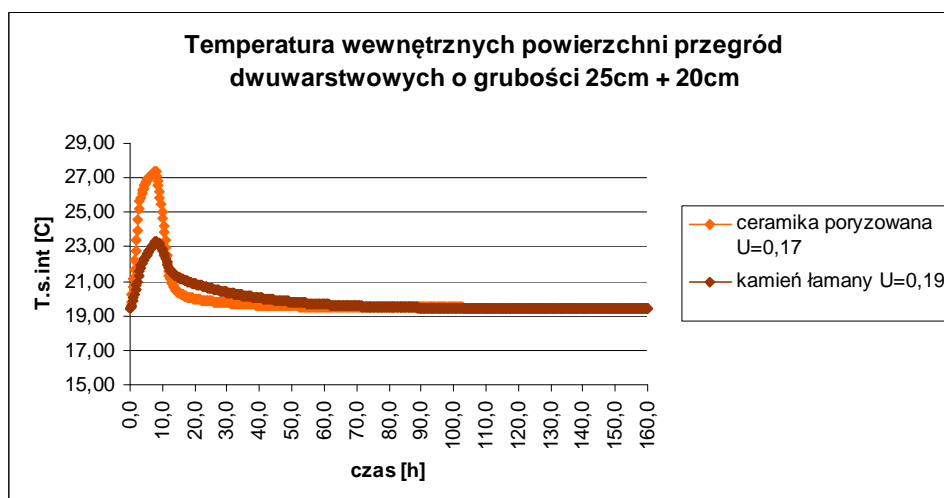
Fig. 4. Temperature of internal surface of multilayer walls made of crushed stone and porous ceramics during external temperature decrease

Na rys. 5 i 6 przedstawiono sytuację przy wzroście temperatury wewnętrznej.



Rys. 5. Temperatura wewnętrznej powierzchni przegród jednowarstwowych z kamienia łamanego i ceramiki poryzowanej podczas wzrostu temperatury wewnętrznej

Fig. 5. Temperature of internal surface of monolayer walls made of crushed stone and porous ceramics during internal temperature increase



Rys. 6. Temperatura wewnętrznej powierzchni przegród dwuwarstwowych z kamienia łamanego i ceramiki poryzowanej podczas wzrostu temperatury wewnętrznej

Fig. 6. Temperature of internal surface of multilayer walls made of crushed stone and porous ceramics during internal temperature increase

Zamieszczone wykresy przedstawiają wpływ zastosowania zewnętrznej termoizolacji na temperaturę wewnętrznej powierzchni ścian podczas STZ (Rys. nr 3 i 4) oraz WTW (Rys. nr 5 i 6).

## 6.2. Wnioski

1. Podstawowym parametrem zewnętrznych przegród budowlanych pozwalającym na ograniczenie sezonowego zapotrzebowania budynku na ciepło oraz zminimalizowanie wpływu zmian temperatury zewnętrznej na warunki cieplne panujące w budynku, jest izolacyjność termiczna,
2. Pojemność termiczna przegród zewnętrznych nie wywiera istotnego wpływu na warunki cieplne budynku, podczas krótkotrwałych zmian temperatury zewnętrznej.
3. W przypadku ryzyka krótkotrwałego przegrzania lub wychłodzenia powietrza w budynku, akumulacyjność cieplna przegród budowlanych ma zasadniczy wpływ na stabilność termiczną środowiska wewnętrznego,
4. Potencjalne korzyści wynikające z wysokiej pojemności cieplnej przegród zewnętrznych mogą zostać efektywnie wykorzystane, jedynie po zastosowaniu odpowiedniej grubości zewnętrznej warstwy termoizolacyjnej
5. Zachowanie bardzo dobrych i stabilnych warunków termicznych budynku umożliwiają ściany dwuwarstwowe, zbudowane z kamienia łamanego, litego betonu, pełnych cegieł: klinkierowych, silikatowych, ew. czerwonych ceramicznych, zaizolowanych termicznie od zewnątrz do wartości współczynnika przenikania ciepła  $U \leq 0,2$  [ $W/m^2 \times K$ ]
6. Wznoszenie zewnętrznych ścian jednowarstwowych jest mało efektywne pod względem izolacyjno-akumulacyjnym jak również ekonomicznym.
7. Drewno jest najlepszym materiałem do budowy ścian jednowarstwowych ze względu na jego wysokie ciepło właściwe i jednocześnie niskie przewodnictwo cieplne.
8. Wysoki opór cieplny przegrody najlepiej uzyskać stosując służące w tym celu materiały termoizolacyjne, podczas gdy materiał konstrukcyjny powinien cechować się wysoką gęstością dającą dużą pojemność cieplną jak również wysokim przewodnictwem cieplnym umożliwiającym sprawną wymianę ciepła między powietrzem wewnętrznym a masą akumulacyjną.
9. Współczynnik efektywności izolacyjno-akumulacyjnej może być wykorzystywany jako nowe kryterium oceny parametrów cieplnych przegród budowlanych, oparte już nie tylko na izolacyjności ale również na bezwładności termicznej komponentów przegrody. Zaznaczyć należy, że porównywać ze sobą można jedynie wartości  $\mu_{t-A}$  wyznaczone przy zastosowaniu identycznych obciążeń termicznych.

## Literatura

- [1] PN-EN ISO 6946 -2008 Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła.
- [2] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [3] Pogorzelski Jerzy Andrzej, Fizyka cieplna budowli, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa 1976.

- [4] C.Luo, B. Moghtaderi, S. Hands, A. Page, Determining the thermal capacitance, conductivity and the convective heat transfer coefficient of a brick wall by annually monitored temperatures and total heat fluxes, *Energy and Buildings* 43 (2011), 379–385.
- [5] Francesca Stazi a., Ambra Veglioa, Costanzo Di Pernab, Placido Munafoa, Retrofitting using a dynamic envelope to ensure thermal comfort, energy savings and low environmental impact in Mediterranean climates, *Energy and Buildings* 54 (2012) 350–362.
- [6] Dionysios I. Kolaitis, Emmanouil Malliotakis, Dimos A. Kontogeorgos, Ioannis Mandilaras, Dimitrios I. Katsourinis, Maria A. Founti, Comparative assessment of internal and external thermal insulation systems for energy efficient retrofitting of residential buildings, *Energy and Buildings* 64 (2013) 123–131.
- [7] S. Ginesteta, T. Bouacheb, K. Limamc, G. Lindnerc, Thermal identification of building multilayer walls using reflective Newton algorithm applied to quadrupole modelling, *Energy and Buildings* 60 (2013) 139–145.
- [8] Weiliang Wang, Zhe Tian, Yan Ding, Investigation on the influencing factors of energy consumption and thermal comfort for a passive solar house with water thermal storage wall, *Energy and Buildings* 64 (2013) 218–223.
- [9] Michal Pomianowski, Per Heiselberg, Rasmus Lund Jensen, Full-scale investigation of the dynamic heat storage of concrete decks with PCM and enhanced heat transfer surface area, *Energy and Buildings* 59 (2013) 287–300.

## ASSESSMENT OF INSULATING ACCUMULATING EFFECTIVENESS OF BUILDINGS' EXTERNAL WALLS

### Summary

The purpose of this work is to assess the impact of thermal insulation and heat capacity of building's envelope, on thermal conditions of the building's interior.

The article describes thermal insulation and heat capacity referring to the results of present scientific research, as well as to current Polish regulations in this matter. The obligatory regulations in Poland enforce only the maximal value of heat transfer coefficient of buildings' envelope, while presented research proves thermal capacity to be a factor, that could significantly reduce annual energy requirements of a building, as well as to positively influence thermal comfort of its users. The optimal location of thermal insulating layer of external walls required in Polish climate was identified, basing on other authors' research.

The analysis of the titular problem was based on calculating and comparing thermal responses of internal surfaces of external walls, due to relatively short-term changes of thermal boundary conditions. The finite difference method was used to conduct simulations of two independent cases of dynamic thermal conditions. Multiple walls of various construction were subjected to mentioned thermal loads. Selected results of conducted simulations were presented in this paper. In order to evaluate obtained results, the insulating-accumulating coefficient of a wall was introduced. Presented analysis created a basis to form proper conclusions.

**Keywords:** thermal capacity, thermal inertia, external walls, finite difference method

DOI:10.7862/rb.2014.91

*Przesłano do redakcji: 16.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Marek KAMIENIARZ<sup>1</sup>

## UNIKATOWA BUDOWLA KURHANU W KSZTAŁCIE KOPUŁY

W artykule przedstawiono kurhan–kaplicę cmentarną przeznaczoną do pochówku zmarłych i obrzędów religijnych z tym związanych, wybudowany w Karniowicach koło Trzebini. Karniowicki „kurhan” łączy elementy starożytne z nowoczesnymi. Stanowi skrzyżowanie myśli konstrukcyjnej egipskich piramid, katakumb rzymskich, kaplic książęcych i królewskich z tradycją słowiańskiego grzebania zmarłych czy indiańskich kurhanów nad rzeką Missisipi. Celem budowy było ograniczenie powierzchni cmentarnej, co stanowi obecnie godną uwagi innowacyjność na skalę światową w tej dziedzinie. Kurhan, to w porównaniu z tradycyjnym cmentarzem, 30-krotna oszczędność miejsca, a po specjalnych zabiegach, które spowodują mineralizację ciał, nawet 100-krotna:1600 pochówków na 5 arach ziemi. Uzyskano to poprzez zastosowanie do budowy kopuły monolitycznej, systemu Monolithic wykorzystującego deskowanie tracone miękkie w formie pneumatycznej. Jest to metoda w Polsce mało znana i rzadko stosowana. Umożliwiło to wybudować kopułę o dużej odporności konstrukcji na szkody górnicze, skróciło znacznie czas budowy oraz pozwoliło w późniejszym czasie eksploatacji oszczędzić energię przy ogrzewaniu lub chłodzeniu wnętrza obiektu co jest dla takiego przeznaczenia obiektu bardzo ważne. Połączenie tych cech pozwoliło stworzyć budowlę wyjątkową, która może być w przyszłości dobrym rozwiązaniem budowania cmentarzy w miastach, w których brakuje miejsc na cmentarze.

**Słowa kluczowe:** grobowiec, kopiec, torkretowanie, deskowanie tracone

### 1. Charakterystyka ogólna budowli

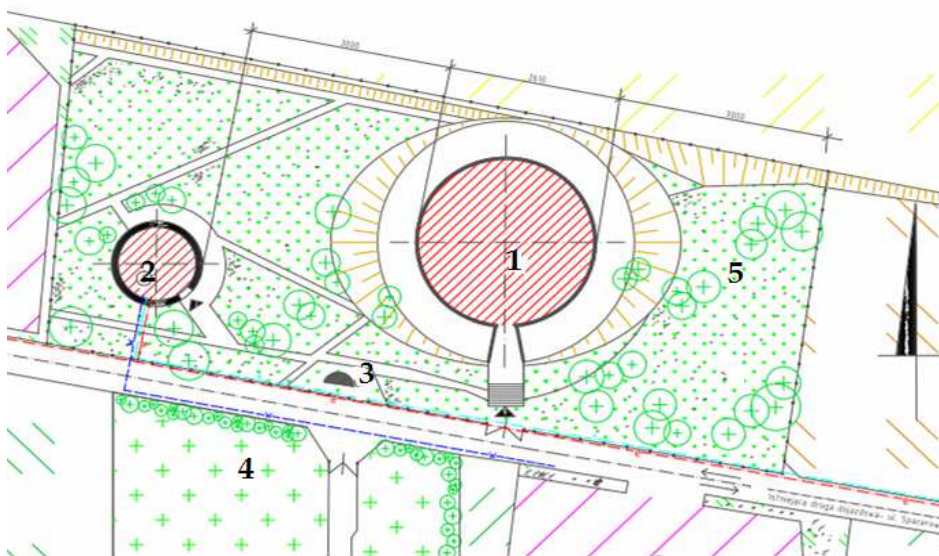
#### 1.1. Wprowadzenie

Kurhan jest centralnym budynkiem Parafialnego Ośrodka Pamięci Zmarłych w Karniowicach w skład którego wchodzi wspomniany obiekt, kaplica, pomieszczenia pomocnicze i infrastruktura zewnętrzna (Rys.1). Jest to pierwszy w Polsce i w Europie obiekt kaplica – kurhan wybudowany w kształcie kopca. Spełnia równocześnie posługę sakramentalną oraz miejsce pochówku zmarłych [3]. Zaprojektowany i wybudowany został w formie żelbetowej kopuły,

<sup>1</sup>dr inż. Marek Kamieniarsz, Zakład Budownictwa i Fizyki Budowli, Wydział Inżynierii Lądowej, Politechnika Krakowska 31-155 ul. Warszawska 24 Kraków, 12 6282152, marek109@vp.pl.



przykryty ziemią, obsiany trawą i niską zielenią. Prace budowlane rozpoczęto w kwietniu 1999 roku, a w 2006 r. zakończono budowę. Pierwszy pochówek miał miejsce w 2006 r. Pierwotne założenie, że przy pochówku miała być wykorzystywana metoda tanatopraksji nie zdobyła ostatecznie zgody władz kościelnych. W tej sytuacji zdecydowano, że w kryptach będą chowane urny z prochami zmarłych po kremacji. Nie było to do końca zgodne z pierwotnym zamierzeniem ks. Stanisława Fijałka- pomysłodawcy, który przewidywał, że zwłoki będą poddawane tanatopraksji i składane do kurhanowych wnek w trumnach, a następnie po całkowitej mineralizacji umieszczane w mniejszych urnach. Obecnie w kurhanie złożono 28 urn z prochami zmarłych.



Rys. 1. Fragment projektu zagospodarowania terenu Parafialnego Ośrodka Pamięci zmarłych w Karniowicach : 1- Projektowany Kurhan , 2-Projektowany budynek administracyjno-socjalny, 3-Istniejący ołtarz polowy ,4-Istniejący cmentarz komunalny ,5-Projektowany teren zielony

Fig.1. Part of the land development project of the Parish Memorial Centre in Karniowice: 1 – designed burial mound, 2 –designed administrative and social building , 3 – existing field altar, 4 – existing municipal cemetery, 5 – designed green area

## 1.2. Założenia funkcjonalne budowli

Parafialny Ośrodek Pamięci Zmarłych zaprojektowano na wzór starożytnych katakumb czy kurhanów[2]. Budowla miała składać się z dwóch (docelowo z trzech ) kondygnacji przykrytych kopułą żelbetową, opartą na ścianach i słupach posadowionych w linii koła. Pierwsze piętro zaprojektowano w systemie balkonu. Na środku parteru znajduje się ołtarz wraz z katafalkiem oraz ławkami dla osób najbliższych, uczestniczących w pogrzebie. Wszystkie kondygnacje okalają krypty dla pochówku. Ułożone są promieniście na kilku po-

ziomach między ścianami nośnymi (fot.1). Na piętro prowadzą schody wachlarzowe jednobiegowe, okalające katafalk(fot.2). Na balkonach w niszach zaprojektowano pomieszczenia na urny i magazyny. W górze kopuły znajduje się witraż w kształcie gwiazdy, usytuowany w linii koła. Wewnątrz znajduje się kaplica o powierzchni ponad 200 m<sup>2</sup>. Na wszystkich poziomach przygotowano miejsce spoczynku wiecznego dla około 2,5 tysięcy zmarłych. Taki sposób przechowania zwłok wokół kaplicy daje wysoki, liturgiczny kult zmarłych oraz ogromną oszczędność miejsca: 3 trumny na 1 metr<sup>2</sup> powierzchni zabudowy „kurhanu“, podczas gdy na cmentarzach komunalnych prosty grobowiec zajmuje około 4 m<sup>2</sup> powierzchni [4].



Fot.1. Fragment rozmieszczenia krypt na ścianie kaplicy na kondygnacji pierwszej. W górnym rzędzie widoczne krypty w stanie surowym, w dolnym rzędzie krypty przygotowane do zamknięcia płytami betonowymi.

Photo 1. Part of the layout of crypts on the chapel wall on the first floor. The crypts in the raw state are shown in the upper row; the crypts ready to be closed with concrete slabs are shown in the bottom row.

Rozwiązanie i pomysł taki uzmysławia bezsprzeczne pierwszeństwo kurhanu nad cmentarzem tradycyjnym, biorąc pod uwagę znaczną oszczędność miejsca. Uzupełnieniem programu użytkowego „kurhanu” jest wybudowany obiekt socjalny i istniejący już ołtarz polowy, przeznaczony na bardziej masowe uroczystości kościelne. W obiekcie socjalnym zaprojektowane zostały sale pamięci zmarłych, bar, kawiarnia, szalety publiczne przeznaczone dla wszystkich uczestników uroczystości pogrzebowych.



Fot.2. Fragment ołtarza właściwego w kształcie łodzi na kondygnacji drugiej. W dolnej części widoczny ołtarz wraz z katafalkiem. Widoczna także wewnętrzna klatka schodowa okalająca katafalk .

Photo 2. Part of the main altar in the shape of a boat on the first floor. At the bottom, there is the altar with a catafalque shown. There is also an internal staircase surrounding the catafalque shown.

## 2. Założenia architektoniczno-budowlane kurhanu

### 2.1. Wstęp - system deskowań traconych

Metoda Monolithic powstała w USA w 1970 roku. Jest to deskowanie tracone miękkie wykorzystujące formę pneumatyczną w formie kopuły bezpośrednio na budowie. Szalunek pneumatyczny wykonany jest z nylonu impregnowanego PCV lub tkaniny poliestrowej. Pierwszym etapem jest wykonanie fundamentu w postaci zbrojonego pierścienia ,do którego mocuje się tkaninę w formie balonu. Pełni ona rolę deskowania. Nadmuchiwana jest przy pomocy wentylatorów sprężonym powietrzem o niedużym ciśnieniu. Na tak przygotowaną powierzchnię od środka kopuły, natrykuje się warstwę pianki poliuretanowej, w której zatapia się haki stalowe. Do haków przymocowuje się siatkę stalową, pełniącą rolę szkieletu zbrojenia dla mieszanki betonowej, podawanej

metodzie torkretowania czyli dynamicznemu umieszczeniu zaprawy lub betonu w miejsce wbudowania [1].

Cała konstrukcja w ten sposób wykonana wykazuje bardzo dużą odporność na obciążenia wyjątkowe np. trzęsienia ziemi, huraganowe wiatry, szkody górnicze. Technologię charakteryzuje szybkość budowy, otwarta przestrzeń wewnątrz (brak słupów, podpór), oraz duża oszczędność energii przy ogrzewaniu lub chłodzeniu wnętrza. System zastosowano w USA oraz kilkudziesięciu krajach, budując około 4000 kopuł monolitycznych. W Polsce w tym systemie wykonano kilkanaście obiektów np.: budynek jednorodzinny w Bełku (powiat rybnicki), kościół w Katowicach czy magazyn klinkieru w Chełmie Lubelskim.

## 2.2. Kurhan

Cała budowla została zaprojektowana w formie kopuły monolitycznej o średnicy wewnętrznej 25 m. Konstrukcja powstała na wzór zaczerpnięty z technologii amerykańskiej, tj. budowli w kształcie kopuły kulistej o cienkościennej powłoce żelbetowej ocieplonej pianką poliuretanową.

Prace rozpoczęły się od przygotowania terenu. Na dnie wykopu został ułożony podkład 25 cm z suchego betonu, na którym wykonano płytę fundamentową w formie okrągłej płyty żelbetowej o średnicy około 26 m. Ze względu na szkody górnicze IV kategorii, płyta została zaprojektowana o grubości 80 cm, lokalnie pocieniona do 60 cm w celu umieszczenia instalacji wodno-kanalizacyjnej pod posadzką parteru. Zastosowano beton klasy B25 oraz stal zbrojeniową klasy A - II żebrowaną o łącznej masie 120 ton (fot.3).

Na tak przygotowanej płycie wykonano żelbetowy pierścień wysokości 1.5 m i długości około 81 m, okalającym budowlę tworzący belkę podwalinową pod późniejszą żelbetową kopułę. Następnie zamocowano balon poliwinylowy do pierścienia i napełniono go powietrzem. Nałożono od wewnątrz warstwę pianki poliuretanowej, która po utwardzeniu spełnia rolę izolacji dla całej kopuły i jest oparciem dla właściwego zbrojenia kopuły. Na tak przygotowany szkielet stalowy został za pomocą sprężonego powietrza pod ciśnieniem 20 atm. nałożony beton natryskowy. Czynność powtórzono kilkakrotnie uzyskując cienkościenny monolityczny szkielet, który po związaniu stworzył wyjątkowo sztywną, ognioodporną i wytrzymałą konstrukcję całej kopuły o grubości 30 cm. Konstrukcję wewnętrzną budowli tworzą ściany grubości 30 cm i w części środkowej słupy żelbetowe. Wspomniane ściany i słupy są również elementem nośnym dla stropów poszczególnych kondygnacji (fot.4). Do uszczelnienia i ochrony betonu zastosowano mikrozaprawę uszczelniającą, bazującą na specjalnych cementach, aktywizującą chemicznie składniki betonu.





Fot.3. Fragment zbrojenia płyty fundamentowej prętami średnicy  $\phi 32$  co 25cm ze stali klasy A - II żebrowanej oraz zbrojenie pod ściany krypt prętami pionowymi  $\phi 20$  co 25cm i słupów 6szt.  $\phi 20$ cm /fotografia.\*)

Photo 3. Part of the reinforcement of the foundation slab in the form of  $\phi 32$  cm diameter bars which are placed every 25 cm and are made of class A – II ribbed steel and the reinforcement of crypt walls in the form of  $\phi 20$  cm vertical bars, which are placed every 25 cm and 6 items of columns,  $\phi 20$  cm / source\*)

Wyklucza to przenikanie wody płynnej, natomiast umożliwia przenikanie pary wodnej. Preparat chroni także beton przed chlorkami, azotanami i siarczanami, jak również przed dwutlenkiem węgla, który powoduje karbonizację betonu i utratę jego zdolności antykorozyjnej w stosunku do stali zbrojeniowej. Kopułę wieńczy świetlik z dużymi oknami, dający naturalne oświetlenie wnętrza „kurhanu”. Wewnętrzna kubatura to aż 5000 m<sup>3</sup>. Sufit po odpowiednim wykończeniu i oświetleniu daje plastyczny obraz gwiazdy, zharmonizowany z wnętrzem kurhanu i krzyżem ołtarzowym. Wejście do środka odbywa się przez szerokie schody zewnętrzne z pochylnią dla niepełnosprawnych, a następnie przez hol wejściowy. W środkowej części parteru wykonano żelbetową klatkę schodową jako schody wachlarzowe jednobiegowe (Rys.2). Ze względu na kształt kopuły klatka jest nieco cofnięta od linii koła obiektu, co daje swobodne wyjście na wszystkie kondygnacje. Dzięki takiemu rozwiązaniu zapewnione zostało oświetlenie klatki schodowej światłem naturalnym, oraz zachowana duża estetyka z uwagi na liturgiczny charakter wnętrza. Wnętrze podzielono na dwie (docelowo trzy – Rys.3) kondygnacje oddzielone żelbetowymi stropami gr.20 cm, opartymi na sześciu słupach żelbetowych o średnicy 30 cm, posadowionych w linii koła o średnicy 40 cm oraz ścianach nośnych grubości 30 cm.

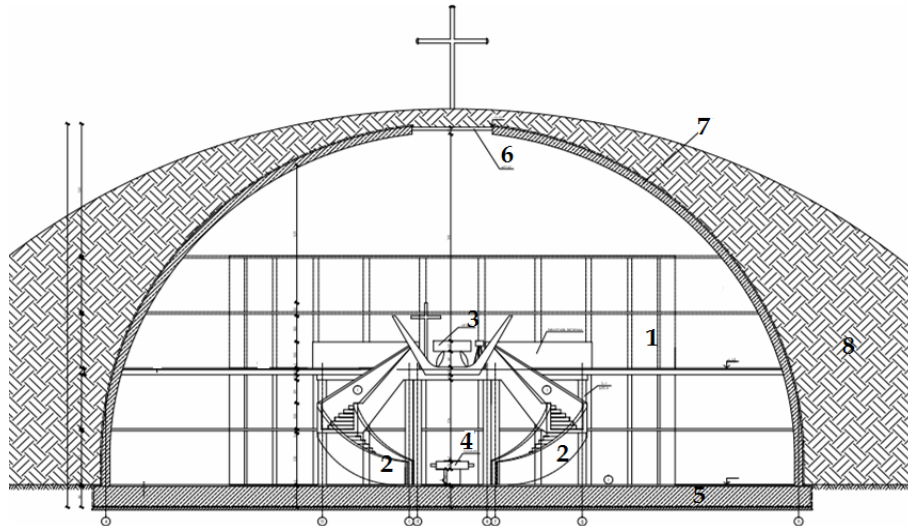


Fot.4. Widoczny fragment podciągu i słupy o średnicy  $\phi 30$  cm podpierające płytę balkonową kondygnacji nad parterem oraz podpierające schody wachlarzowe jednobiegowe.

Photo 4. There is also a part of a beam and  $\phi 30$  cm diameter columns which support the balcony board of the storey above the ground floor and supporting single-flight, fan-shaped stairs.

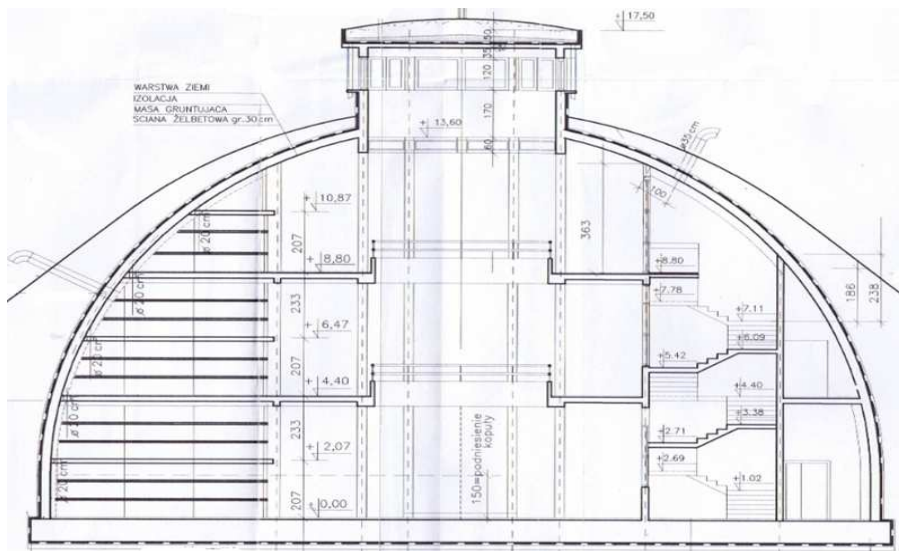
Pierwsze i drugie piętro zaprojektowano w systemie balkonów, co zapewnia naturalne oświetlenie wszystkich trzech kondygnacji kurhanu przez okno szczytowe. Wszystkie kondygnacje okalające krypty wykonano ze ścianek żelbetowych grubości 6 cm o przekroju wewnętrznym 60-70 cm. Żelbetowa kopuła po zabezpieczeniu odpowiednią izolacją, przekryta została warstwą iłu glinianego i ziemi urodzajnej. Na warstwie ziemi przykrywającej kopułę nasiano kompozycję specjalnych gatunków zieleni trawiastej i bylin oraz niskich ozdobnych krzewów, dobrze rosnących na stromych skarpach o odpowiednio zwartej bryle korzennej aby zabezpieczyć ją dodatkowo przed osunięciem się ziemi (fot.5) [4].

Niestety w roku 2012 pryzma wykonana z gruntu, mająca za zadanie zabezpieczenie grobowca oraz zwiększenie walorów estetycznych obiektu uległa zniszczeniu. Przednia część powłoki gruntowej od strony wejścia do grobowca zsunęła się, odsłaniając powierzchnię konstrukcji żelbetowej. Na całej powierzchni usypanego kopca ziemnego widoczne są uszkodzenia w formie drobnych osunięć (fot.6). Obecnie trwają prace naprawcze mające zabezpieczyć ubytki kopca ziemnego, które prowadzone są wg. projektu stabilizacji osłony gruntowej.



Rys. 2. Przekrój pionowy kurhanu-stan istniejący: 1-krypty , 2-schody jednobiegowe wachlarzowe, 3-oltarz górny , 4-katafalk ,5-płyta fundamentowa gr. 80 cm , 6-okno w suficie kopuły, 7-kopuła żelbetowa, 8-grunt obsypujący kopułę

Fig. 2. Vertical section of the burial mound – the existing state: 1 – crypts, 2 - single-flight, fan-shaped stairs, 3 – upper altar, 4 – catafalque, 5 – 80 cm foundation slab, 6 – window in the dome ceiling, 7 – steel –reinforced dome, 8 – soil covering the dome



Rys.3. Przekrój pionowy kurhanu - stan wg Projektu / rys.\*)

Fig.3. Vertical section of the burial mound - acc. to the design /fig\*)

\*) rysunki, fotografie zaczerpnięte z archiwum Parafii Rzymsko-Katolickiej P.W. Matki Boskiej Szkaplerznej w Karniowicach





Fot. 5. Fragment kopuły kurhanu przykryty warstwą iltu glinianego i ziemi urodzajnej, obsiany trawą oraz niskimi krzewami. Widok od strony wejścia do budowli.

Photo 5. Part of the burial mound dome covered by a layer of clay and fertile soil, planted with grass and low trees. The view from the side of the building entrance



Fot. 6. Fragment kopuły kurhanu z widocznym obsunięciem się gruntu poniżej krzyża (zima 2012). Widok od strony wejścia do budowli. Po lewej stronie kurhanu widoczny ołtarz polowy.

Photo 6. Part of the burial mound dome with visible landslide below the cross (winter 2012). The view from the side of the building entrance. On the left of the burial mound there is a field altar visible.



### 3. Wnioski

Budowla w Karniowicach jest określana jako pierwsza tego typu w Europie. Jest budowlą na miarę XXI wieku. Łączy w sobie tradycję chowania zmarłych, zaczerpniętą z historii egipskich piramid, katakumb rzymskich, kaplic książęcych czy królewskich z tradycją słowiańskiego grzebania zmarłych. Budowla może być inspiracją i przykładem architektury tradycyjnej w nowoczesnym rozwiązaniu użytkowym osadzonego w lokalnej tradycji budowlanej.

W kurhanie jest możliwość pochówku około 2 tysięcy zmarłych na 5 arach jakie zajmuje budowla. Jest to w porównaniu do cmentarza tradycyjnego 30-krotna oszczędność miejsca. Rozwiązanie i pomysł taki uzmysławia bezsprzecznie przewagę kurhanu nad cmentarzem tradycyjnym. To najlepsze rozwiązanie dla miast, w których brakuje miejsc na cmentarze.

### Literatura

- [1] Kobiela M., Machnik D.: Technologia wykonania monolitycznej kopuły żelbetowej formowanej na powłoce pneumatycznej. *Przegląd Budowlany*, 8-9/1995, 29- 32.
- [2] Kowalewska-Marszałek, Włodarczak P.: Kurhany i obrządek pogrzebowy w IV-II tysiącleciu p.n.e. , Kraków-Warszawa: IAE PAN, IA UW, 2011 , s. 27-65.
- [3] <http://pl.wikipedia.org/wiki/Kurhan>.
- [4] Projekt budowlany : Parafialny Ośrodek Pamięci Zmarłych w Karniowicach.

## UNIQUE DOME-SHAPED CONSTRUCTION OF A BURIAL MOUND

### Summary

The article presents a burial mound – a cemetery chapel dedicated to the burial of the dead and the religious rituals connected with it; built in Karniowice near Trzebina. The burial mound combines modern and ancient elements and constitutes a mixture of the design ideas of the Egyptian pyramids, Roman catacombs, princely and royal chapels with a Slavonic tradition of burying the dead or Indian burial mounds on the Mississippi River. The purpose of the construction was to reduce the cemetery area, which is currently a notable innovation on a global scale. The burial mound gives, in comparison with a traditional cemetery, a 30-fold saving space, and after special treatments that will mineralize bodies, as much as 100-fold: 1600 burials at five ares of land. Such an effect has been achieved by applying a Monolithic system for the construction of the dome. The system uses soft permanent formwork in a pneumatic form. It is a method which is little known and rarely used in Poland. Due to the use of the method the dome is highly resistant to mining damage and the construction time was significantly shortened. What is more, the maintenance costs including energy for heating and cooling of the interior have been reduced which is very important for this kind of a building. The combination of these features resulted in a unique structure, which can be a good future option for city cemeteries where there is a shortage of burying places.

**Keywords:** tomb, mound, shotcreting, permanent formwork

DOI:10.7862/rb.2014.92

*Przesłano do redakcji: 18.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Michał KOŁACZKOWSKI<sup>1</sup>

## AKTUALNE WYMOGI KONSTRUKCYJNE DOTYCZĄCE PODKŁADÓW W PODŁOGACH PŁYWAJĄCYCH W ASPEKCIE BŁĘDÓW PROJEKTOWYCH I WYKONAWCZYCH

W niniejszym artykule przedstawiono najważniejsze zdaniem autora wytyczne, zawarte w aktualnej literaturze technicznej, dotyczące projektowania i wykonawstwa monolitycznych podkładów w podłogach pływających. Skupiono się na podłogach w pomieszczeniach wewnętrznych, przeznaczonych na pobyt ludzi. Główną uwagę zwrócono na warunki prowadzenia robót i przygotowanie podkładów monolitycznych do wykończenia posadzkami z materiałów syntetycznych, takich jak wykładziny PVC, czy posadzki żywiczne. Zwrócono uwagę na brak obowiązujących przepisów techniczno-budowlanych, obejmujących zagadnienie robót wykończeniowych, w tym prac związanych z wykonywaniem warstw podłogowych. Przedstawiono argumenty przemawiające za koniecznością wykonywania warstw podłogowych na podstawie szczegółowych projektów wykonawczych. Opisano zagadnienia, które zdaniem autora powinny być uwzględnione w projekcie wykonawczym, w celu uniknięcia błędów w realizacji oraz ewentualnych sporów przy odbiorze robót. Zwrócono między innymi uwagę na potrzebę indywidualnego dobierania parametrów podkładu monolitycznego, z uwzględnieniem planowanych obciążeń oraz podatności warstwy sprężystej, na której spoczywa podkład. Przedstawiono wybrane błędy projektowe i wykonawcze dotyczące dylatacji podkładów monolitycznych, które zostały zaobserwowane przez autora w zrealizowanych obiektach. Opisano między innymi często popełniane błędy związane z wykonywaniem dylatacji przeciwskurczowych, takie jak brak dylatacji w miejscach wymuszonych kształtem pomieszczenia i występującymi w nim elementami konstrukcyjnymi oraz brak prawidłowego wykończenia szczeliny dylatacyjnej podkładu przed wykonaniem warstwy posadzkowej. Zaprezentowano metody zszywania dylatacji skurczowych, stosowane obecnie w celu uciągnięcia powierzchni podkładu i zapobiegania procesowi klawiszowania zdylatowanych pól podkładu.

**Słowa kluczowe:** podkłady monolityczne, podłogi pływające, dylatacje podkładów, zszywanie dylatacji skurczowych

---

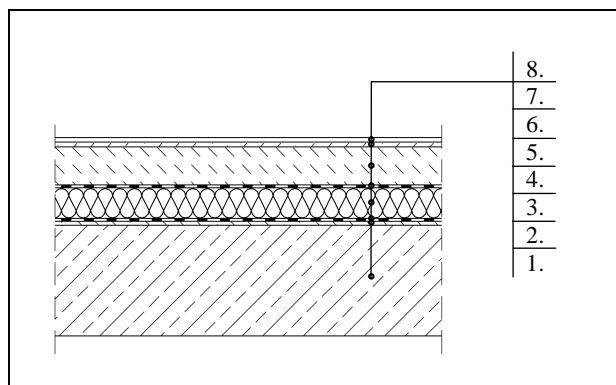
<sup>1</sup> mgr inż. Michał Kołaczkowski, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Zakład Budownictwa i Fizyki Budowli, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: kolaczko@o2.pl, tel.: 12 628 21 33

## 1. Wprowadzenie

Wykonanie warstw podłogowych, powinno być przeprowadzone zgodnie ze szczegółową dokumentacją projektową. W praktyce często podłogi wykonywane są jedynie na podstawie projektów budowlanych lub projektów wykonawczych, w których dokumentacja dotycząca warstw podłogowych jest zmarginalizowana. Podstawowym błędem projektowym jest ograniczenie się w dokumentacji wykonawczej jedynie do zaznaczenia na rzutach rodzajów wykończenia podłóg oraz sporządzenia przekrojów wraz z ich ogólnym opisem. W dokumentacji projektowej często pomijane są informacje dotyczące parametrów poszczególnych warstw oraz wytyczne do ich wykonywania, użytkowania i konserwacji. Często w projekcie wykonawczym brakuje rysunków takich jak rozplanowanie dylatacji oraz niezbędne szczegóły wykończeniowe. Ponieważ warstwy podłogowe w pomieszczeniach przeznaczonych na pobyt ludzi traktowane są jako elementy wykończeniowe, stąd obowiązek sporządzenia dla nich dokumentacji projektowej spoczywa na projektantach architektury. Część zagadnień związanych z konstrukcją podłogi wymaga jednak dokładnej analizy obliczeniowej – w tym między innymi analizy statyczno-wytrzymałościowej, która mieści się bardziej w kompetencjach projektantów konstrukcji. Zważywszy między innymi na powyższe oraz na złożoność zagadnienia jest ono najczęściej pomijane w dokumentacji projektowej. Konsekwencją braków projektowych, niewystarczającej wiedzy wykonawców oraz braku precyzyjnych uregulowań prawnych są różnego typu błędy w realizacji skutkujące między innymi zniszczeniami podkładów, a w konsekwencji i posadzek.

## 2. Przedmiot rozważań

Przedmiotem rozważań niniejszego artykułu są podkłady monolityczne spoczywające na izolacji termicznej lub akustycznej, występujące w tak zwanych podłogach pływających. Układ warstw podłogi pływającej przedstawiono na rysunku 1. W artykule skupiono się na wymaganiach i zaleceniach dotyczących warstwy podkładu, ponieważ jego jakość bezpośrednio wpływa na estetykę i trwałość posadzki. Przedstawiono wytyczne dotyczące podłóg wykańczanych posadzkami z materiałów syntetycznych takich jak posadzki żywiczne, czy wykładziny PVC, w pomieszczeniach wewnętrznych przeznaczonych do pobytu ludzi. Wyboru problemów dokonano w oparciu o własne obserwacje z realizacji obiektów.



Rys. 1. Podłoga pływająca:

1) podłoże – np. płyta stropowa, 2) ewentualna warstwa wyrównawcza, 3) ewentualna paroizolacja, 4) warstwa sprężysta – izolacja termiczna/akustyczna, 5) warstwa poślizgowa, 6) podkład, 7) ewentualna warstwa wyrównawcza, 8) posadzka

Fig. 1. Floating floor:

1) subfloor – e.g. floor slab, 2) optional levelling layer, 3) optional vapour barrier, 4) spring layer – thermal/acoustic insulation, 5) separating layer, 6) screed, 7) optional levelling layer, 8) flooring

### 3. Obowiązujące przepisy i literatura

Zgodnie z prawem budowlanym należy stosować się do aktualnie obowiązujących przepisów techniczno-budowlanych. Pośród nich nie ma jednak przepisów związanych szczegółowo z pracami wykończeniowymi – w tym również dotyczących warstw podłogowych. Obowiązujące normy dotyczące podkładów monolitycznych [9,10] obejmują swoim zakresem jedynie definicje i klasyfikacje właściwości materiałowych, bez wskazania wytycznych konstrukcyjnych. Podstawowym źródłem wytycznych dla inżynierów są więc „Warunki techniczne wykonania i odbioru robót budowlanych”, wydane przez Instytut Techniki Budowlanej w serii zeszytów (między innymi [2,4,5]) lub inne wydawnictwa. Zbiór wytycznych wykonawczych dotyczących podłóg znaleźć można również w poradnikach [8] oraz materiałach informacyjnych producentów poszczególnych materiałów budowlanych. Wymienione wyżej źródła skierowane są głównie do wykonawców. Niejednokrotnie można znaleźć tam odwołania do wykonania zgodnie z projektem, natomiast z punktu widzenia projektanta problem nie zostaje rozwiązany. Pomocnym źródłem informacji są artykuły i referaty konferencyjne, które opisują przeprowadzone badania i ich wyniki oraz opisują przyczyny i konsekwencje błędów, które niestety bardzo często występują w realizacjach podłóg.

## **4. Zalecenia literaturowe**

### **4.1. Wymogi normowe dla podkładów monolitycznych**

Zgodnie z normą [9] monolityczne podkłady podłogowe powinny być obowiązkowo poddane badaniom wytrzymałości na ściskanie i zginanie oraz w przypadku podkładów cementowych dodatkowo odporności na ścieranie lub nacisk koła. Dla podkładów anhydrytowych dodatkowo należy sprawdzić wartość pH. Norma nie podaje jednak wymaganych wartości tych parametrów. Norma ta nie porusza zagadnień związanych z wymaganiami konstrukcyjnymi podłóg.

### **4.2. Wytyczne z literatury technicznej**

#### **4.2.1. Minimalna grubość i wytrzymałość podkładu**

W wytycznych [2] podano minimalne dopuszczalne parametry podkładów monolitycznych w podłogach pływających, które mogą być przyjęte w przypadku gdy obciążenia podłogi nie przekraczają  $1,5 \text{ kN/m}^2$ . Minimalna grubość podkładu monolitycznego ułożonego na sprężystej warstwie izolacji termicznej lub akustycznej powinna wynosić 40 mm. Wymagane parametry określone zgodnie z normą [9] wynoszą odpowiednio – minimalna klasa wytrzymałości na ściskanie C20, minimalna klasa wytrzymałości na zginanie F4. Przy obciążeniu podłogi powyżej  $1,5 \text{ kN/m}^2$  instrukcja zaleca przyjęcie podkładu o wyższej wytrzymałości oraz większej grubości lub zastosowanie zbrojenia z siatki prętów ułożonych krzyżowo w środku grubości podkładu. Według aktualnie obowiązującej normy obciążeniowej PN-EN 1991-1-1 (Eurokod 1) [12] zalecane charakterystyczne obciążenie użytkowe stropów pomieszczeń mieszkalnych przekracza  $1,5 \text{ kN/m}^2$  - wynosi  $2,0 \text{ kN/m}^2$ , co wyklucza przyjmowanie minimalnych parametrów podkładu. Należy zwrócić uwagę, że w praktyce na wielkość wymaganych parametrów podkładu, poza samą wartością obciążenia ma również wpływ podatność warstwy izolacji termicznej lub akustycznej znajdującej się pod podkładem. Obecnie na rynku występują materiały izolacyjne o znacznie różniących się parametrach wytrzymałościowych i zróżnicowanej sztywności. Przykładowo dla stosowanego powszechnie styropianu EPS CS(10)80, przy obciążeniu 80 kPa, odkształcenie względne wynosi maksimum 10%, co dla warstwy grubości 40mm daje ugięcie równe 4 mm. Dla porównania płyta ze styropianu akustycznego o grubości 40 mm, o poziomie ściśliwości CP3 zgodnie z PN-EN 13163:2013 [11], może ugiąć się o 3 mm przy obciążeniu warstwy wyrównawczej wielkości 4 kPa. Między materiałami tymi występuje około 15-krotna różnica podatności na obciążenie statyczne. Zatem w celu uniknięcia potencjalnych uszkodzeń podkładu, jego parametry muszą być określone każdorazowo przez projektanta na podstawie indywidual-

nych obliczeń statyczno-wytrzymałościowych, z uwzględnieniem podatności warstwy sprężystej.

#### **4.2.2. Warunki prowadzenia robót**

Temperatura podkładu w trakcie wykonywania posadzki z materiałów syntetycznych oraz jej utwardzania powinna być wyższa niż 15°C, a wyroby do wykonywania posadzki powinny mieć temperaturę równą lub zbliżoną do podkładu. Maksymalna wilgotność powietrza podczas wykonywania posadzki nie powinna przekraczać 70%. Temperatura powietrza powinna zawierać się w przedziale 15-25°C [5].

#### **4.2.3. Wilgotność maksymalna podkładu**

Po wykonaniu podkładu betonowego, przed przystąpieniem do dalszych prac wykończeniowych, konieczne jest wykonanie pomiaru jego wilgotności. W literaturze podane są maksymalne dopuszczalne wartości wilgotności podkładów w zależności od ich typów oraz sposobów wykończenia, przy zastosowaniu różnych metod pomiarowych. Poniżej podano wilgotności maksymalne przy zastosowaniu wykończenia z materiałów syntetycznych na podstawie [5]. Rekomendowaną metodą badań jest metoda suszarkowo-wagowa. Dopuszczalne wartości wilgotności podkładu przy pomiarze tą metodą wynoszą maksymalnie 3% dla podkładów cementowych (przy temperaturze suszenia 105°C) i 1,5% dla podkładów anhydrytowych (przy temperaturze 40°C). Pomiarzy wykonane tą metodą są najbardziej dokładne. Inną dopuszczalną metodą jest tak zwana metoda karbidowa (CM). Wilgotności maksymalne podkładu, mierzone tą metodą nie powinny przekraczać: 1,8% dla podkładów cementowych i 0,5% dla podkładów anhydrytowych. Należy zwrócić uwagę, że w nieco starszej literaturze można znaleźć zawyżone wartości dopuszczalne – 2,5% (CM) dla podkładów cementowych i 1,0% (CM) dla podkładów anhydrytowych [2]. Wartości te można znaleźć również w licznych poradnikach na stronach internetowych, opartych na błędnych danych. Przyjęcie takich wartości spowoduje przekroczenie dopuszczalnej normy o około 100%, z poważnymi konsekwencjami, takimi jak możliwość powstawania kilkunastocentymetrowych pęcherzy w warstwie syntetycznej posadzki przyklejonej do podkładu. Pomiaru wilgotności można dokonać również metodą elektrooporową [1]. Metoda ta obarczona jest znacznym błędem pomiarowym i nie jest oficjalnie uznawana do oceny wilgotności podkładu. Nadaje się jednak do znalezienia najbardziej zawilgoconych obszarów podkładu, w których następnie można dokonać właściwego pomiaru. Należy również zwrócić uwagę na ograniczenia tej metody w przypadku podkładów ze zbrojeniem stalowym.

#### 4.2.4. Cechy makroskopowe podkładu

Przed położeniem posadzki pokłady podłogowe powinny być czyste, odpylone, bez pęknięć i ubytków, powinny mieć równe i gładkie powierzchnie [2]. Odchylenie powierzchni podkładu od poziomu nie powinno przekraczać 2 mm/m i 5 mm na całej długości lub szerokości pomieszczenia [2]. Uniknięcie pęknięć i szerokich zarysowań podkładu, nieodłącznie związane jest z koniecznością odpowiedniego doboru parametrów wytrzymałościowych podkładu, starannością wykonania, odpowiednio przeprowadzoną pielęgnacją podkładu oraz z właściwym wykonaniem dylatacji. W celu zapewnienia odpowiedniej jakości i uniknięcia swobody interpretacji przez wykonawców i odbiorców, w projekcie powinna być podana metoda badania powierzchni podkładu oraz wymagane wyniki uzależnione od projektowanego rodzaju posadzki.

#### 4.2.5. Dylatacje

Szczeliny dylatacyjne podkładu zdefiniowane są jako szczeliny wykonane między polami podkładu, pozwalające na akomodację ich odkształceń lub wzajemnych ruchów [2]. Dylatacje podkładów monolitycznych można podzielić na izolacyjne i przeciwskurczowe [8]. Dylatacje izolacyjne wykonywane są jako szczeliny pełne w miejscach gdzie występują dylatacje konstrukcji wsporczej, po obwodzie podkładu w celu oddzielenia od ścian (dylatacja obwodowa), wokół elementów konstrukcyjnych takich jak np. słupy oraz w miejscach zmiany grubości podkładu. W podkładach narażonych na zmiany temperatury np. zlokalizowanych na zewnątrz, dylatacje izolacyjne muszą być wykonywane ze względów termicznych, a ich szerokość i rozstaw zależy od rozszerzalności cieplnej materiału i gradientu temperatur. Jako dylatację izolacyjną traktuje się również warstwę poziomą oddzielającą podkład od podłoża lub posadzkę od podkładu, czyli tak zwaną warstwę poślizgową. Dylatacje przeciwskurczowe zwane są także pozornymi ponieważ najczęściej wykonywane są jako nacięcia podkładu sięgające 1/2 lub 1/3 grubości podkładu. Początkują one w zamierzonych liniach pęknięcia wynikające ze skurczu podkładu. Zgodnie z wytycznymi [8] szczeliny przeciwskurczowe w podkładach cementowych lub betonowych powinny ograniczać pola o powierzchni nie większej niż 36 m<sup>2</sup>, przy długości boku prostokąta nieprzekraczającej 6 m. Dodatkowo powinien być spełniony wymóg, aby stosunek dłuższego boku do krótszego był nie większy niż 1,5 [3]. Na podkładach podzielonych licznymi dylatacjami zazwyczaj wykonywana jest posadzka nieprzerwana w miejscach dylatacji podkładu. W celu uniknięcia błędów związanych z tym zagadnieniem, konieczne jest podanie w projekcie wykonawczym dokładnych wytycznych do wykończenia szczelin.

## 5. Wybrane błędy i problemy dotyczące dylatacji podkładów

Z obserwacji autora wynika, że wykonawcy zazwyczaj pamiętają o konieczności wprowadzenia dylatacji obwodowej podkładu, która zapobiega jego zespoleniu z pionowymi elementami konstrukcyjnymi. Wkładka izolacyjna wykonywana jest jednak niejednokrotnie z najcieńszej pianki polietylenowej, która nie spełnia funkcji izolacji akustycznej dla dźwięków uderzeniowych. Przy rozplanowaniu dylatacji przez wykonawców, często nie jest brany pod uwagę kształt pomieszczenia i wpływ występujących w nim elementów konstrukcyjnych. Na rysunku 2a przedstawiono widok korytarza o szerokości 2 m i długości około 40 m. Nie wykonano tu dylatacji w progach drzwi co skutkowało powstaniem krzywoliniowych pęknięć skurczowych podkładu, jak pokazano na rysunku 2b. Na rysunku 2c widzimy pomieszczenie, w którym wykonano jedynie dylatację obwodową podkładu wzdłuż ścian i krawędzi słupów. Po kilkudziesięciu godzinach od wykonania podkładu powstały w nim pęknięcia zapoczątkowane w narożach słupów. Były one skutkiem ograniczenia przez słupy swobodnego skurczu podkładu. Zastosowanie dylatacji typu „karo” wraz z dylatacjami przeciwskurczowymi, jak pokazano na rysunku 2d, uchroniłoby przed tego typu uszkodzeniem.

Wszelkie pęknięcia niedopuszczalnie osłabiają podkład, oraz znacznie obniżają estetykę i trwałość posadzki. Nawet w przypadku wykończenia posadzką żywiczną lub wykładziną PVC, które dzięki swojej ciągliwości nie ulegną spękaniam, na powierzchni posadzki będą widoczne niepożądane zarysy krawędzi szczelin. O ile niezamierzonych pęknięć da się uniknąć, to w monolitycznych podkładach cementowych i betonowych muszą wystąpić niejednokrotnie gęsto rozmieszczone szczeliny przeciwskurczowe. Pozostawienie ich bez wypełnienia lub wypełnienie nieodpowiednim materiałem spowoduje uwidocznienie ich zarysu na posadzce. Prawidłowe wykonanie ciągłej warstwy posadzki, możliwe jest po właściwym przygotowaniu podkładu. Przerwanie ciągłości posadzki, jak również i podkładu, konieczne jest oczywiście na liniach ewentualnych dylatacji konstrukcji nośnej. Koniecznym rozwiązaniem jest natomiast odpowiednie zszywanie dylatacji przeciwskurczowych, które w przeciwieństwie do dylatacji termicznych potrzebne są tylko w początkowej fazie pracy podkładu. Należy również zwrócić uwagę, że przy stosunkowo cienkich podkładach monolitycznych (grubości rzędu 50 mm), w przypadku położenia ich na wysoko podatnej warstwie izolacji akustycznej i wystąpienia nierównomiernego obciążania, może dojść do klawiszowania pól podkładów wzdłuż niezabezpieczonych szczelin dylatacyjnych. W dalszej części artykułu opisano stosowane obecnie metody zszywania szczelin przeciwskurczowych.





Rys. 2. Zdjęcia z realizacji podłogi pływającej pod posadzkę z wykładziny PVC: a) widok korytarza, b) zaznaczone pęknięcie podkładu wzdłuż otworu drzwiowego (1) oraz przeciwskurczowa dylatacja pozorna (2), c) zrealizowany podkład cementowy bez wymaganych dylatacji, d) zarys dylatacji typu „karo” oraz dylatacji przeciwskurczowych, które powinny być zostać wykonane

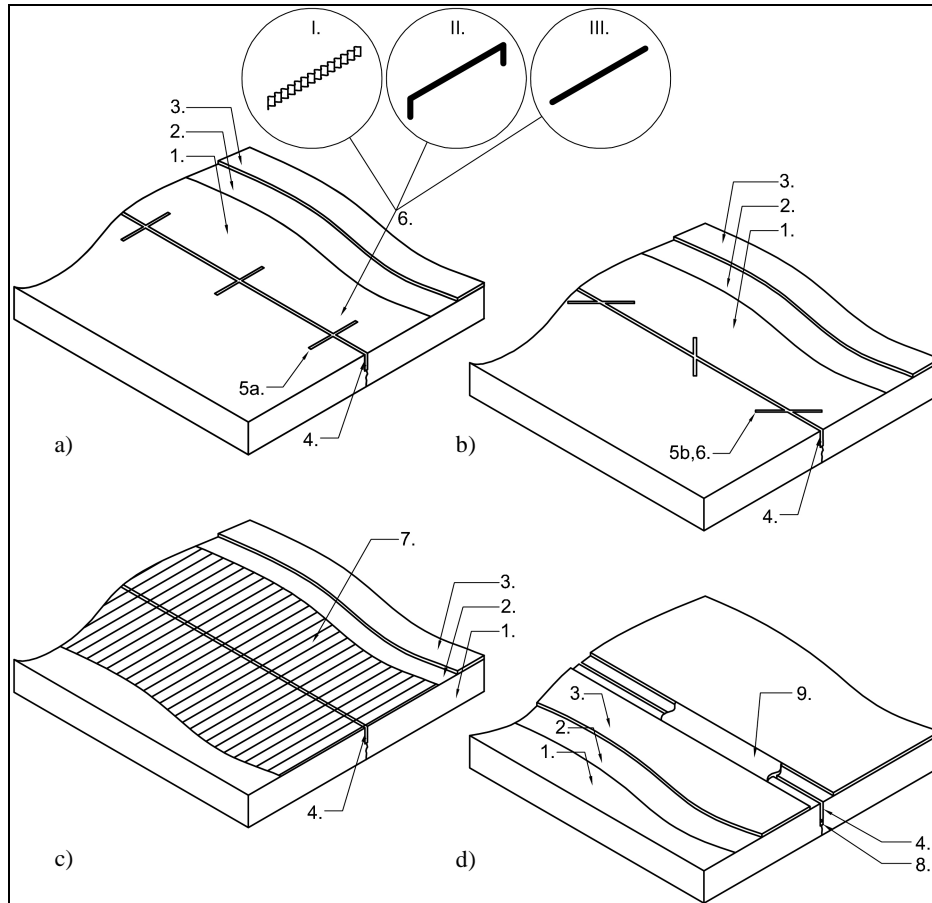
Fig. 2. Photos of the floating floor prepared to be covered by PVC flooring: a) corridor view, b) marked crack of the cementitious screed along the door opening (1) and the apparent induced contraction joint (2), c) cementitious screed executed without the required contraction joints, d) outline of the “caro”-type joints and contraction joints, which should have been applied

## 6. Zszywanie dylatacji skurczowych

Do działań związanych ze zszywaniem dylatacji skurczowych należy przystąpić dopiero gdy proces skurczu się ustabilizuje, nie wcześniej niż po 28 dniach od wykonania podkładu. Im później szczelina dylatacyjna zostanie wypełniona, tym mniejsze będą siły odrywające masę wypełniającą od krawędzi szczeliny. Szczelinę należy poszerzyć do szerokości około 5 do 8 mm i pogłębić do około 3/4 grubości podkładu. Szczelina musi być dokładnie oczyszczona. Zszywanie dylatacji pozornych, podobnie jak reperacja rys i pęknięć może być wykonywana przy użyciu różnych metod.

**Metoda kłamrowania** [6, 7]. W poprzek przygotowanej uprzednio szczeliny wykonuje się bruzdy o długości około 15cm w rozstawie co około 20 cm.

Bruzdy wykonuje się prostopadle do zszywanej szczeliny (rys. 3a) lub pod kątem  $45^\circ$  (rys. 3b).



Rys. 3. Sposoby zszywania dylatacji skurczowych: a), b) klamrowanie z żywicowaniem, c) zastosowanie maty mostkującej rysy, d) spojenie masą twardoplastyczną; 1- podkład cementowy, 2- grunt, 3- wylewka samopoziomująca, 4- poszerzone nacięcie podkładu, 5a- bruzdy na kotwy pod kątem  $90^\circ$  do dylatacji, 5b- bruzdy na kotwy pod kątem  $45^\circ$  do dylatacji, 6- kotwy stalowe (I- łącznik falowy, II- klamra, III- pręt), 7- mata z równoległymi ciągami włókien szklanych, nałożona z masą szpachlową, 8- sznur dylatacyjny, 9- elastyczna masa poliuretanowa

Fig. 3. Contraction joints sewing methods: a), b) anchoring and resin filling, c) application of crack bridge, d) flexible compound connection; 1- cementitious screed, 2- primer, 3- self-levelling compound, 4- widened screed cut, 5a-  $90^\circ$  degree cross-cuts, 5b-  $45^\circ$  degree cross-cuts, 6- steel anchors (I- corrugated link, II- stitching staple, III- steel bar), 7- fiberglass fabric with parallel fibers laid with smoothing compound, 8- backer rod, 9- flexible polyurethane compound

W oczyszczone bruzdy wprowadza się kotwy stalowe. Jako kotwy stosowane są pręty proste, klamry lub w celu uzyskania większej powierzchni kotwienia – łączniki falowe (rys. 3a). Należy zwrócić uwagę, że kotwy stalowe nie mogą być stosowane w podkładach anhydrytowych ze względu na korozję. W tak przygotowaną szczelinę i bruzdy wprowadza się dwuskładnikową żywicę np. epoksydową z utwardzaczem. Powierzchnię przed stwardnieniem posypuje się piaskiem kwarcowym, w celu uzyskania jednolitej przyczepności do podkładu.

**Zastosowanie maty mostkującej rysy [7].** Powiększoną i oczyszczoną szczelinę wypełnia się cementową masą szpachlową. Na powierzchni górnej podkładu, zaszpachlowuje się matę z równoległymi ciągami włókien szklanych o wysokiej wytrzymałości na rozciąganie (rys. 3c).

**Zastosowanie elastycznej masy poliuretanowej [7].** Przygotowaną i oczyszczoną szczelinę zabezpiecza się, na przykład poprzez zaklejenie taśmą malarską, wywijając ją dla oznaczenia na ściany. Na zagruntowanym podkładzie wykonuje się wylewkę samopoziomującą, a po jej wyschnięciu wycina się ją i usuwa wraz z taśmą na szerokości minimum 20mm wzdłuż szczeliny. W ten sposób wzdłuż szczeliny formuje się kanał w kształcie litery „T” (rys 3d). Na dno szczeliny wprowadza się sznur dylatacyjny. Szczelinę wypełnia się masą poliuretanową w stanie płynnym, używając przygotowanych wcześniej krawędzi wylewki samopoziomującej jako prowadnic. Docelowo masa osiąga konsystencję twaroplastyczną. Po wyschnięciu masy szlifuje się ją w celu wyrównania z powierzchnią wylewki samopoziomującej.

Dwa pierwsze rozwiązania stanowią stosunkowo sztywne połączenie zdylatowanych części podkładu. Trzecie, nowoczesne rozwiązanie cechuje się większą podatnością ze względu na zastosowanie jako łącznika twaroplastycznej masy. Wybierając rozwiązanie należy wziąć pod uwagę konieczność dostosowania sztywności połączenia do sztywności konstrukcji wsporczej, oraz podatności warstwy izolacyjnej, na której położony jest podkład. Należy podkreślić, że metod tych nie można stosować w przypadku dylatacji izolacyjnych, które muszą pełnić swoją rolę przez cały okres funkcjonowania podkładu.

## 7. Wnioski

Warunkiem prawidłowego funkcjonowania podłogi jest właściwe wykonanie wszystkich jej warstw, ze zwróceniem szczególnej uwagi na konstrukcję podkładu. Ze względu na liczne wymagania konstrukcyjne i różnorodność aktualnie stosowanych materiałów, roboty powinny być prowadzone na podstawie szczegółowych projektów wykonawczych. W konsekwencji braku wystarczającej wiedzy wykonawców i unikania tematu w opracowaniach przez projektantów, występuje wiele problemów ze zrealizowanymi podłogami. Należy zwrócić uwagę, aby parametry podkładów monolitycznych w podłogach pływających, a w szczególności grubość podkładu, wytrzymałość na ścislenie i zginanie oraz ewentualnie stopień zbrojenia, były przyjmowane indywidualnie, na

podstawie obliczeń, z uwzględnieniem planowanych obciążeń i podatności warstw izolacyjnych. Przy sprawdzaniu maksymalnej wilgotności podkładu należy uważać na prawidłowość przyjmowanych wartości granicznych i ich zgodność z metodą pomiarową. Nieodzownym elementem projektu wykonawczego powinno być rozplanowanie i podanie sposobu wykończenia dylatacji podkładów monolitycznych.

## Literatura

- [1] Drobiec Ł., Jasiński R., Piekarczyk A.: Diagnostyka konstrukcji żelbetowych, T.1, Metodologia, badania polowe, badania laboratoryjne betonu i stali, PWN, Warszawa 2010
- [2] Goliszek A., Prokop M.: Warunki techniczne wykonania i odbioru robót budowlanych, Część B, Zeszyt 7: Posadzki z wykładzin włókienniczych i polichlorku winylu, ITB, Warszawa 2009
- [3] Hajduk P.: Projektowanie podłóg przemysłowych, PWN, Warszawa 2013
- [4] Sokalska A., Ściślewski Z., Suchan M.: Warunki techniczne wykonania i odbioru robót budowlanych, Część B, Zeszyt 3: Posadzki mineralne i żywiczne, ITB, Warszawa 2013
- [5] Sudoł E., Kolbrecki A., Piętka D., Popczyk J., Prejzner H.: Warunki techniczne wykonania i odbioru robót budowlanych, Część B, Zeszyt 12: Podłogi sportowe w obiektach krytych, ITB, Warszawa 2009
- [6] Wolski Z.: Parkieciarz. Podstawy wiedzy i praktyki zawodowej, Stowarzyszenie Parkieciarze Polscy, Warszawa 2007
- [7] Materiały informacyjne firmy Uzin: [www.uzin.pl](http://www.uzin.pl), [www.uzin.com](http://www.uzin.com)
- [8] Nowy poradnik majstra budowlanego, pod red. J. Panasa, Arkady, Warszawa 2012
- [9] PN-EN 13813:2003 – Podkłady podłogowe oraz materiały do ich wykonania - Materiały - Właściwości i wymagania
- [10] PN-EN 13318:2002 – Podkłady podłogowe oraz materiały do ich wykonania - Terminologia
- [11] PN-EN 13163:2013 – Wyroby do izolacji cieplnej w budownictwie - Wyroby ze styropianu (EPS) produkowane fabrycznie - Specyfikacja
- [12] PN-EN 1991-1-1 – Eurokod 1: Oddziaływania na konstrukcje - Część 1-1: Oddziaływania ogólne - Ciężar objętościowy, ciężar własny, obciążenia użytkowe w budynkach

## **CURRENT CONSTRUCTION REQUIREMENTS FOR THE FLOATING SCREEDS IN THE CONTEXT OF DESIGN AND EXECUTIVE ERRORS**

### **S u m m a r y**

The article discusses the most important guidelines found in the present technical literature, whose negligence leads to damages of the floors. It focuses on the floors in the inner compartments designed to accommodate people. Main attention was paid to conditions for the execution of works and preparation of the monolithic screeds in floating floors, covered with synthetic layers, such as PVC or resin floorings. Lack of existing technical-constructional regulations was pointed out, especially in the aspect of finishing works, including execution of the floorings. Execution of floor layers based on the detailed executive projects was strongly suggested. Issues that should be included in the executive project were discussed, in order to avoid errors in the implementation and disputes upon the acceptance of the works. The need for an individual matching the parameters of the monolithic screed was highlighted, taking into account the planned loads and susceptibility of the elastic layer under the screed. Commonly met design and executive errors related to joints in monolithic screeds were presented, together with the possible ways to avoid them. Mistakes associated with the execution of contraction joints, such as the lack of joints forced by the shape of the room and presence of the constructional elements as well as the lack of proper finishing of the joint before covering with the flooring were discussed. Modern methods of sewing of contraction joints, used to bind the screed surface and prevent curling of the separated screed bays were also proposed.

**Keywords:** monolithic screed, floating screed, screed joints, sewing of contraction joints

DOI:10.7862/rb.2014.93

*Przesłano do redakcji: 02.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Janusz KONKOL<sup>1</sup>  
Grzegorz PROKOPSKI<sup>2</sup>

## FRAKTALNY OPIS POWIERZCHNI PRZEŁOMU BETONÓW CEMENTOWYCH

W artykule zaprezentowano podejście do określania wymiaru fraktalnego linii profilowej wydzielonej z powierzchni przełomu betonu z uwzględnieniem w analizie takich składników struktury, jak: ziarno kruszywa grubego oraz stwardniały zaczyn cementowy. W przypadku zarówno zaczynu cementowego, jak i ziaren kruszywa grubego analizie fraktalnej poddano dwa warianty. Dla ziaren kruszywa obliczono wymiar fraktalny  $D$  w przypadku przełomu poziarnowego oraz w przypadku przejścia pęknięcia na wskroś ziarna. Zaczyn cementowy poddano natomiast analizie w przypadku przełomu powstałego przez sam zaczyn cementowy oraz w przypadku powierzchni przełomu powstałej na skutek oddzielenia się kruszywa od matrycy cementowej (odcisk w zaczynie po przełomie poziarnowym). Badania fraktalne przeprowadzono na powierzchniach przełomu betonów dwiema metodami: pudełkową ( $D_{BC}$ ) i obwiedni morfologicznej ( $D_m$ ). Wykazano, że znaczący wpływ na wartość obu wymiarów fraktalnych  $D_{BC}$  i  $D_m$  mają ziarna kruszywa grubego bez względu na charakter pęknięcia. Stwierdzono, że największy wymiar fraktalny mają pęknięcia przechodzące przez ziarna kruszywa grubego, występujące zarówno w przypadku pęknięć poziarnowych ziaren kruszywa, jak i pęknięć ziaren kruszywa na wskroś. W obu wariantach uzyskano wartości wymiaru fraktalnego oboma metodami o około 11 % większe, aniżeli wartości wymiaru fraktalnego otrzymane w przypadku przejścia pęknięcia przez matrycę cementową. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że wymiar fraktalny  $D$  linii profilowej może być określany jako wartość średnioważona, uwzględniająca udział różnych typów pęknięć znajdujących się na linii profilowej.

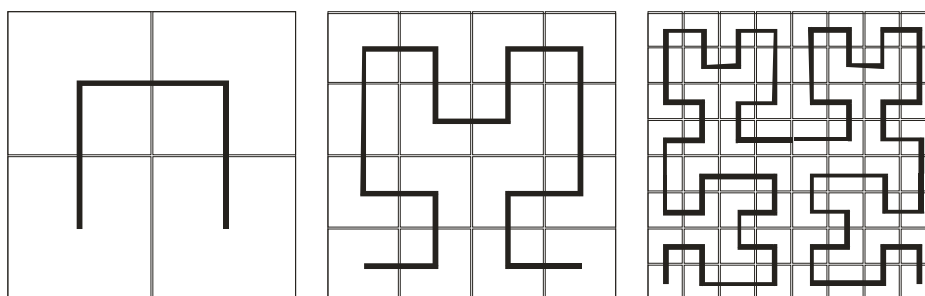
**Słowa kluczowe:** beton, powierzchnia przełomu, wymiar fraktalny, analiza powierzchni, profilometr laserowy.

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: dr inż. Janusz KONKOL, Katedra Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. (17) 865-1701, e-mail: janusz.konkol@prz.edu.pl.

<sup>2</sup> Prof. dr hab. inż. Grzegorz PROKOPSKI, Katedra Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. (17) 865-1439, e-mail: grzeprok@prz.edu.pl.

## 1. Wstęp

Od około 1980 roku geometria fraktalna dała nowe możliwości i narzędzia pozwalające na ilościowy opis struktur o nieregularnym kształcie, w tym powierzchni przełomu betonów. Uważany za twórcę geometrii fraktalnej Mandelbrot wykazał, że wymiar nie musi być tylko liczbą całkowitą, jak wymiar topologiczny w geometrii euklidesowej. Ten sposób rozumowania jest zgodny z naszą intuicją, przecież krzywa jest bardziej skomplikowana niż jednowymiarowa linia prosta, a zarazem wypełnia płaszczyznę w większym stopniu niż ta linia prosta. Powierzchnia o pewnym skomplikowaniu natomiast lepiej wypełnia przestrzeń, w której się znajduje, aniżeli dwuwymiarowa płaszczyzna. Przykładami krzywych mających wymiar równy 2 są: krzywa Peana, podana przez Giuseppe Peano w 1890 roku oraz krzywa Hilberta z 1891 roku, której autorem był David Hilbert. Tworzenie tych krzywych polega na powtarzaniu w nieskończoność narzuconej konstrukcji (rys. 1).



Rys. 1. Konstrukcja krzywej Hilberta

Fig. 1. The construction of the Hilbert curve

Pierwszy artykuł Mandelbrota dotyczący fraktali ukazał się w 1977 roku [1]. Mandelbrot wprowadził do nauki nowe słowo fraktal, które opisywało „niekształtne” formy nieobjęte wcześniej geometrią euklidesową, a pochodzące od łacińskiego słowa fractus, oznaczający podzielony, ułamkowy, a odpowiadający mu czasownik frangere znaczy łamać, tworzyć nieregularne fragmenty.

Fraktale są figurami posiadającymi pewne charakterystyczne cechy, takie jak:

- ✓ brak jednoznacznego kształtu,
- ✓ nie są określone wzorem matematycznym lecz zależnością rekurencyjną (np. zbiór Mandelbrota, krzywa Hilberta),
- ✓ samopodobieństwo; każdy wycięty fragment fraktala przypomina pierwotny fraktal,
- ✓ posiadają wymiar fraktalny  $D$  czyli liczbę określającą stopień ich złożoności; wymiar fraktalny danego zbioru to liczba, która mówi jak gęsto ten zbiór wypełnia przestrzeń metryczną, w której występuje.

Badania fraktalne dotyczące powierzchni zaczynów i betonów zapoczątkowali w 1985 roku Winslow [2] oraz w 1994 Saouma i Barton [3]. W następnych latach ukazało się wiele prac dotyczących analizy fraktalnej betonów, w tym prace badaczy krajowych [4-11].

Celem prowadzenia analiz fraktalnych było opisanie w sposób ilościowy uzyskanej powierzchni przełomu lub wydzielonej z niego linii profilowej, co pozwalało na poszukiwanie zależności między otrzymanym wymiarem fraktalnym, a właściwościami betonów [3-14]. Innym zadaniem badaczy jest dążenie do uzyskania możliwości modelowania zjawiska pęknięcia [15,16] na przykład przez wyrażenia linii profilowej opisem fraktalnym. Pęknięcie jest zjawiskiem, którego nie można opisać w sposób deterministyczny. Zdefiniowanie kształtu linii profilowej, jako krzywej fraktalnej, pozwala na znalezienie nie tylko jednego rozwiązania, lecz nieskończenie dużej liczby rozwiązań spełniających dane kryteria. Na takie podejście pozwala właśnie geometria fraktalna, zwana również nową matematyką chaosu, która pozwala na opis zjawisk na pozór chaotycznych (chaos deterministyczny).

Celem niniejszego artykułu jest prezentacja uzyskanych wyników przeprowadzonej analizy fraktalnej linii profilowych, wydzielonych z powierzchni przełomów, z uwzględnieniem zarówno rodzaju składnika struktury betonu, jak i sposobu pęknięcia.

## 2. Zakres i metodyka badań

Do analizy fraktalnej wybrano pięć powierzchni przełomów betonów modyfikowanych dwoma dodatkami: popiołem fluidalnym lub metakaolinitem. W przypadku wszystkich betonów uzyskano wytrzymałość na ściskanie wynoszącą po 28 dniach dojrzewania od 37 do 51 MPa. Betony wykonano przy użyciu cementu CEM I 32,5 R i grysu bazaltowego do 16 mm z m. Wilków.

Badania fraktalne przeprowadzono przy użyciu profilometru laserowego Talysurf CLI 1000 firmy Taylor Hobson (rys. 2) wraz z oprogramowaniem analitycznym Talymap, do szybkiego bezstykowego pomiaru topografii powierzchni 3D oraz programu komputerowego *FRAKTAL\_Wymiar2D*<sup>3</sup>. Zastosowanie profilometrów laserowych do analizy morfologii powierzchni betonów jest coraz częstsze [17,18].

Mandelbrot [1] zdefiniował wymiar fraktalny jako:

$$D = \frac{\log N}{\log \frac{1}{s}}, \quad (1)$$

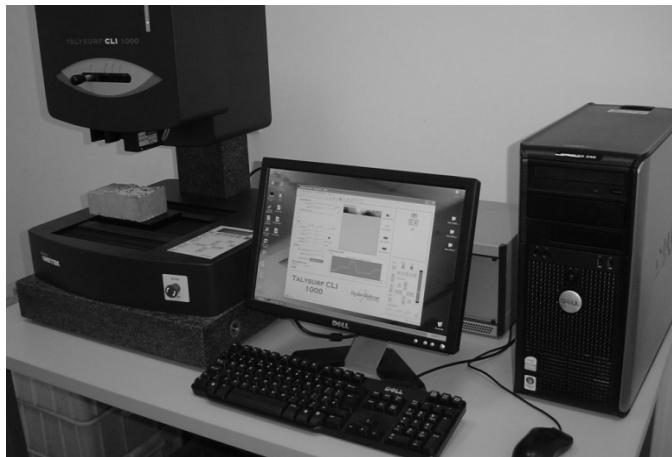
gdzie:  $N$  – liczba części tworzących wyjściową figurę fraktala,

<sup>3</sup> Konkol J. *FRAKTAL\_Wymiar2D*. Program komputerowy.



$s$  – stopień zmniejszania elementów tworzących fraktal przy kolejnych etapach jego budowy (współczynnik skalowania).

Obliczenie wymiaru fraktalnego dokonano dwiema metodami: pudełkową (*box counting method*) i metodą obwiedni morfologicznych (*morphological envelopes method*). Metoda pudełkowa polega na pokrywaniu linii profilowej pudełkami o zmiennej długości boku  $\varepsilon_i$ , przy jednoczesnym zliczaniu liczby pudełek  $N(\varepsilon_i)$ , w których znajduje się linia profilowa. Wymiar fraktalny  $D_{BC}$  określa się na podstawie nachylenia prostej zależności logarytmu liczby pudełek obliczonej przy danej wielkości pudełka  $\log(N(\varepsilon_i))$  od długości boku tego pudełka  $\log(\varepsilon_i)$ .



Rys. 2. Profilometr laserowy Talysurf CLI 1000

Fig. 2. High-resolution 3D surface profiling system Talysurf CLI 1000

Obliczenie wymiaru fraktalnego  $D_m$  metodą obwiedni morfologicznych polegało na wyznaczeniu górnej i dolnej obwiedni za pomocą przekształceń morfologicznych otwarcia i zamknięcia przy użyciu elementu strukturalnego w postaci odcinka, o zmiennej w każdym kroku, długości  $\varepsilon_i$ , który wyznaczy górną i dolną obwiednię obszar o polu powierzchni  $A(\varepsilon_i)$ . Wymiar fraktalny  $D_m$  obliczany jest na podstawie współczynnika kierunkowego zależności liniowej  $\ln A(\varepsilon_i)$  od  $\ln(\varepsilon_i)$ .

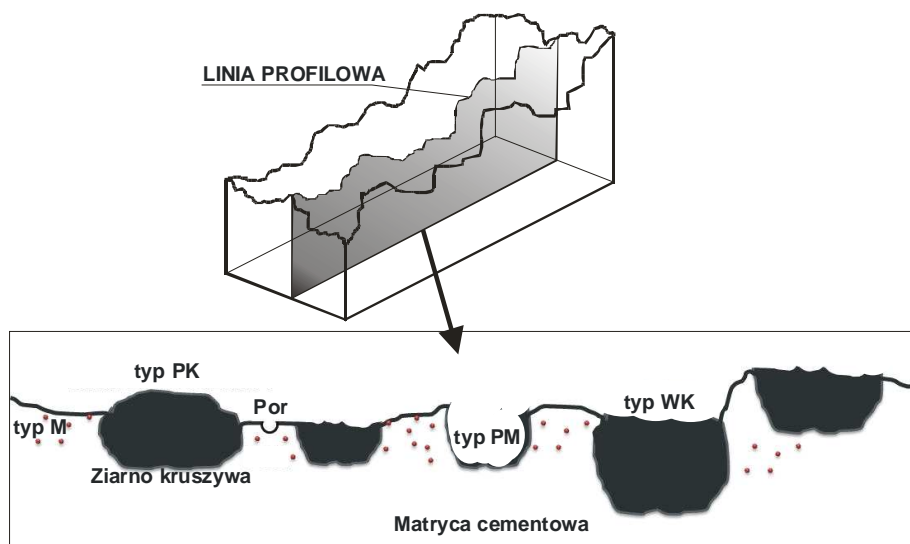
Jako krok dyskretyzacji punktów charakteryzujących linie profilowe przyjęto  $1 \mu\text{m}$ . Przy długości linii  $5 \text{ mm}$  dało to 5001 punktów opisujących kształt linii profilowej.

Geometria fraktalna umożliwia opis kształtu linii profilowej powierzchni przełomu betonu jednym parametrem - wymiarem fraktalnym. Wymiar ten zależy jednak od rodzaju i udziału poszczególnych faz w betonie. Może się rów-

niez różnicować w obrębie tej samej fazy. Na przykład sposób przejścia pęknięcia w obrębie ziarna kruszywa może nastąpić poziarnowo (na około ziarna) lub na wskroś ziarna. Długość linii profilowej wynoszącą 5 mm dobrano ze względu na wyróżnione typy pęknięcia w obrębie danego składnika struktury.

Wyróżniono następujące typy pęknięć (rys. 3):

- ✓ pęknięcie przechodzące wyłącznie przez matrycę cementową, typ M,
- ✓ pęknięcie poziarnowe od strony ziarna kruszywa grubego, typ PK,
- ✓ pęknięcie poziarnowe od strony matrycy cementowej, typ PM,
- ✓ pęknięcie na wskroś przez ziarno kruszywa, typ WK,
- ✓ pęknięcie przez różne fazy, przy analizie całej linii profilowej, bez względu na wyróżnione powyżej typy pęknięć, typ C.



Rys. 3. Przykładowa linia profilowa z zaznaczonymi typami pęknięć

Fig. 3. A sample line profile with selected types of cracks

Przy wyborze typów pęknięć pominięto fazę porów. Działanie takie było podyktowane wynikami wcześniejszych badań autorów [6,7,10,11], w których udowodniono, że wpływ tej fazy na wymiar fraktalny linii profilowej jest statystycznie nieistotny.

### 3. Analiza fraktalna

Analizę fraktalną przeprowadzono dla 26 linii profilowych, w tym 24 linii o długości 5 mm zgodnych z wyróżnionymi typami pęknięć oraz 2 linii profilowych porównawczych o długości 50 mm, będących złożeniem różnych typów pęknięć. Z uwagi na zróżnicowane pochylenie skanowanych linii profilowych,

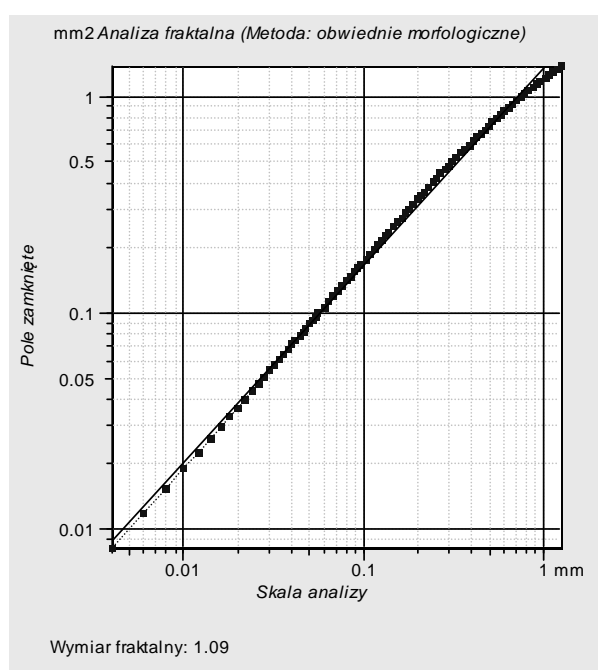
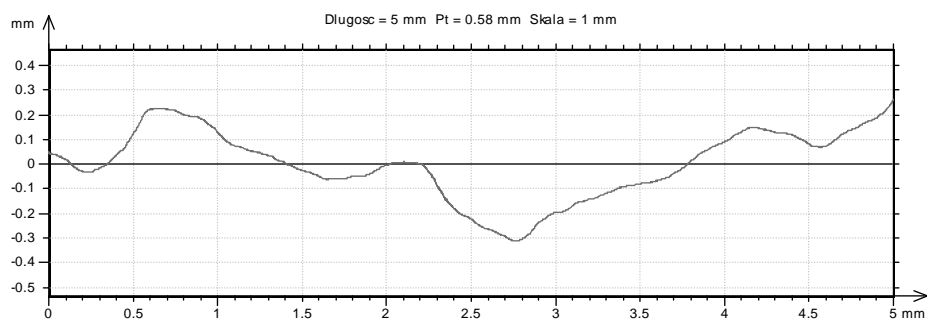
przed dokonaniem obliczenia wymiaru fraktalnego uzyskane linie profilowe poziomowano. Przykładowe linie profilowe, każdego typu, pokazano na rys. 4 i 5 (Pt – wysokość profilu).

Tabela 1. Wyniki badań wymiaru fraktalnego

Table 1. Results of the investigations of fractal dimension

Typ i numer linii profilowej	Długość linii profilowej, mm	Wymiar fraktalny		
		$D_{BC}$	$D_m$	
M_1	5	1,11	1,12	
M_2		1,10	1,14	
M_3		1,14	1,15	
M_4		1,07	1,09	
M_5		1,11	1,11	
M_6		1,09	1,09	
PK_1		1,22	1,22	
PK_2		1,28	1,21	
PK_3		1,17	1,18	
PK_4		1,13	1,14	
PK_5		1,28	1,27	
PM_1		1,20	1,18	
PM_2		1,02	1,05	
PM_3		1,08	1,08	
PM_4		1,17	1,14	
PM_5		1,11	1,12	
PM_6		1,16	1,16	
WK_1		1,20	1,18	
WK_2		1,30	1,28	
WK_3		1,29	1,28	
WK_4		1,18	1,17	
WK_5		1,17	1,18	
WK_6		1,31	1,25	
WK_7		1,18	1,17	
C_1		50	1,13	1,13
C_2			1,14	1,14

Wyniki obliczeń wymiaru fraktalnego  $D_{BC}$  i  $D_m$  zestawiono w tabeli 1, a wartości średnie wraz z podaniem błędu standardowego wartości średniej wymiaru fraktalnego w zależności od typu pęknięcia podano w tabeli 2.



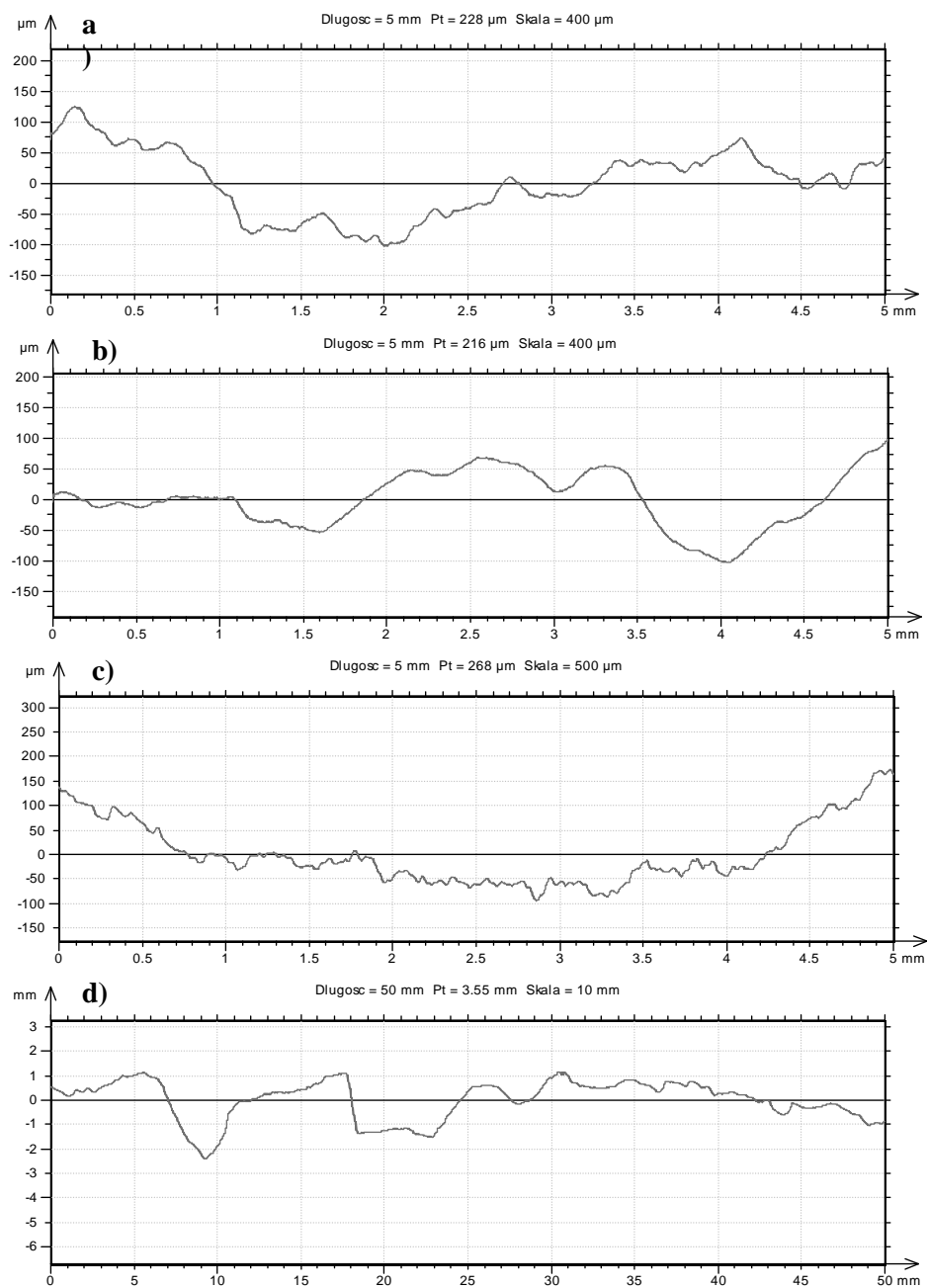
Rys. 4. Linia profilowa typu M\_6 i wynik analizy fraktalnej

Fig. 4. Line profile M\_6 type and result of fractal analysis

Tabela 2. Wyniki wartości średnich wymiaru fraktalnego

Table 2. Results of the mean values of fractal dimension

Typ pęknięcia	Wymiar fraktalny, wartość średnia $\pm$ błąd standardowy wartości średniej	
	$D_{BC}$	$D_m$
M	1,10 $\pm$ 0,010	1,12 $\pm$ 0,010
PK	1,22 $\pm$ 0,030	1,20 $\pm$ 0,022
PM	1,12 $\pm$ 0,027	1,12 $\pm$ 0,020
WK	1,23 $\pm$ 0,024	1,22 $\pm$ 0,020



Rys. 5. Linie profilowe typu: a) PK\_1, b) PM\_4, c) WK\_3 i d) C\_1

Fig. 5. Line profile type: a) PK\_1, b) PM\_4, c) WK\_3 i d) C\_1

Linie profilowe o długości 50 mm (tabela 1, typ C) wybrano losowo na powierzchni przełomu. Przechodziły one przez wszystkie składniki struktury. Udział innych od M typów pęknięć wynosił w przypadku linii profilowej C\_1 40%, w tym typ PK 6%, typ PM 10 % i typ WK 24 %, a w przypadku linii profilowej C\_2 uzyskano udział typu M 62 %, typu PK 14 %, typu PM 4 % i typu WK 20 %.

Na rys. 6 przedstawiono fragment powierzchni przełomu betonu z widocznymi różnymi typami pęknięć. Na powierzchni przełomu obserwuje się największy udział pęknięć typu M oraz dość liczne pęknięcia typu WK.

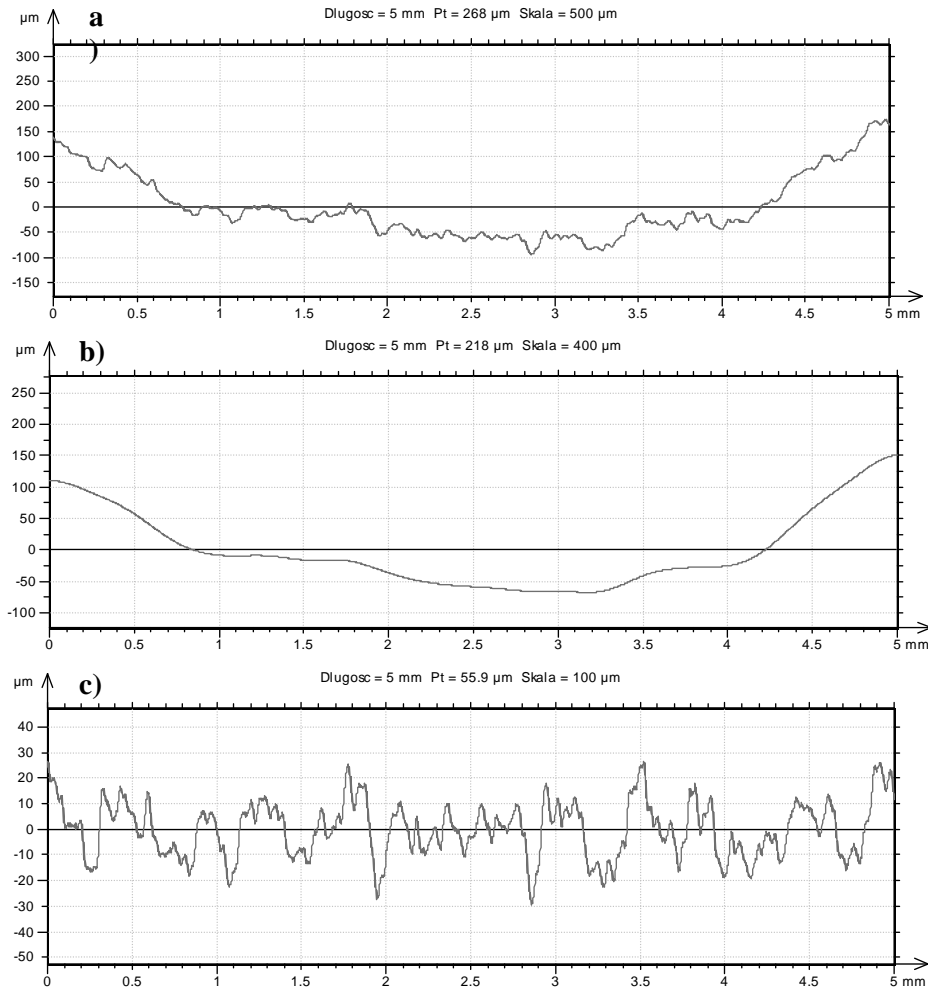


Rys. 6. Powierzchnia przełomu z widocznymi pęknięciami typu M i WK

Fig. 6. Fracture surface with the visible cracks M and WK

Uwzględniając udział poszczególnych typów pęknięć dokonano obliczenia średnioważonej wartości wymiaru fraktalnego dla linii profilowych typu C. Uzyskano odpowiednio wartości dla linii profilowej C\_1:  $D_{BC} = 1,14$  i  $D_m = 1,15$ , a dla linii profilowej C\_2:  $D_{BC} = 1,15$  i  $D_m = 1,15$ . Porównując uzyskane wartości wymiaru fraktalnego z wartościami obserwowanymi stwierdzono dużą zgodność w przypadku obu zastosowanych metod obliczania wymiaru  $D$ .

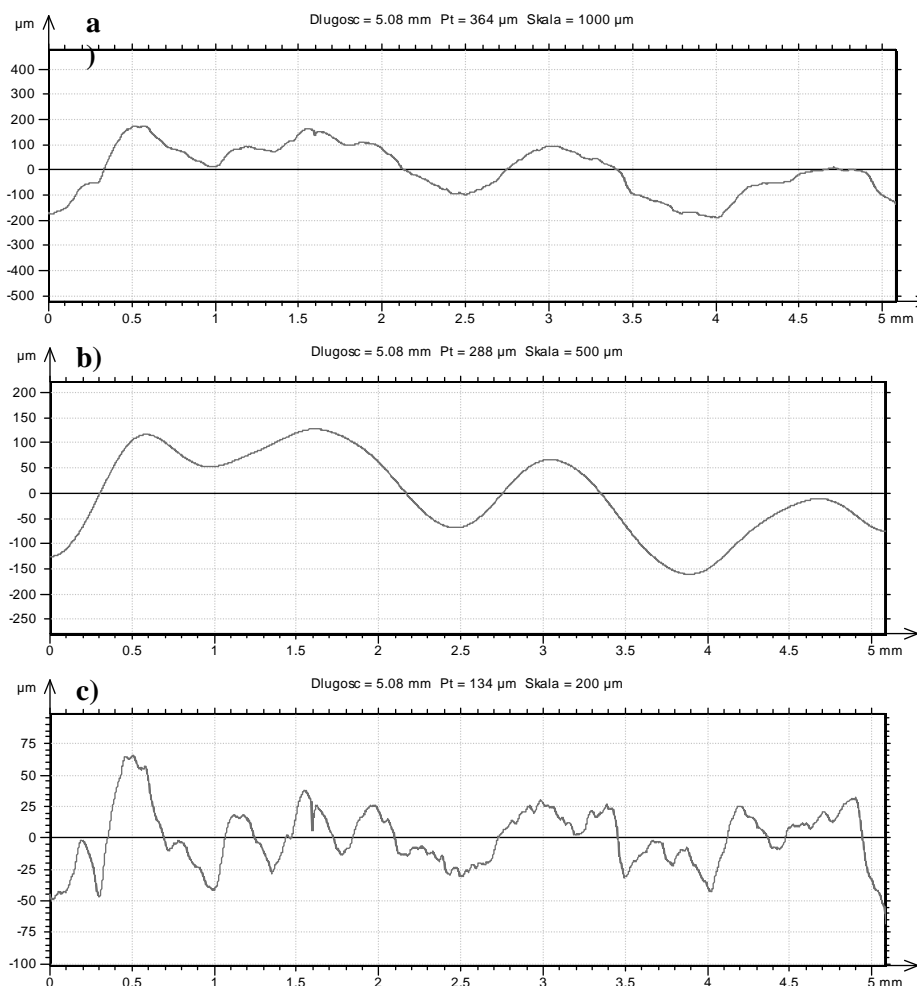
W celu uwypuklenia chropowatości linii profilowych przechodzących przez pęknięte ziarna kruszywa wydzielono z linii profilowej typu WK\_3 (rys. 7a) profil falistości (rys. 7b) oraz profil chropowatości (rys. 7c). Całkowita wysokość profilu chropowatości wyniosła 55,9  $\mu\text{m}$ .



Rys. 7. Porównanie: a) linii profilowej typu WK\_3 z b) wydzielonym profilem falistości oraz c) profilem chropowatości

Fig. 7. Comparison: a) the type of line profile WK\_3 with b) a separate waves profile and c) the roughness profile

Pomimo większych wysokości profili typu M, przechodzących przez matrycę cementową w porównaniu do wysokości profili typu WK (rys. 7a i 8a), jak również większych wysokości profili chropowatości (rys. 7c i 8c), chropowatości wyróżnione na profilach typu WK są większe, co wpływa ostatecznie na większy wymiar fraktalny linii profilowych typu WK w porównaniu do linii profilowych typu M.



Rys. 8. Porównanie: a) linii profilowej typu M\_01 z b) wydzielonym profilem falistości oraz c) profilem chropowatości

Fig. 8. Comparison: a) the type of line profile M\_01 with b) a separate waves profile and c) the roughness profile

Średnia arytmetyczna długość fali na profilu chropowatości wyróżnionego z linii profilowej typu M (rys. 8c) wynosi 0,262 mm, natomiast średnia arytmetyczna długość fali na profilu chropowatości wyróżnionego z linii profilowej typu WK (rys. 7c) jest prawie dwukrotnie mniejsza i wynosi 0,138.

Na podstawie uzyskanych wyników wartości średnich stwierdzono, że wymiar fraktalny linii profilowej przechodzącej przez matrycę cementową (typ M) jest porównywalny z wymiarem fraktalnym matrycy cementowej znajdującej się w odcisku poziarnym (typ PM). Wymiar fraktalny  $D$  natomiast okre-



ślony dla powierzchni ziarna kruszywa pękniętego na wskroś i powierzchni ziarna kruszywa wyrwanego z matrycy cementowej jest porównywalny i większy od wymiaru fraktalnego matrycy.

Nie stwierdzono zgodności wymiarów fraktalnych dwóch dopełniających się powierzchni powstałych na skutek wyrwania ziarna kruszywa. Wymiar fraktalny określony dla wyrwanego ziarna kruszywa był większy aniżeli odpowiadający tej sytuacji wymiar fraktalny powstałego w matrycy odcisku. Może to być spowodowane większą chropowatością powierzchni ziaren kruszywa, co potwierdziły analizy pęknięć typu PK i WK oraz spowodowane jest zapewne mniejszą przyczepnością ziaren kruszywa do matrycy cementowej.

Na wyrwanych ziarnach kruszywa, widocznych na przełomach, obserwowano tylko nieliczne miejsca pokryte zaczynem. Liczba tych ziaren była jednak niewielka w porównaniu do liczby ziaren pękniętych na wskroś. Pęknięte ziarna są potwierdzeniem wysokiej wytrzymałości styku kruszywo/zaczyn.

#### 4. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych analiz fraktalnych stwierdzono, że wymiar fraktalny  $D$  linii profilowej może być określany jako wartość średnioważona, uwzględniająca udział różnych typów pęknięć znajdujących się na linii profilowej.

Jednocześnie wykazano, że wymiar fraktalny  $D$ , obliczony obiema metodami: metodą pudełkową  $D_{BC}$  i metodą obwiedni morfologicznych  $D_m$ , jest większy w przypadku przechodzenia pęknięcia przez ziarna kruszywa grubego, aniżeli przy przejściu pęknięcia przez stwardniały zaczyn cementowy.

Przeprowadzone analizy fraktalne wykazały także rozbieżność wymiarów fraktalnych odcisku poziarnowego i powierzchni wyrwanego ziarna kruszywa grubego, co prawdopodobnie ma związek z gorszą przyczepnością zaczynu do kruszywa. Jest to ważny wniosek praktyczny, gdyż różnice te wpływają na większy rozrzut wyników  $D$ .

#### Literatura

- [1] Mandelbrot B.B.: Fractals. Form, chance and dimension, Freeman, San Francisco 1977.
- [2] Winslow D.N.: The fractal nature of the surface of cement paste, Cement and Concrete Research, 15, 1985, s. 817-824.
- [3] Saouma V.E., Barton C.C.: Fractals, fractures, and size effects in concrete, J. Eng. Mech., 120, 1994, s. 835-854.
- [4] Brandt A.M., Prokopski G.: On the fractal dimension of fracture surfaces of concrete elements, J. Mater. Sci., 28, 1993, s. 4762-4766.
- [5] Czarnecki L., Garbacz A., Kurach J.: On the characterization on polymer concrete fracture surface, Cem. Concr. Compos., 23, 2001, s. 399-409.

- [6] Konkol J.: Zastosowanie analizy struktury do oceny właściwości betonów. Rozprawa Doktorska. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2004.
- [7] Konkol J., Prokopski G.: Analysis of the fracture surface morphology of concrete by the method of vertical section, *Computers and Concrete*, 1(4), 2004, s. 389-400.
- [8] Prokopski G., Konkol J.: The fractal analysis of the fracture surface of concretes made from different coarse aggregates, *Computers and Concrete*, 2(3), 2005, s. 239-248.
- [9] Konkol J., Prokopski G.: The necessary number of profile lines for the analysis of concrete fracture surfaces, *Structural Engineering and Mechanics*. 25(5), 2007, s. 565-576.
- [10] Konkol J., Prokopski G.: Morfologia przełomu oraz odporność na pękanie betonów modyfikowanych dodatkiem popiołu fluidalnego lub metakaolinitu, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Seria Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, z. 58, nr 3/11/III, 2011, s. 321-330.
- [11] Konkol J.: Wykorzystanie parametrów fraktalnych i stereologicznych do opisu odporności na pękanie betonów modyfikowanych wybranymi dodatkami typu II, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, seria Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, z 59, nr 3/12/III, 2012, s. 222-232.
- [12] Wang Y., Diamond S.: A fractal study of the fracture surfaces of cement pastes and mortars using a stereoscopic SEM method, *Cement and Concrete Research*, 31, 2001, s. 1385-1392.
- [13] Yan A., Wu K.-R., Zhang D., Yao W.: Effect of fracture path on the fracture energy of high-strength concrete, *Cement and Concrete Research*, 31, 2001, s. 1601-1606.
- [14] Issa M A., Issa M. A., Islam Md. S, Chudnovsky A.: Fractal dimension – a measure of fracture roughness and toughness of concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, 70, 2003, s. 125-137.
- [15] Zhang H., Wei D.M.: Fractal effect and anisotropic constitutive model for concrete, *Theor. Appl. Fract. Mech.*, 51, 2009, s. 167-173.
- [16] Zhang H., Wei D.M.. Fracture and damage behaviors of concrete in the fractal space, *J. Mod. Phys.*, 1, 2010, s. 48-58.
- [17] Czarnecki L, Chmielewska B.: Fracture and fractography of silane modified resin mortars, *Int. J. Restor. Build. Monum.*, 9, 2003, s. 603-18.
- [18] Erdem S., Blankson M.A.: Fractal-fracture analysis and characterization of impact-fractured surface in different types of concrete using digital image analysis and 3D nanomaterial laser profilometry, *Constr. Build Mater.*, 40, 2013, s. 70-76.

## FRACTAL DESCRIPTION OF CEMENT CONCRETES FRACTURE SURFACE

### Summary

The paper presents an approach for determining the fractal dimension of the profile lines separated from the fracture surface of concrete with regard to the analysis of structural components such as grains of coarse aggregate and hardened cement paste. Both for the cement paste

and the coarse aggregate, two variants were subjected to fractal analysis. In the case of the coarse aggregate, a fractal dimension was calculated for the crack around the grain and for a transition of the crack through the grain. The cement paste was analyzed with respect to the fracture surface created by the cement paste itself, and with respect to the fracture surface resulting from the separation of the coarse aggregate from the cement matrix (cement paste imprint on the grain aggregate). The fractal study was conducted on the fracture surfaces of concrete using two methods: a box counting method and morphological envelopes method. It has been shown that the grains of the coarse aggregate have a significant impact on the value of the fractal dimension  $D$ . It has been found that the cracks passing through the grains of the coarse aggregate have the largest fractal dimensions. For both of the variants, the fractal dimension values obtained with both of the methods were 11% higher. On the basis of the obtained results it was found that the fractal dimension  $D$  of the profile line can be defined as a weighted average incorporating different types of the cracks on the profile line.

**Keywords:** concrete, fracture surface, fractal dimension, surface analysis, laser profilometer.

DOI:10.7862/rb.2014.94

*Przesłano do redakcji: 14.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Janusz KONKOL<sup>1</sup>  
Marcin PYRA<sup>2</sup>

## WYBRANE WŁAŚCIWOŚCI BETONÓW MODYFIKOWANYCH ZMIENNYM UDZIAŁEM DODATKU METAKAOLINITU

W referacie przedstawiono wyniki badań betonów wykonanych na cemencie CEM I 32,5R, kruszywie grubym granitowy i o zróżnicowanym udziale dodatku metakaolinitu MK, zastosowanego jako substytut cementu. Dodatek metakaolinitu użyto w ilości 5, 10, 15, 20 i 25% masy spoiwa, tj. odpowiednio od 5,3 do 33,4% masy cementu. Wykazano znaczący wpływ zmiany udziału metakaolinitu na badane cechy betonów, tj.: wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość i wodoprzepuszczalność. Zwiększenie udziału metakaolinitu od 5 do 15% m. s. skutkowało wzrostem wytrzymałości na ściskanie betonów. Wzrost wytrzymałości betonu z 15% udziałem metakaolinitu w stosunku do betonu referencyjnego wyniósł ponad 23%. Dalsze zastąpienie cementu dodatkiem MK nie wpłynęło na zmianę wytrzymałości na ściskanie, co potwierdził wynik testu równości średnich. Podobne relacje obserwowano w przypadku badań nasiąkliwości betonów. Nasiąkliwość betonu z 15% udziałem MK wyniosła 2,3%, co było znaczną poprawą w stosunku do betonu referencyjnego bez dodatku, dla którego uzyskano nasiąkliwość wynoszącą 4%. Dalszy wzrost udziału dodatku metakaolinitu z 15 do 25% spowodował nieznaczne zmniejszenie nasiąkliwości do 2,1%. Wyniki badań wodoprzepuszczalności wykazały ciągłą poprawę szczelności betonu na skutek zwiększenia udziału metakaolinitu. Najmniejszą głębokość penetracji wody pod ciśnieniem, wynoszącą 10 mm, uzyskano w przypadku betonu o 25% udziale MK. Za optymalny udział dodatku metakaolinitu, ze względu na badane właściwości, uznano udział 15% m. s. Na podstawie przeprowadzonej analizy statystycznej podano zależności funkcyjne opisujące zmianę wytrzymałości na ściskanie od zmiennego udziału dodatku metakaolinitu.

**Słowa kluczowe:** beton, dodatek pucolanowy, metakaolinit, wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość, wodoprzepuszczalność.

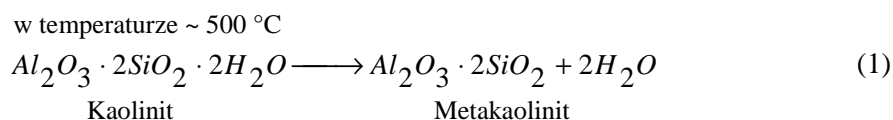
---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: dr inż. Janusz KONKOL, Katedra Inżynierii Materiałowej i Technologii Budownictwa, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel. (17) 865-1701, e-mail: janusz.konkol@prz.edu.pl.

<sup>2</sup> Mgr inż. Marcin Pyra, absolwent Wydziału Budownictwa i Inżynierii Środowiska Politechniki Rzeszowskiej.

## 1. Wprowadzenie

Metakaolinit jest cenionym dodatkiem do betonów. Jego właściwości pucolanowe powodują, że z powodzeniem może być stosowany nie tylko jako dodatkowy składnik betonów poprawiający szczelność, ale również może pełnić rolę substytutu cementu. Jako produkt handlowy pojawił się w USA w połowie lat 90. dwudziestego wieku, a jest wytwarzany w procesie prażenia kaolinitu (dehydroksylacji) w temperaturze około 800°C. Kaolinit należy do minerałów ilastych o budowie pakietowej dwuwarstwowej. Wzór krystalochemiczny pakietu kaolinitu ma postać  $Al_4[Si_4O_{10}](OH)_8$ , a element strukturalny kaolinitu zbudowany jest z warstwy tetraedrycznej krzemowo-tlenowej oraz z warstwy oktaedrycznej glinowo-tlenowo-wodorotlenowej. Wiązania poszczególnych pakietów są tak silne, a odległość między nimi tak mała, że niemożliwe jest zwiększenie przestrzeni międzypakietowych oraz wniknięcie w tę przestrzeń wody. Dehydroksylacja kaolinitu zachodzi już w temp. 550°C [1], a proces ten można opisać równaniem:



Podstawowymi minerałami wiążącymi cementu portlandzkiego są alit ( $3CaO \cdot SiO_2$ ) i belit ( $2CaO \cdot SiO_2$ ), które przy udziale wody i zachodzących reakcji tworzą uwodnione krzemiany wapnia. W wyniku zachodzących w cemencie portlandzkim reakcji alitu i belitu wydzielane są znaczne ilości wodorotlenku wapnia  $Ca(OH)_2$ . Metakaolinit, zawierający aktywne formy tlenków glinu i krzemu, w obecności wody wchodzi w reakcję z wodorotlenkiem wapnia, w wyniku której powstają produkty zbliżone pod względem struktury i składu chemicznego do produktów hydratacji cementu portlandzkiego [2]. Obecność produktów reakcji metakaolinitu już po trzech dniach dojrzewania potwierdziły badania rentgenograficzne przeprowadzone przez Kurdowskiego i Pomadowskiego [3]. Jakość produktów hydratacji zależy w znacznym stopniu od zawartości  $Ca(OH)_2$ . Zatem można podejrzewać, że przy znacznych zawartościach metakaolinitu w stosunku do ilości cementu ilość wodorotlenku wapnia będzie niewystarczająca aby doprowadzić do reakcji całości metakaolinitu. Wówczas nieprzereagowana część metakaolinitu będzie pełnić tylko rolę wypełniacza. Określa się, że optymalna zawartość metakaolinitu wynosi 10 do 15% masy spoiwa. Jako graniczną wartość udziału metakaolinitu, powodującego całkowite usunięcie  $Ca(OH)_2$ , Kostuch i in. [4] podali udział 20% metakaolinitu w stosunku do masy spoiwa.

Metakaolinit jest produktem przyjaznym ludziom i środowisku, gdyż jego produkcja związana jest z mniejszą emisją  $CO_2$  do atmosfery, aniżeli produkcja cementu [5]. Ograniczenie emisji  $CO_2$  nie jest jedyną korzyścią płynącą z zasto-

sowania tego dodatku jako zamiennika cementu. Metakaolinit działa korzystnie na wzrost parametrów wytrzymałościowych betonów, w tym wytrzymałości na ściskanie i odporności na pękanie [6-9], poprawia także szeroko rozumianą trwałość betonu [10,12,14-18].

Jak wykazali w swoich badaniach Ponn i in. [10] najkorzystniejszym udziałem dodatku metakaolinitu w aspekcie wytrzymałości na ściskanie jest 10% jego udział, co potwierdziły badania betonów o  $w/s = 0,3$  i  $0,5$ . Wild i in. [11] natomiast stwierdzili, że optymalnym jest udział 20%. Wytrzymałość betonu z taką zawartością była największa zarówno po 7, 14, 28 i 90 dniach dojrzewania. Jedynie po 1 dniu dojrzewania najlepszym okazał się beton z 10% udziałem MK. Liczne publikacje wskazują za optymalny 15 % udział MK [13-15].

W pracy poddano badaniu betony o zawartości metakaolinitu do 25% masy spoiwa (do 33,4% m.c.) pod względem wpływu tego dodatku na wytrzymałość na ściskanie, nasiąkliwość i wodoprzepuszczalność betonów. Badania przeprowadzono na krajowym kruszywie granitowym i dostępnym w sprzedaży metakaolinitie. Prowadzenie badań opartych o krajowe surowce jest celowe, gdyż zarówno kruszywo, jak i dodatek metakaolinitu może różnić się właściwościami w zależności od miejsca pochodzenia, jak również w przypadku metakaolinitu od zastosowanego procesu produkcji [19,20].

## 2. Plan i metodyka badań

Badania przeprowadzono dla zmiennej zawartości metakaolinitu wynoszącej od 5 do 25% masy spoiwa. Wykonano także mieszankę z betonu referencyjnego niezawierającego w swym składzie metakaolinitu. Skład mieszanek betonowych na  $1 \text{ m}^3$  zestawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Skład mieszanek betonowych poszczególnych serii betonów

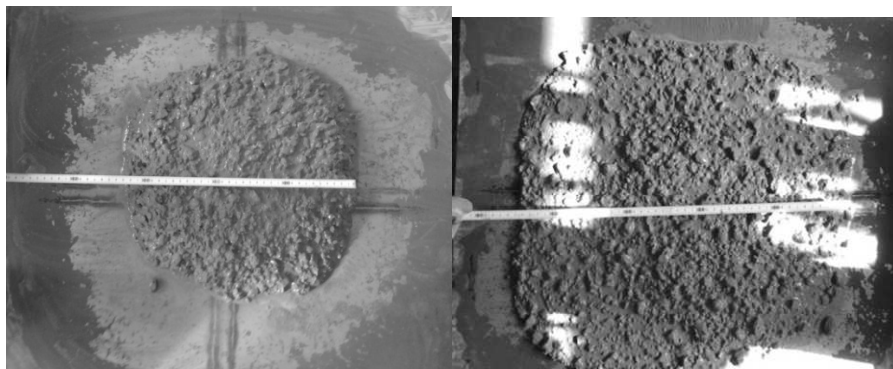
Table 1. The composition of each series of concrete mixes

Symbol mieszanki betonowej	Skład na $1 \text{ m}^3$ mieszanki betonowej, kg					
	Cement	Metakaolinit (% m.s. /% m.c.)*	Spoiwo łącznie	Woda	Piasek	Granit
B_0	503,4	0,0	503,4	201,4	290,8	1350,8
B_5	478,2	25,2 (5/5,3)				
B_10	453,1	50,3 (10/11,1)				
B_15	427,9	75,5 (15/17,6)				
B_20	402,7	100,7 (20/25,0)				
B_25	377,5	125,9 (25/33,4)				

\* - wartości w nawiasach podają udziały procentowe dodatku MK odpowiednio w odniesieniu do spoiwa i cementu

Do badań zastosowano cement portlandzki CEM I 32,5R, metakaolinit Astra MK-40 zawierający 53%  $\text{SiO}_2$  i 42%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , grys granitowy frakcji do 16 mm Strzegom i piasek kwarcowy do 2 mm z m. Strzegocice.

Przyjęto założenie utrzymania stałej konsystencji wszystkich mieszanek betonowych. Za optymalny przyjęto rozpliw na stoliku rozpliwowym według PN-EN 12350-5 wynoszący 460 mm. Wielkość rozpliwu była kontrolowana, doświadczalnie ustaloną ilością domieszki superplastyfikatora SuperFlow 40, aż do uzyskania żądanej konsystencji (rys. 1).



Rys. 1. Badanie konsystencji mieszanki betonowej: mieszanka betonowa bez domieszki (po lewej stronie), mieszanka betonowa z ostateczną dawką domieszki (po prawej stronie).

Fig. 1. The test consistency of concrete mix: concrete mix without admixture (on the left), concrete mix with a final dose admixture (on the right)

Dla każdej mieszanki betonowej zgodnie z PN-EN 12390-6:2001 obliczono gęstość pozorną. Gęstość metakaolinitu wynosząca  $2,53 \text{ kg/dm}^3$ , mniejsza od gęstości cementu równej  $3,05 \text{ kg/dm}^3$ , wpłynęła na zróżnicowanie gęstości pozornej badanych mieszanek betonowych.

Po 28 dniach dojrzewania betonów, przechowywanych w warunkach powietrzno-wilgotnych przy wilgotności względnej powietrza  $>95\%$ , przeprowadzono badania wytrzymałości na ściskanie, nasiąkliwości i wodoprzepuszczalności. Do badań wytrzymałości na ściskanie, dla każdej serii betonów, wykonano po 8 próbek sześciennych o boku  $0,1 \text{ m}$ .

### 3. Wyniki badań i ich analiza

Otrzymane wyniki rozpliwu mieszanki betonowej (Tabela 2) w zależności od udziału metakaolinitu i zastosowanej ilości upłynniacza SuperFlow 40 pozwoliły na podanie zależności (2), pozwalającej na określenie koniecznej ilości upłynniacza SuperFlow 40 w celu uzyskania pożądanej konsystencji mieszanki betonowej, charakteryzującej się rozpliwem około  $460 \text{ mm}$  (rys. 2).

$$U = 0,30 + 0,018 \cdot MK \quad (2)$$

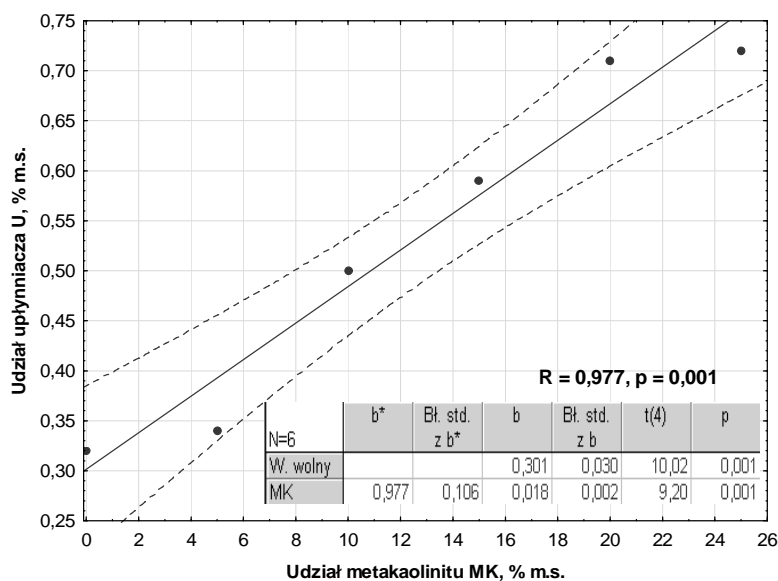
gdzie:  $U$  – udział procentowy upłynniacza, % m.s.,  
 $MK$  – udział procentowy metakaolinitu, % m.s.

Tabela 2. Wyniki badania konsystencji mieszanki betonowej

Table 2. The results of the test consistency of concrete mix

Symbol mieszanki betonowej	Udział upłynniacza (% m.s.)	Rozpływ, mm			Klasa konsystencji
		Pomiar 1	Pomiar 2	Średni	
B_0	0,32	480	440	460	F3
B_5	0,34	440	450	445	F3
B_10	0,50	420	460	440	F3
B_15	0,59	460	470	465	F3
B_20	0,71	480	460	470	F3
B_25	0,72	470	460	465	F3

Większy udział metakaolinitu, z uwagi na większą wodożądność tego dodatku w stosunku do wodożądności użytego cementu, powoduje wzrost zapotrzebowania na upłynniacz. Niewielka ilość użytej domieszki upłynniającej, pozwalającej na osiągnięcie pożądanego rozptywu, wskazuje na dużą efektywność zastosowanego upłynniacza wraz z dodatkiem metakaolinitu.



Rys. 2. Liniowa zależność między zawartością dodatku a ilością domieszki

Fig. 2. The linear correlation between the additive content and the amount of admixture

Wyniki badania gęstości pozornej mieszanek betonowych zestawiono w Tabeli 3. Stwierdzono zmniejszenie gęstości pozornej mieszanki betonowej na skutek dodatku MK. Zmiana gęstości jednak wynosiła zaledwie od 0,7% do 1,9% w stosunku do gęstości mieszanki betonowej bez dodatku MK.



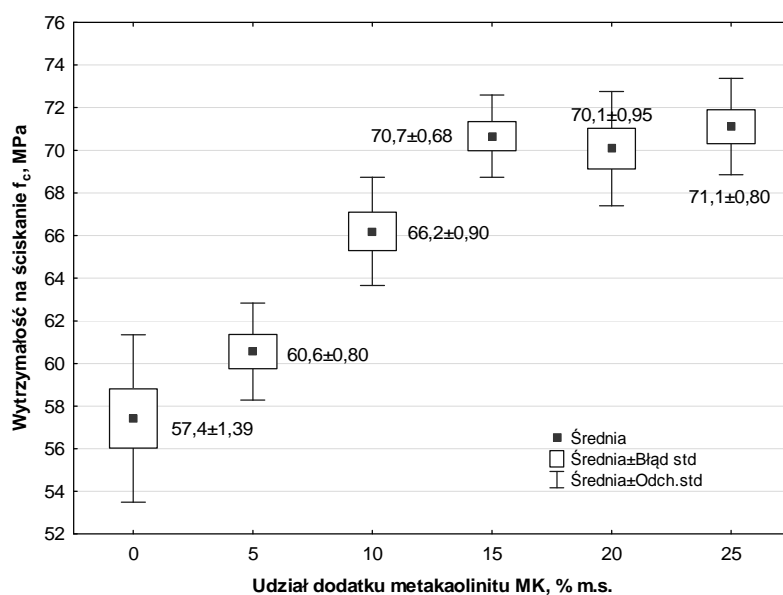
Tabela 3. Wyniki badań wybranych cech betonów modyfikowanych dodatkiem MK

Table 3. The results of selected characteristics of concretes modified with the addition of MK

Symbol mieszanki betonowej	Badana cecha		
	Gęstość pozorna, $\text{kg/m}^3$	Nasiąkliwość, % <sup>*)</sup>	Głębokość penetracji wody, $\text{mm}$ <sup>*)</sup>
B_0	2437	4,0	90
B_5	2419	4,0 (4,2)	70 (75)
B_10	2412	3,6	40
B_15	2414	2,3 (2,1)	20 (21)
B_20	2393	2,6	25
B_25	2390	2,1 (2,5)	10 (15)

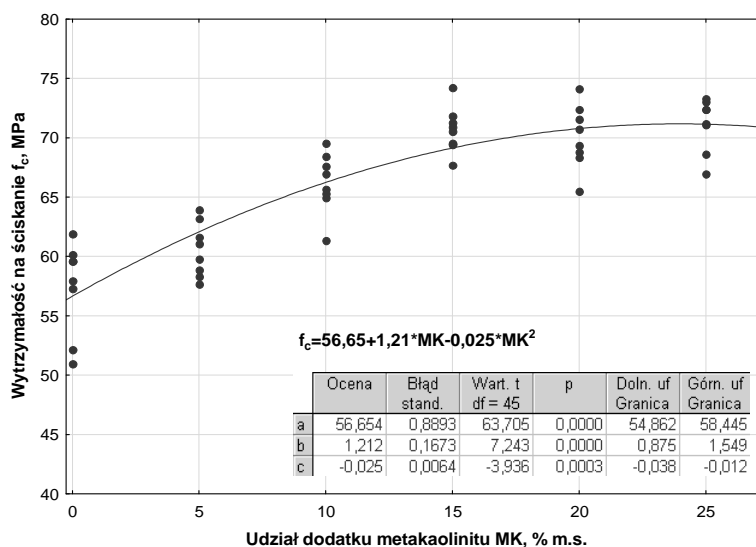
<sup>\*)</sup> – wartości w nawiasach uzyskano w innych badaniach betonów o takim samym  $w/c = 0,4$  i przyjętym rozplywie 500 mm.

Na rys. 3. Przedstawiono rezultaty badania wytrzymałości na ściskanie betonów, określając miarę położenia (wartość średnią) oraz miary rozrzutu (odchylenie standardowe i błąd standardowy).

Rys. 3. Wykres rozrzutu wytrzymałości na ściskanie  $f_c$ Fig. 3. Scatter diagram of the compressive strength  $f_c$ 

Testem Browna-Forsythe'a na jednorodność wariancji stwierdzono, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy o równości wariancji. Uzyskany krytyczny poziom istotności wyniósł  $p = 0,63$  i jest większy od przyjętego poziomu istotności  $\alpha = 0,05$ .

Przeprowadzono także analizę równości średnich (analizę wariancji) będącą jednocześnie testem na istotność wpływu wielkości wejściowej (zmienny udział MK) na wartości wielkości wyjściowej (wytrzymałość na ściskanie  $f_c$ ). Uzyskany bliski zeru krytyczny poziom istotności  $p$  świadczy o wysoce statystycznie istotnym wpływie zmiany udziału metakaolinitu na wytrzymałość na ściskanie betonów po 28 dniach dojrzewania. Na tej podstawie należy odrzucić również hipotezę statystyczną zakładającą równość średnich.



Rys. 4. Równania regresji opisujące zależności wytrzymałości na ściskanie  $f_c$  od udziału dodatku metakaolinitu

Fig. 4. Regression equations describing depending the compressive strength  $f_c$  to the additive content of metakaolinite

Dalsza analiza statystyczna umożliwiła uzyskanie zależności wytrzymałości na ściskanie, po 28 dniach dojrzewania, od udziału dodatku metakaolinitu w postaci funkcji aproksymującej (3) (rys. 4).

$$f_c = 49,96 + 7,32 \cdot MK - 0,632 \cdot MK^2 \quad (3)$$

gdzie:  $f_c$  – wytrzymałość na ściskanie betonu po 28 dniach dojrzewania, MPa,  
 $MK$  – udział procentowy metakaolinitu, % m.s.

Uzyskano dopasowanie wielomianem stopnia drugiego o współczynniku korelacji  $R = 0,888$ , przy udziale wariancji wyjaśnionej 78,9%.

Zastosowanie 10 % ilości metakaolinitu spowodowało ponad 15% wzrost wytrzymałości na ściskanie  $f_c$  w stosunku do betonu referencyjnego niemodyfikowanego. Wzrost natomiast udziału MK do 15% skutkowało ponad 23% wzro-

stem wytrzymałości na ściskanie. Dalszy wzrost udziału metakaolinitu do 25% m.s. nie wpłynął znacząco na zmianę wytrzymałości na ściskanie w stosunku do betonu z 15% udziałem MK, co potwierdził wynik testu równości średnich.

Znaczące zmiany struktury betonów na skutek dodatku metakaolinitu stwierdzono także na podstawie uzyskanych wyników badań nasiąkliwości i wodoprzepuszczalności (Tabela 3). Obserwowano zmniejszenie nasiąkliwości i głębokości penetracji wody pod ciśnieniem w miarę wzrostu udziału MK do 15% m.s. W betonach o 20% udziale MK stwierdzono nieznaczne pogorszenie mierzonych parametrów. Betony z największym udziałem metakaolinitu (25% m.s.) uzyskały najlepsze właściwości pod względem wodoszczelności, jednak nasiąkliwość tych betonów w niektórych przypadkach zwiększyła się (Tabela 3). Za optymalny udział ze względu na nasiąkliwość i wodoprzepuszczalność betonów modyfikowanych metakaolinitem przyjęto udział 15%.

#### 4. Podsumowanie

Przedstawione w pracy wyniki badań betonów modyfikowanych zróżnicowanym udziałem metakaolinitu produkcji krajowej potwierdzają, że już zastąpienie cementu 5% ilością metakaolinitu powoduje wzrost wytrzymałości na ściskanie i wodoszczelności betonu. Znaczące korzyści uzyskuje się jednak przy udziale 10% i 15% metakaolinitu w stosunku do masy spoiwa. Wymiana 15% masy cementu na metakaolinit spowodowała, w porównaniu do betonu referencyjnego bez dodatku, wzrost wytrzymałości na ściskanie o ponad 23%, obniżenie nasiąkliwości o 42,5% oraz mniejszą głębokość penetracji wody pod ciśnieniem o prawie 78%.

Badania potwierdziły zatem, że zastosowany metakaolinit może być z powodzeniem stosowany jako substytut cementu, a jego optymalna ilość wynosi 15% masy spoiwa.

Dzięki swoim właściwościom pucolanowym dodatek metakaolinitu wpływa na wzrost wytrzymałości na ściskanie betonu przez uszczelnienie struktury betonu, tworząc jednocześnie barierę dla przenikającej wody.

#### Literatura

- [1] Kurdowski W.: *Chemia cement i betonu*, Wydawnictwo Polski Cement, Wydawnictwo Naukowe PWN, Kraków-Warszawa, 2010, s. 728.
- [2] Kurdowski W.: Uwodnione gliniany wapniowe w zaczynie cementowym – przegląd stanu zagadnienia, *Cement Wapno Beton*, 5, 2009, s. 255-266.
- [3] Kurdowski W., Pomadowski H.: Influence of Portland Cement Composition on Pozzolanic Reactivity of Metakaolin, *Silicates Ind.*, 66, 2001, s. 85-90.
- [4] Kostuch J.A., Waltersand V., Jones T.R.: High performance concretes incorporating metakaolin: A review, in: K. Ravindra, M. Roderick (Eds.), *Inter Conference on Concrete 2000: Economic and Durable Construction Through Excellence*, University of Dundee, II, 1993, s. 1779-1811.

- [5] Cassagnabère F., Escadeillas G., Mouret M.: Study of the reactivity of cement/metakaolin binders at early age for specific use in steam cured precast concrete, *Construction and Building Materials*, 23 (2), 2009, s. 775-784.
- [6] Mostafa N.Y., Mohsen Q., El-Hemaly S.A.S., El-Korashy S.A., Brown P.W.: High replacements of reactive pozzolan in blended cement: Microstructure and mechanical properties, *Cement and Concrete Research*, 32, 2010, s. 386-391.
- [7] Konkol J.: Wykorzystanie geometrii fraktalnej do określenia odporności na pękanie betonu modyfikowanego metakaolinitem, *Budownictwo i Architektura*. 12(3). 2013, s. 177-184.
- [8] Konkol J.: Metakaolinit i popiół fluidalny jako alternatywne w stosunku do pyłów krzemionkowych dodatki mineralne do betonu, *Inżynieria i Budownictwo* 9, 2012, s. 503-507.
- [9] Konkol J.: Wykorzystanie parametrów fraktalnych i stereologicznych do opisu odporności na pękanie betonów modyfikowanych wybranymi dodatkami typu II, *Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, seria Budownictwo i Inżynieria Środowiska*, z 59, nr 3/2012/III, s. 222-232.
- [10] Poon C.S., Kou S.C., Lam L.: Compressive strength, chloride diffusivity and pore structure of high performance metakolin and silica fume concrete, *Construction and Building Materials*, 20, 2006, s. 858-865.
- [11] Wild S., Khatib J.M., Jones A.: Relative strength, pozzolanic activity and cement hydration in superplasticised metakaolin concrete, *Cement and Concrete Research*, 26, 1996, 1537-1544.
- [12] Siddique R., Kaur A.: Effect of metakaolin on the near surface characteristics of concrete, *Materials and Structures*, 44 (1), 2011, s. 77-88.
- [13] Madandoust R., Mousavi S.Y.: Fresh and hardened properties of self-compacting concrete containing metakaolin, *Construction and Building Materials*, 35, 2012, s. 752-760.
- [14] Ramezaniapour A.A., Bahrami J.H.: Influence of metakaolin as supplementary cementing material on strength and durability of concretes, *Construction and Building Materials*, 30, 2012, s. 470-479.
- [15] Pytel Z.: Odporność chemiczna zapraw cementowych z dodatkiem metakaolinitu, *Cement Wapno Beton*, 6, 2005, s. 330-338.
- [16] Khatib J.M., Wild S.: Sulphate Resistance of Metakaolin Mortar, *Cement and Concrete Research*, 28 (1), 1998, s. 83-92.
- [17] Boddy A., Hooton R.D., Gruber K.A.: Long-term testing of the chloride-penetration resistance of concrete containing high-reactivity metakaolin, *Cement and Concrete Research*, 31, 2001, s. 759-765.
- [18] Güneyisi E., Mermerdaş K.: Comparative study on strength, sorptivity, and chloride ingress characteristics of air-cured and water-cured concretes modified with metakaolin, *Materials and Structures*, 40 (10), 2007, s. 1161-1171.
- [19] Pytel Z., Małolepszy J.: Wpływ warunków prażenia gliny kaolinowej na jej własności pucolanowe, *Cement-Wapno-Beton*, 3, 1999, s. 48-50.

- [20] Pavlíková M., Brtník T, Keppert M., Černý R.: Wpływ metakaolinitu, jako częściowego zamiennika cementu, na właściwości zapraw wysoko-wartościowych, Cement Wapno Beton, 9, 2009, s. 113-122.

## SELECTED PROPERTIES OF CONCRETES MODIFIED WITH VARYING CONTENT OF METAKAOLINITE ADDITIVE

### Summary

The paper presents the results of the study performed on concretes made of cement CEM I 32,5 R, coarse granite aggregate and diverse content addition metakaolinite MK, used as a substitute for cement. Metakaolinite additive was used in an amount of 5, 10, 15, 20 and 25% by weight of the binder.

It has been shown that the change in the metakaolinite content has a significant influence on the test characteristics of concrete, i.e. compressive strength, water absorption and water permeability.

Increasing the content of metakaolinite from 5% to 15% resulted in an increase of the compressive strength of concrete. The increase in strength of concrete with a 15% metakaolinite content relative to the reference concrete was more than 23%. Further replacement of cement did not affect the change in compressive strength.

Similar relationships were observed for studies of absorption of concrete. Water absorption of concrete with 15% of the MK was 2.3%, which was a significant improvement compared to the reference concrete without the addition. A further increase of the additive caused a slight decrease to 2.1% water absorption. The results of permeability studies showed continuous improvement in concrete tightness as a result of increasing the content of metakaolinite.

The optimal content of metakaolinite addition in relation to the properties investigated was the content of 15% by weight of the binder.

On the basis of statistical analysis functional dependencies describing the change in the compressive strength in relation to the varying content of metakaolinite addition were presented.

**Keywords:** concrete, pozzolanic additive, metakaolinite, compressive strength, water absorption, water permeability.

DOI:10.7862/rb.2014.95

*Przesłano do redakcji: 05.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Joanna KRASOŃ<sup>1</sup>

## MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA MATERIAŁÓW ZMIENNOFAZOWYCH W PASYWNYCH ROZWIĄZANIACH ŚCIENNYCH ELEMENTÓW MUROWYCH

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania materiałów zmiennofazowych w budownictwie. Ich właściwości można wykorzystać w dwóch systemach: aktywnym oraz pasywnym. Zakres przeglądu zawężono do wykorzystania PCM (*ang. phase change materials*) w materiałach budowlanych w systemach pasywnych, a zwłaszcza w elementach ściennych murowych. Przedstawiono wpływ parametrów zewnętrznych na pracę zmodyfikowanych przegród budowlanych, tak aby efektywność materiałów zmiennofazowych była jak najbardziej skuteczna. Zastosowanie PCM ma na celu poprawić komfort użytkowania pomieszczeń niezależnie od rodzaju konstrukcji budynku. Wykazano zalety i wady konstrukcji szkieletowych oraz masywnych. Zwrócono uwagę na kryteria doboru materiałów zmiennofazowych pod względem właściwości termicznych, fizycznych i chemicznych. Porównano materiały zmiennofazowe organiczne oraz nieorganiczne pod kątem ich właściwości. Oprócz cech charakteryzujących PCM, ilość oraz lokalizacja tych materiałów może mieć wpływ na ich efektywność, która jest uzależniona z całkowitą przemianą fazową materiału zmiennofazowego. Przedstawiono na podstawie przeglądu literatury możliwości wkomponowania materiałów zmiennofazowych w tradycyjne elementy ścienne takie jak: beton, ceramika. Podano przykłady wykonanych badań doświadczalnych oraz symulacji komputerowych na zmodyfikowanych elementach ściennych. Choć materiały zmiennofazowe znane są od kilkudziesięciu lat, wymagają dalszych badań, aby skutecznie i bezpiecznie można było je wykorzystywać w elementach budowlanych. W obecnych czasach materiały zmiennofazowe wpisują się w zakres poszukiwań rozwiązań oszczędności w zużyciu energii i wykorzystywaniu odnawialnych źródeł energii, szczególnie promieniowania słonecznego.

**Słowa kluczowe:** PCM, modyfikowane elementy ścienne murowe, akumulacja, przemiana fazowa

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Joanna Krasoń, Politechnika Rzeszowska, 35-959 Rzeszów al. Powstańców Warszawy 12, , tel. 178651728, email: jkras@prz.edu.pl

## 1. Wprowadzenie

W wielu dziedzinach budownictwa w coraz większym zakresie wykorzystywane są materiały zmiennofazowe (PCM). Dzięki zastosowaniu tych materiałów istnieje możliwość magazynowania większej ilości ciepła pozyskanego z naturalnej konwersji energii promieniowania słonecznego, której przewagą nad nieodnawialnymi źródłami energii jest nieszkodliwość dla środowiska.

W zależności od tego w jaki sposób te materiały są aplikowane, wyróżniamy dwa systemy: aktywny i pasywny.

W systemach aktywnych materiały te znajdują swoje zastosowanie na przykład w odnawialnych źródłach energii poprzez wykorzystanie ich między innymi w układach kolektorów słonecznych. Najczęściej PCM umieszczany jest w szczelnym zbiorniku. Jego ilość jest dostosowana do temperatury topnienia materiału zmiennofazowego. Rolą PCM w zasobnikach jest zmagazynowanie energii cieplnej dostarczonej z kolektorów słonecznych i uwalnianie ciepła w okresie niższych temperatur do pomieszczeń.

W systemie pasywnym najczęściej stosuje się PCM jako dodatek do materiałów budowlanych. Może on być wkomponowany m. in. w przegrody ścienne murowe stanowiące samodzielną konstrukcję lub w przegrody wypełniające konstrukcje szkieletowe. Materiał zmiennofazowy może być zintegrowany bezpośrednio z materiałem budowlanym lub jako niezależna warstwa usytuowana, od strony zewnętrznej, wewnętrznej lub między innymi warstwami przegrody.

Zaletą systemu pasywnego jest brak konieczności nadzoru, co powoduje, że staje się on tańszy w porównaniu z systemem aktywnym. Jednak nie mając bezpośredniego wpływu na pracę materiałów zmiennofazowych wkomponowanych w strukturę materiału budowlanego, nie można wpłynąć na ich zachowanie.

Dzięki modyfikacji elementów budowlanych w obydwóch systemach dąży się do poprawy komfortu cieplnego pomieszczeń przylegających do tych przegród oraz w celu zmniejszenia zużycia energii do ogrzewania lub chłodzenia budynku.

## 2. Zastosowanie PCM w przegrodach ściennych murowych w systemie pasywnym

Skuteczność systemów pasywnych, w których zastosowane są materiały zmiennofazowe, zależy między innymi od parametrów użytego materiału budowlanego (opór cieplny, pojemność cieplna), konstrukcji budynku, rodzaju PCM oraz jego usytuowania w elemencie. Należy również uwzględnić lokalne warunki klimatyczne, przede wszystkim występujące temperatury zewnętrzne na danym obszarze, promieniowanie słoneczne. Jednocześnie czynniki występujące wewnątrz pomieszczeń przylegających do tych ścian mają również wpływ na pracę zmodyfikowanej przegrody ściennej.

W budynkach o konstrukcji lekkiej i szkieletowej, w których wypełnienie stanowi materiał o niskiej pojemności cieplnej (akumulacyjności) oraz niskiej bezwładności, może wystąpić w okresie letnim przegrzewanie pomieszczeń, a w okresie zimy znaczne ich wychłodzenie [15]. Dyskomfort cieplny spowodowany wahaniami temperatur może niekorzystnie wpłynąć na użytkowników tych pomieszczeń.

Zastosowanie dodatków PCM w takich budynkach może wpłynąć na zwiększenie akumulacji cieplnej, co spowoduje uzyskanie mniejszych fluktuacji temperaturowych między dniem a nocą.

Budynki wykonane w konstrukcji masywnej posiadają lepszy komfort cieplny. Zewnętrzne przegrody budowlane mniej reagują na wahania temperatur, ponieważ materiały te posiadają większą zdolność akumulacji ciepła. Cecha ta powoduje wydłużenie czasu pomiędzy wystąpieniem wyższych temperatur na powierzchni zewnętrznej przegrody, a pojawieniem się tych temperatur na powierzchni wewnętrznej od strony pomieszczenia. Jest to tzw. przesunięcie fazowe [10]. Dzięki tej właściwości zmagazynowane ciepło jest oddawane w późniejszym czasie, najczęściej w okresie nocnym do przyległych pomieszczeń.

Najbardziej reprezentatywnymi, masywnymi materiałami budowlanymi, charakteryzującymi się tą cechą są beton, żelbet i silikat. Wyróżniają się one dużą gęstością objętościową oraz dużą pojemnością cieplną (akumulacją). Wadą tych konstrukcji jest ich ciężar oraz wysoki współczynnik przewodzenia ciepła, przez co należy zastosować izolację termiczną w ścianie zewnętrznej.

Przegrody ścienne wykonane z materiałów masywnych mają również zastosowanie w ścianach kolektorowo – akumulacyjnych. Istotą skuteczności tych przegród jest ich akumulacyjność warstwy ściennej. W tym przypadku dodatkowym czynnikiem zwiększającym efektywność przegrody, jest wykorzystanie energii cieplnej od promieniowania słonecznego.

Możliwość zastosowania zmodyfikowanej przegrody ściennej z dodatkami PCM w ścianach kolektorowo – akumulacyjnych może wpłynąć na zwiększenie zmagazynowania ilości ciepła podczas intensywnego występowania promieniowania słonecznego w dłuższym okresie czasu.

Zastosowanie materiałów zmiennofazowych jako dodatek w tych przegrodach ma na celu zmniejszenie masy elementów ściennych ograniczając ich wymiary, a jednocześnie nie zmniejszając ich pojemności cieplnej. Według A. Sharma i in., materiały zmiennofazowe przechowują 5-14 razy więcej ciepła na jednostkę objętości niż najlepsze tego typu materiały, takie jak woda, lub skały [13].

## 2.1. Kryteria doboru PCM do elementów ściennych

Istotną rolę w systemach pasywnych odgrywa odpowiedni dobór i usytuowanie PCM w przegrodzie budowlanej. Dokonując wyboru należy kie-



rować się możliwością jak najlepszego efektywnego wykorzystania całego materiału zmiennofazowego w przegrodzie budowlanej, co obecnie jest analizowane w wielu ośrodkach na całym świecie.

Obecnie występuje wiele rodzajów materiałów zmiennofazowych, które mogą być wykorzystane w materiałach budowlanych [3,7,8,13]. Ze względu na ich właściwości można podzielić je na trzy grupy: organiczne, nieorganiczne i eutektyczne.

Do organicznych zaliczamy parafiny i kwasy tłuszczowe, nieorganiczne są to metale oraz hydraty soli. Eutektyki są to mieszaniny kilku substancji organicznych lub nieorganicznych lub połączone jednocześnie materiały organiczne i nieorganiczne.

Wybór odpowiedniego rodzaju materiału zmiennofazowego jest uzależniony od wielu czynników. Dobierając PCM do przegród budowlanych ściennych należy zwrócić uwagę na jego właściwości termiczne, fizyczne, kinetyczne, chemiczne oraz ekonomiczne [13].

Rozważając właściwości termiczne, podstawowym warunkiem prawidłowego doboru PCM jest odpowiednia jego temperatura przemiany fazowej. Zakłada się, że jeżeli PCM umieszczony jest w elementach ściennych temperatura ta powinna być około 1-3°C wyższa od średniej temperatury przylegającego pomieszczenia [9]. Obecnie dostępnych jest szereg rodzajów materiałów zmiennofazowych, których zakres temperatury przemiany fazowej kwalifikuje się do zastosowania w elementach budowlanych, czyli mieści się w przedziale między 18 a 28°C.

PCM charakteryzują się dużą pojemnością cieplną oraz dużą wartością ciepła utajonego przemiany fazowej. Jest to ważna cecha tych materiałów, która wyróżnia je od tradycyjnych materiałów budowlanych. Pojemność cieplna materiałów PCM wykorzystywanych w przegrodach budowlanych wynosi w zależności od jego rodzaju, czyli w przypadku mikrokapsułkowanych około 100 kJ/kg, natomiast w przypadku substancji jednorodnych wynosi nawet do około 250 kJ/kg.

Rozważając ilość zastosowania PCM, należy kierować się możliwością wykorzystania ich w całości pojemności cieplnej tych materiałów. Jeżeli ilość PCM przekroczy możliwości pochłonięcia energii cieplnej ze źródeł zewnętrznych, proces przemiany fazowej ze stanu stałego w ciekły nie zostanie zakończony i odwrotnie uwolnienie energii jest uzależnione od objętości zawartego w elemencie materiału zmiennofazowego. Dlatego ważne jest, aby ilość PCM była tak dobrana, żeby cała jego zawartość była całkowicie stopiona lub zestalona podczas każdego cyklu [15].

Dlatego, ważną rolę odgrywa przewodność cieplna materiału zmiennofazowego. Wysoka przewodność cieplna będzie wspomagać pochłanianie i oddawanie energii cieplnej.

W przypadku materiałów organicznych przewodność cieplna jest niska i wykazywana jest jako wada tych materiałów.

Natomiast materiały nieorganiczne charakteryzują się co najmniej dwukrotnie wyższym przewodzeniem cieplnym niż parafiny [13]. Wartość współczynnika przewodzenia ciepła dla tych materiałów wynosi około 0,6 W/(mK).

Dla ustalenia całkowitej pojemności cieplnej należy również uwzględnić ciepło właściwe samego PCM. Wartość ta jest około dwukrotnie większa od ciepła właściwego materiałów murowych tradycyjnych jak beton, silikat lub ceramika. Stosując materiały zmiennofazowe w elementach masywnych o dużej pojemności cieplnej, należy również wziąć pod uwagę, że wraz ze wzrostem temperatury działającej na zmodyfikowany materiał budowlany również wzrasta pojemność cieplna samych materiałów ściennych.

W przypadku właściwości fizycznych istotną rolę w magazynowaniu ciepła odgrywa stabilność przemiany fazowej. Parafiny wykazują dużą stabilność termiczną podczas przemian fazowych, nawet po 1500 cyklach [12]. Natomiast materiały nieorganiczne wykazują niestabilność w procesie przemiany fazowej. Hydraty soli mogą ulec segregacji na sól i wodę nawet po kilku cyklach. Bezwodna sól ze względu na różnicę gęstości w stosunku do wody może osadzić się na dnie zbiornika [13]. Segregacja oraz efekt przechłodzenia podczas krystalizacji jest jednym z problemów substancji jednorodnych nieorganicznych. Problem ten można wyeliminować poprzez dodanie środków zarodkujących (nukleatory), intensywnie mieszanie lub odpowiednie zastosowanie chropowatych powierzchni ścian [9]. Parafiny posiadają właściwości zarodkujące co powoduje, że nie ma ryzyka występowania efektu przechłodzenia.

Gęstość materiału zmiennofazowego powinna być jak największa, umożliwiając zastosowanie mniejszych rozmiarów pojemników, w których znajduje się PCM.

Gotowe produkty zmiennofazowe produkowane w postaci parafin zamkniętych w mikrokapsułkach polimerowych, charakteryzują się najniższą gęstością ( $0,3 \div 0,4 \text{ kg/dm}^3$ ), natomiast parafiny jednorodne posiadają gęstość, która mieści się w przedziale  $0,86 \div 0,98 \text{ kg/dm}^3$  dla ciała stałego i około  $0,77 \text{ kg/dm}^3$  dla cieczy. Materiały nieorganiczne cechuje wyższa gęstość, która wynosi około  $1,4 \div 1,5 \text{ kg/dm}^3$ .

PCM powinny również charakteryzować się małą zmianą objętości oraz niskim ciśnieniem pary w fazie ciekłej.

W niektórych źródłach [15, 9] przedstawiono, że materiały organiczne posiadają raczej dużą rozszerzalność objętościową podczas topnienia, co niekorzystnie wpływa na proces wytrzymałości pojemników, w których znajduje się PCM. Natomiast według A. Sharma i in. [13] parafiny wykazują niewielką zmianę objętości w procesie topnienia oraz niskie ciśnienie pary w fazie ciekłej. Sposobem, który może wpłynąć pozytywnie na zmniejszenie rozszerzalności objętościowej jest metoda mikrokapsułkowania.

Materiały nieorganiczne charakteryzują się małą zmianą objętości oraz niskim ciśnieniem pary w fazie stopionej [15].

Do wymagań stawianych PCM w połączeniu z materiałami budowlanymi należą właściwości chemiczne takie jak: stabilność chemiczna, brak toksyczności oraz niepalność [13].

W przypadku materiałów organicznych zaletą jest brak wpływu korozyjności na materiały budowlane. Jednak nie powinno umieszczać się je w plastikowych pojemnikach [15]. Są one również bezpieczne i nietoksyczne. Wadą jest ich łatwopalność, przez co nie mogą być narażone na wysokie temperatury. Uważa się, że PCM ze względu na brak ognioodporności nie powinny być skoncentrowany ilościowo więcej niż 20% masy całego komponentu budowlanego [9].

Materiały nieorganiczne określa się jako niepalne. Jednak hydraty soli wykazują niestabilność chemiczną, ponieważ w trakcie podwyższonych temperatur może nastąpić utrata wody krystalicznej. Działają również korozyjnie na materiały budowlane, a zwłaszcza na metale, lecz są kompatybilne z elementami z tworzyw sztucznych. Wykazują lekką toksyczność.

## **2.2. Metody wkomponowywania PCM do przegród ściennych murów oraz przykłady rozwiązań**

Obecnie jest wykorzystywanych wiele sposobów wkomponowania materiałów zmiennofazowych w elementy ścienne murowe.

Do najbardziej popularnych metod należą [7]:

- impregnacja porowatych gotowych elementów budowlanych (np. beton, cegła) PCM w postaci płynnej (rys. 1),
- bezpośrednie włączenie surowych sproszkowanych lub w stanie ciekłym materiałów zmiennofazowych do materiałów budowlanych (np. beton),
- „makrokapsułkowanie”, czyli umieszczenie materiału PCM w pojemniku zamkniętym (rury, kulki itp.) i usytuowanie ich w pustych przestrzeniach elementów budowlanych (np. pustaki ceramiczne),
- „mikrokapsułkowanie”, czyli umieszczenie gotowego mikrogranulatu (parafiny zamkniętej w powłoce z polimeru akrylowego) rys.2 bezpośrednio do mieszanki betonowej, betonu komórkowego,
- stabilizowane materiały kompozytowe (*ang. shapestabilized PCM*), wkomponowywane w okładziny ścienne.

W dalszej części artykułu przedstawiono kilka przykładów wkomponowania PCM w elementy ścienne murowe.

Hawes i in. [6], przeprowadzili w latach dziewięćdziesiątych impregnację materiałem zmiennofazowym elementów ściennych gipsowych o gr. 12,7 mm oraz bloczków betonowych o wymiarach 200x200x100 mm. Elementy te zanurzyli w ciekłym PCM w 80°C na kilka minut. Drugim przeprowadzonym doświadczeniem było wkomponowanie płynnego materiału zmiennofazowego do płyty gipsowej oraz wymieszanie sproszkowanego PCM z betonem. Wykonano również impregnację kruszywa dodawanego do mieszanki betonowej.



Rys. 1. Materiał zmiennofazowy Micronal DS5037X – płyn w postaci wodnej dyspersji

Fig. 1. Phase change materials Micronal DS5037X – liquid in the form of aqueous dispersion



Rys. 2. Materiał zmiennofazowy Micronal DS5038X – mikrogranulat w postaci proszkowej

Fig. 2. Phase change materials Micronal DS5038X – microencapsulate in powder form

Wykazano, że w modyfikowanych płytach gipsowych została jedenastokrotnie zwiększona pojemność magazynowania energii w stosunku do płyt bez PCM. W przypadku betonu z PCM zdolność magazynowania energii wzrosła rzędu 200-230% w porównaniu z betonem niemodyfikowanym.

Cabeza i in. [2] wykorzystali mieszankę betonową wymieszaną z materiałem zmiennofazowym w postaci mikrokapsułek do wykonania jednej z komór badawczych o wymiarach 2,0 x 2,0 x 3,0 m w Hiszpanii. Dla porównania efektywności materiału PCM wykonano drugą komorę z tradycyjnego betonu. Grubość ścian betonowych wynosiła 12,0 cm. Zmodyfikowane ściany betonowe z 5% wagowo materiałem zmiennofazowym usytuowano od strony południowej i zachodniej. Wykazano, że temperatura ściany południowej w komorze bez PCM jest o 2°C wyższa niż ściana w komorze z PCM. Równocześnie podano, że maksymalna temperatura w ścianie betonowej z PCM pojawiła się o dwie godziny później niż ściany betonowej bez PCM, co świadczy o jej wyższej bezwładności cieplnej.

W artykule [1] Alawadhi i in. przedstawili za pomocą symulacji komputerowej analizę termiczną budynku, w którym wykorzystano cegły ceramiczne zmodyfikowane PCM. Materiał zmiennofazowy umieszczono w otworach cylindrycznych wzdłuż elementu, w środkowej części cegły. Średnica otworów, w których znajdował się PCM wynosiła 30 mm. Wykonano symulacje na trzech rodzajach materiałów zmiennofazowych organicznych. Skuteczność PCM oceniono przez porównanie strumienia ciepła na powierzchni wewnętrznej cegły

bez PCM. Symulacje wykonano w celu oceny zmniejszenia strumienia ciepła do wnętrza pomieszczenia w klimacie gorącym. Wykazano, że zredukowano przenikanie ciepła na powierzchni wewnętrznej o 17,55%, przy trzech otworach umieszczonych w cegle.

Paolo Principi i in.[11] opisali badania doświadczalne oraz symulacje komputerowe polegające na wprowadzeniu materiału zmiennofazowego do pustaka ceramicznego. PCM został umieszczony w szczelinie od strony zewnętrznej. Ze względu na postać płynną PCM umieszczono go w pojemniku plastikowym o szerokości 27 mm. W badaniach porównano wyniki eksperymentalne z numerycznymi wartościami przepływu strumienia ciepła na powierzchniach pustaków z oraz bez PCM. Wyniki pokazują, że PCM może zmagazynować energię cieplną od czynników zewnętrznych (promieniowania słonecznego) i uwolnić energię cieplną w porze nocnej. Zastosowanie PCM opóźniło o 6 godzin maksymalny przepływ strumienia ciepła i zmniejszony został on o 25%. Błąd pomiędzy badaniami numerycznymi a doświadczalnymi wynosił maksymalnie 9,8%.

Również Silva i in. [14] przeprowadzili badania doświadczalne oraz eksperymentalne ściany murowej wprowadzając PCM w postaci makrokapsułkowej do pustaków ceramicznych. W tym przypadku PCM został usytuowany w części środkowej wzdłuż elementu ceramicznego. Parafina została zamknięta w formie stalowej i dopasowana do kształtu szczeliny w pustaku. W badaniach stwierdzono zmniejszenie amplitudy termicznej z 10°C (próbka bez PCM) do 5°C (próbka z PCM) oraz wzrost opóźnienia czasowego o 3 godziny. Stwierdzono korzystny wpływ zwiększenia magazynowania ciepła z promieniowania słonecznego w murze z PCM.

W Hiszpanii w typowym klimacie kontynentalnym przeprowadzono badania porównawcze na kilku komorach o zróżnicowanych przegrodach zewnętrznych [4]. W jednej z komór zastosowano panele CSM wypełnione parafiną i umieszczone między warstwą izolacji a pustakami ceramicznymi, w drugiej wykorzystano panele CSM wypełnione hydratami soli, które zostały umieszczone od strony wewnętrznej komory. Do celów porównawczych wykonano komorę bez żadnej izolacji zewnętrznej. Po przeprowadzonych badaniach stwierdzono, że w komorze z zastosowanymi panelami z parafiną, temperatura maksymalna obniżyła się o 1°C, jednak zaobserwowano problem krzepnięcia PCM w okresie nocnym. Dodatkowo stwierdzono, że efekt przemiany fazowej wpłynął na zmniejszenie wahań temperatury wewnątrz komory. W przypadku komór z panelami z hydratami soli w okresie dni gorących zaobserwowano również mniejsze wahania temperatury w komorze.

### 3. Podsumowanie

Wykorzystanie materiałów zmienno fazowych do przegród budowlanych w budownictwie może być kolejnym krokiem w nowych rozwiązaniach energooszczędnych. Dotychczasowe badania potwierdzają możliwość zastosowania ich w elementach ściennych. Wkomponowanie ich zwiększa pojemność cieplną materiałów budowlanych, a tym samym następuje poprawa komfortu użytkowania pomieszczeń w budynku.

W zależności od warunków klimatycznych zmagazynowane ciepło (np. od promieniowania słonecznego) jest wykorzystywane do podniesienia temperatury w przylegających pomieszczeniach w okresie nocnym (klimat umiarkowany) lub do ograniczenia przepływu ciepła do pomieszczeń podczas intensywnego nasłonecznienia (klimat gorący).

Potwierdzeniem możliwości zastosowania materiałów zmienno fazowych w elementach budowlanych są istniejące budynki. Elementy modyfikowane PCM zostały wykorzystane w postaci płyt gipsowych umieszczonych wewnątrz pomieszczeń oraz panele szklane usytuowane w zewnętrznych przegrodach ściennych [5].

### Literatura

- [1] Alawadhi E. M.: Thermal analysis of a building brick containing phase change material, *Energy and Buildings* 40 (2008) 351–357
- [2] Cabeza L. F., Castellon C., Nogues M., Medrano M., Leppers R., Zubillaga O.: Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings* 39 (2007) 113–119
- [3] Cabeza L.F., Castell A., Barreneche C., Gracia A. de, Fernández A.I.: Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 15 (2011), 1675–1695
- [4] Castell A., Martorell I., Medrano M., Perez G., Cabeza L.F.: Experimental study of using PCM in brick constructive solutions for passive cooling, *Energy and Buildings* 42 (2010) 534–540
- [5] Garbalińska H., Bochenek M.: Sposoby wbudowywania materiałów zmienno fazowych w elementach ściennych, *Materiały budowlane*, 2/2012, s. 36-38
- [6] Hawes D.W., Feldman D., Banu D.: Latent heat storage in building materials, *Energy and Buildings*, 20 (1993) 77-86
- [7] Jaworski M.: Zastosowanie materiałów zmienno fazowych PCM w budownictwie, *Materiały budowlane*, 2/2012, s.30-33
- [8] Kuznik F., David D., Johannes K., Roux J.J.: A review on phase change materials integrated in building walls, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 379-391
- [9] Melcer A., Klugmann-Radziemska E., Lewandowski W.: Materiały zmienno fazowe. Właściwości, klasyfikacja, zalety i wady. *Przemysł chemiczny*, 91/7(2012)
- [10] Nowak H.: Zastosowanie badań termowizyjnych w budownictwie, *Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej*, Wrocław 2012.

- [11] Principi P., Fioretti R.: Thermal analysis of the application of pcm and low emissivity coating in hollow bricks, *Energy and Buildings* 51 (2012) 131–142
- [12] Sharma A., Sharma S.D., Buddhi D.: Accelerated thermal cycle test of acetamide, stearic acid and paraffin wax for solar thermal latent heat storage applications, *Energy Conversion and Management* 43 (2002) 1923–1930
- [13] Sharma A., Tyagi V.V., Chen C.R., Buddhi D.: Review on thermal energy storage with phase change materials and applications, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 13 (2009), 318–345
- [14] Silva T., Vicente R., Soares N., Ferreira V.: Experimental testing and numerical modelling of masonry wall solution with PCM incorporation: A passive construction solution, *Energy and Buildings* 49 (2012) 235–245
- [15] Soares N., Costa J. J., Gaspar A.R., Santos P.: Review of passive PCM latent heat thermal energy storage systems towards buildings' energy efficiency, *Energy and Buildings*, 59 (2013), 82–103
- [16] Zhou D., Zhao C.Y., Tian Y.: Review on thermal energy storage with phase change materials (PCMs) in building applications, *Applied Energy* 92 (2012) 593–605

## POSSIBLE APPLICATIONS OF PHASE CHANGE MATERIALS IN PASSIVE SOLUTIONS OF MASONRY WALL ELEMENTS

### Summary

The article presents possibilities of using phase change materials in the buildings. Their properties can be used in active and passive systems. The review was narrowed to the PCM (Phase change materials) in building materials in passive systems, in particular in masonry wall elements. The paper presents influence of climatic parameters on the work of the modified building barriers, in order to increase the efficiency of phase change materials significantly. PCM aims to improve the comfort of using rooms irrespective of the type of building structure. What is more, advantages and disadvantages of the lightweight construction and the massive construction were presented. The article emphasizes criteria for phase change materials selection in terms of thermal, physical and chemical properties. Furthermore, it compares organic and inorganic phase change materials in terms of their properties. In addition to the characteristics of PCM, the amount and location of these materials can affect their efficiency, which depends on the total phase change of PCM. Based on literature, the article presents the possibility of incorporating phase change materials into traditional wall elements such as concrete, ceramics. The findings of experimental studies as well as computer simulations for modified wall components were presented. Although the phase change materials have been known for several decades, further research is undoubtedly needed in order to efficiently and safely implement them in the building elements. Nowadays, phase change materials are part of searching for solutions whose aim is to save energy and use renewable energy sources, especially solar energy.

**Keywords:** PCM, modified masonry wall elements, accumulation, concrete, phase change

DOI:10.7862/rb.2014.96

*Przesłano do redakcji: 06.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Joanna KRASOŃ<sup>1</sup>  
Lech LICHOLAŃ<sup>2</sup>

## OKREŚLENIE WPŁYWU IMPULSÓW TERMICZNYCH NA WEWNĘTRZNE ZMIANY TEMPERATUROWE W ELEMENTACH SILIKATOWYCH ZMODYFIKOWANYCH MATERIAŁEM ZMIENNOFAZOWYM

W artykule przedstawiono badania wstępne dotyczące określenia wartości temperatur w elemencie silikatowym, w którym umieszczono materiał zmiennofazowy (PCM). Temperatury rejestrowano podczas nagrzewania i chłodzenia próbek w komorze klimatycznej. Dla porównania wyników, badania przeprowadzono przy wykorzystaniu dwóch próbek silikatowych o jednakowych masach. Do jednej z próbek dodano materiał zmiennofazowy w postaci mikrogranulatu. Przedmiotowy mikrogranulat występuje w postaci parafiny, zamkniętej w powłokach polimerowych, co umożliwia umieszczenie tego materiału zmiennofazowego bezpośrednio w elemencie silikatowym bez dodatkowego zabezpieczenia powierzchni wewnętrznej ścianek. Próbki poddano działaniu impulsów termicznych w dwóch wariantach. W pierwszym, elementy silikatowe zostały stopniowo nagrzewane oraz schładzane w określonym przedziale czasowym, w drugim natomiast zadano szybki wzrost i spadek temperatury. Każde badanie przeprowadzono w dwóch jednakowych cyklach. W artykule, na przedstawionych wykresach zwrócono przede wszystkim uwagę na przedział temperatury, w którym następuje przemiana fazowa, zarówno podczas fazy topnienia jak i fazy krzepnięcia materiału zmiennofazowego. Wykonano dodatkowo badanie na próbkach w kierunku możliwości zastosowania elementów silikatowych w przegrodach kolektorowo - akumulacyjnych. Założono wartości temperatury na podstawie danych termicznych na wewnętrznej powierzchni przeszklenia uzyskanych od promieniowania słonecznego w ciągu jednego dnia. Dane przyjęto analizując wybrany styczniowy dzień. Silikaty należące do elementów ściennych charakteryzują się dużą akumulacyjnością, co wiąże się z ich znacznym ciężarem. Szansą na obniżenie ciężaru tych materiałów, przy jednoczesnym utrzymaniu i ewentualnym polepszeniu ich zdolności akumulacyjnych jest zastosowanie w ich strukturze materiałów zmiennofazowych.

**Słowa kluczowe:** PCM, akumulacyjność, elementy ścienne, przemiana fazowa

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Joanna Krasoń, Politechnika Rzeszowska, 35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 12, tel. 178651728, email: jkras@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Lech Licholań, Politechnika Rzeszowska, 35-959 Rzeszów, al. Powstańców Warszawy 12, tel. 178651327, email: Lech.Licholań@prz.edu.pl



## 1. Wprowadzenie

Jednym z celów postawionych przez człowieka w dzisiejszych czasach jest dążenie do ograniczenia zużycia energii w budynkach z równoczesnym wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. Do takich rozwiązań między innymi można zakwalifikować rozwiązania budowlane uwzględniające materiały zmiennofazowe.

Modyfikacja dodatkami zmiennofazowymi ma na celu zwiększyć pojemność cieplną materiałów budowlanych oraz zmniejszyć wahania temperatur w pomieszczeniach, które mogą powstać przy nagłym wzroście lub spadku temperatury zewnętrznej. Jednym ze sposobów wkomponowania PCM do elementów ściennych jest włączenie materiału zmiennofazowego w postaci mikrokapsułek. Jest to gotowy produkt, w którym głównym składnikiem jest parafina zamknięta w powłoce z akrylu polimerowego. Wielkość mikrokapsułek mieści się w przedziale od 50 ÷ 300  $\mu\text{m}$ . Stosuje się go między innymi do mieszanek betonowych i gipsowych.

Przy połączeniu obydwóch materiałów, należy zwrócić uwagę, aby materiał stanowiący powłokę PCM nie wpływał korozyjnie na materiał budowlany. Równocześnie musi on być szczelny, aby znajdujący się wewnątrz materiał zmiennofazowy nie wypłynął i nie przeniknął do struktury materiału budowlanego [4].

W dotychczas przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych, w których wykorzystano mikrogranulat do modyfikacji materiałów budowlanych, potwierdzono możliwość zwiększenia pojemności cieplnej elementów budowlanych oraz zmniejszenie wahań temperaturowych w pomieszczeniach [1,2]. Według Hunger i in. [3], przy włączeniu 5% PCM do mieszanki betonowej i uzyskaniu zwiększenia wydajności cieplnej betonu, można uzyskać oszczędność w zapotrzebowaniu na energię do 12%. Dodatkowo w badaniach wykazano zmniejszenie przewodności cieplnej w betonie. Jednocześnie zwrócono uwagę, na problem pękania kapsułek podczas przygotowywania mieszanki betonowej. Na wskutek wypłynięcia parafiny zaobserwowano spadek wytrzymałości na ściskanie betonu. Jednak obserwując korzyści z zastosowania materiałów zmiennofazowych należy prowadzić dalsze badania, aby umożliwić zastosowanie tych dodatków w materiałach budowlanych.

Obecnie występuje kilka gotowych produktów zawierających materiał zmiennofazowy w postaci mikrokapsułek. Są to płyty gipsowe, zaprawy gipsowe oraz bloczki z betonu komórkowego.

## 2. Określenie wpływu temperatury w elemencie silikatowym zmodyfikowanym PCM

W warunkach laboratoryjnych przeprowadzono badania wstępne dotyczące określenia temperatur w elemencie silikatowym zawierającym materiał zmien-

nofazowy w postaci mikrogranulatu Micronal DS5038X. Szczególną uwagę zwrócono na temperatury uzyskane w przedziale przemiany fazowej w PCM. Dla porównania wyników wykonano próbkę z silikatu o tej samej masie.

Badania zostały przeprowadzone w komorze klimatycznej (rys. 1).



Rys. 1. Komora klimatyczna

Fig. 1. Climatic chamber

### 2.1. Przygotowanie próbek oraz stanowiska badawczego

Próbki silikatowe zostały przygotowane o wymiarach 60x60x120 mm. Aby uzyskać jednakowe masy w obydwóch próbkach wydrążono otwory o zbliżonych wymiarach. Różnica masy między próbką bez otworów a z otworami wynosiła 92 g, co stanowi około 11,9% masy próbki. Otwory w próbce bez PCM zabezpieczono przed dopływem ciepłego powietrza do wnętrza próbki.

Do jednej z próbek dodano materiał zmiennofazowy Micronal DS5038X. Procentowy udział PCM w próbce stanowił 1,8% masy w modyfikowanym elemencie.

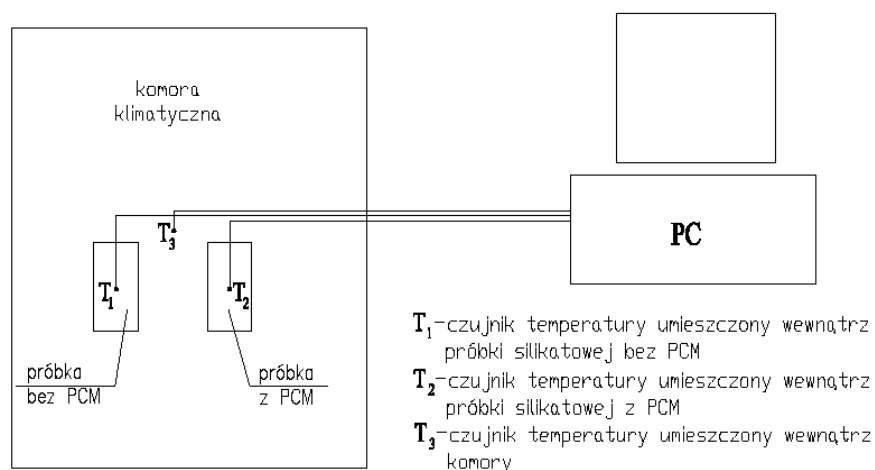
W tabeli nr 1 przedstawiono właściwości charakteryzujące badane materiały.

Tabela 1. Właściwości silikatu i PCM

Table 1. The properties of silicate and PCM

Materiał	Gęstość [kg/m <sup>3</sup> ]	Temp. topnienia [°C]	Temp. krzepnięcia [°C]	Ciepło właściwe [J/kgK]	Ciepło utajone [kJ/kg]	Współ. przew. ciepła [W/mK]
Silikat	1810 - 2000	-	-	1,0	-	1,05
Micronal DS5038X	300-400	25	24	~ 2,0	100	~0,1

Czujniki temperatury zostały umieszczone wewnątrz każdej próbki i podłączone do komputera. Próbkki zostały umieszczone w komorze klimatycznej (rys. 2).

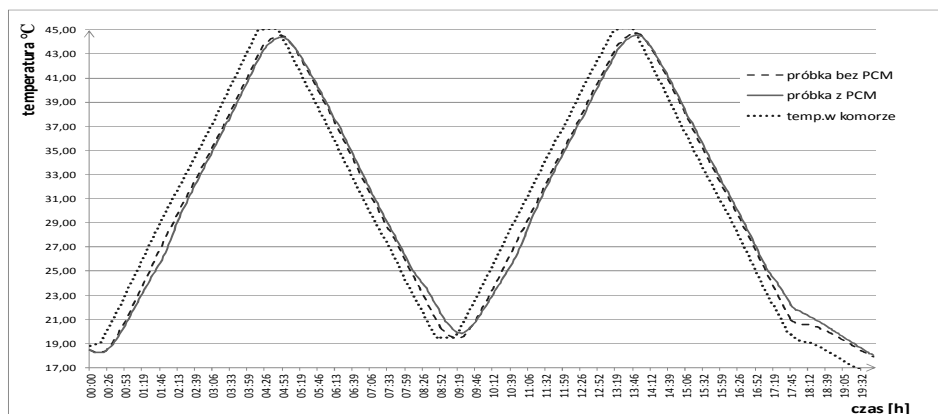


Rys. 2. Schemat stanowiska badawczego

Fig. 2. Schematic of research stand

## 2.2. Wyniki pomiarów

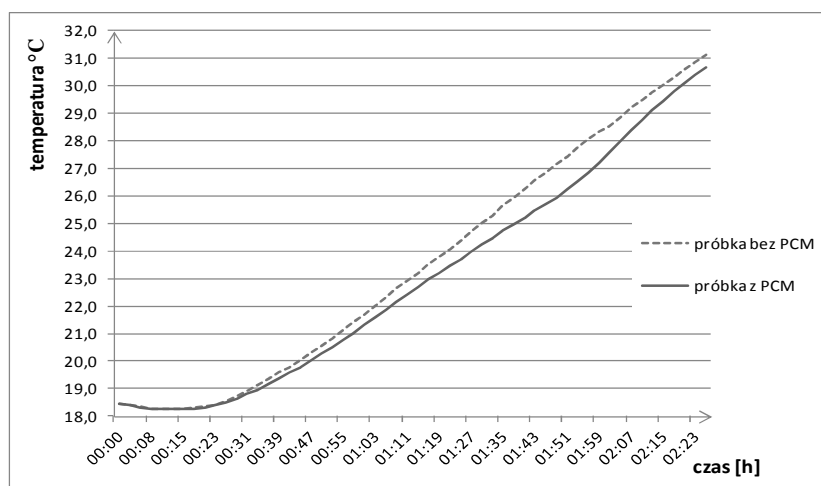
W pierwszym badaniu próbki o ustabilizowanej temperaturze (18,45°C) zostały stopniowo nagrzewane do temperatury 45°C. Wzrost temperatury został rozłożony w czasie 4 godzin. Następnie po ustabilizowaniu maksymalnej temperatury, w tym samym czasie jak w przypadku wzrostu, próbki zaczęto schładzać do temperatury 19°C. Całość badania wykonano w dwóch cyklach rys. 3.



Rys. 3. Wykres przedstawiający dwa cykle wartości temperatur w próbkach silikatowych oraz temperatury powietrza w komorze podczas stopniowego nagrzewania i schładzania próbek

Fig. 3. The chart showing two cycles of temperatures values in the silicate samples and air temperature in the chamber during the gradual heating and cooling of samples

Wraz ze wzrostem temperatury próbka z PCM nagrzewała się wolniej. W przedziale między 25°C a 27°C (rys. 4) wystąpiła maksymalna różnica temperatury między próbkami od 1,05 K do 1,25 K, co świadczyłoby o nastąpieniu przemiany fazowej w PCM i z akumulowaniu większej energii cieplnej w materiale zmiennofazowym, przyczyniając się do mniejszego wzrostu temperatury w samej strukturze elementu silikatowego.



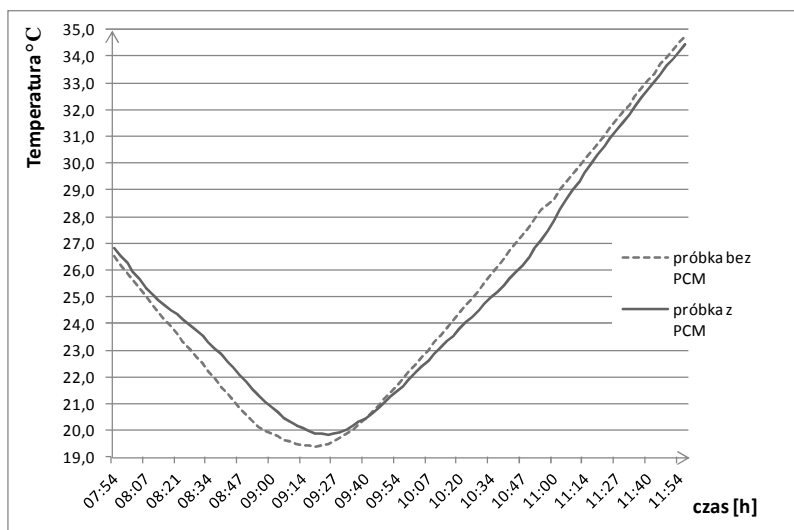
Rys. 4. Fragment wykresu wzrostu temperatur w próbkach silikatowych w przedziale temperatury przemiany fazowej PCM

Fig. 4. Part of the chart of temperatures increase in the silicate samples in the range of temperature of phase change PCM

W dalszym wzroście różnica temperatury utrzymywała się w podobnym odstępnie, czyli około 0,4 K, aż do momentu zrównania się temperatur.

Temperaturę zaczęto obniżać stopniowo w tym samym przedziale czasowym jak w przypadku nagrzewania próbek. W przedziale między 20 ÷ 25°C zaobserwowano największą różnicę w spadku temperatury pomiędzy próbkami (Rys. 5). W silikacie bez PCM temperatura spadła szybciej o maksymalnie 1,24 K. W próbce z PCM nastąpiła przemiana fazowa z ciekłej na stałą, co spowodowało oddawanie zmagazynowanej energii cieplnej do struktury elementu i wzrostu temperatury w zmodyfikowanym silikacie.

Maksymalne wartości różnicy temperatur w przypadku nagrzewania i schłodzenia były zbliżone.



Rys. 5. Fragment wykresu spadku i wzrostu temperatur w obydwóch próbkach silikatowych podczas stopniowego schładzania i nagrzewania próbek

Fig. 5. Part of the chart decrease and increase of temperatures in both samples of silicate during the gradual cooling and heating of samples

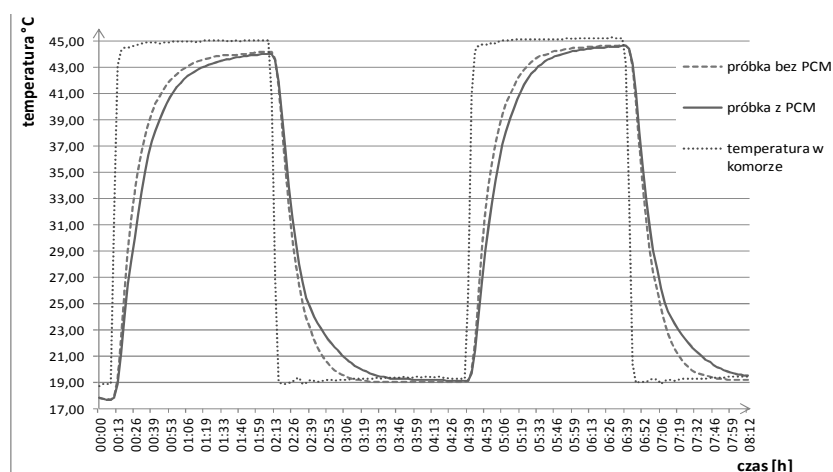
W okresie utrzymywania temperatury na poziomie 19°C przez 30 min. między cyklami, temperatura w próbce z PCM była wyższa o około 0,50 K od niemodyfikowanej próbki.

W drugim cyklu nagrzewania próbek, temperatura w elemencie z PCM wzrastała podobnie jak w przypadku pierwszego cyklu.

W kolejnym badaniu przyjęto szybki wzrost temperatury do tej samej wartości 45°C, jak w przypadku stopniowego nagrzewania. Przeprowadzono również dwa cykle (rys. 6). Przy nagrzewaniu nastąpił szybszy wzrost próbki bez materiału zmiennofazowego. Różnica temperatury między próbkami występo-

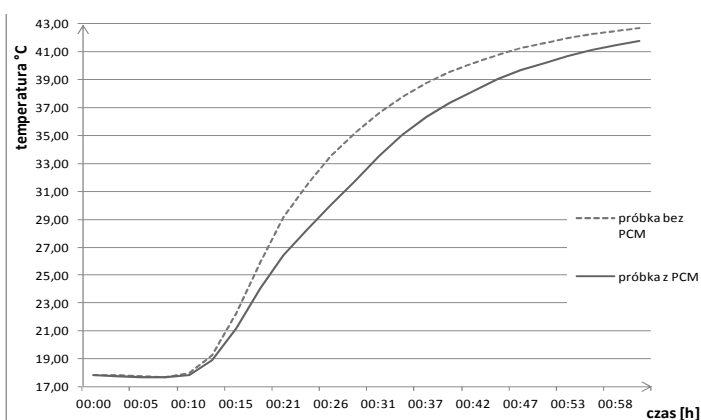
wał w całym przedziale nagrzewania aż do maksymalnej temperatury zadanej w komorze, czyli 45°C.

Na rysunku 7 przedstawiono wzrost temperatury w obydwóch próbkach podczas szybkiego nagrzewania w komorze. W przedziale między 28 ÷ 33°C nastąpiła największa różnica w temperaturach pomiędzy próbkami i przekroczyła 3 K (max. 3,53 K), co świadczy o wystąpieniu przemiany fazowej i o szybkim zmagazynowaniu energii cieplnej przez PCM.



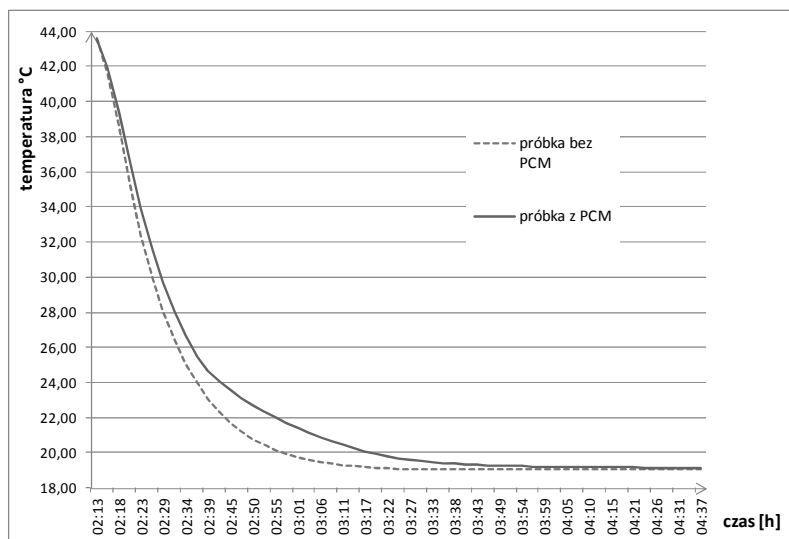
Rys. 6. Wykres przedstawiający dwa cykle wartości temperatur w próbkach silikatowych oraz temperatury powietrza w komorze podczas szybkiego nagrzewania i schładzania próbek

Fig. 6. The chart showing two cycles of temperature values in silicate samples and air temperature in the chamber during fast heating and cooling of samples



Rys. 7. Fragment wykresu wzrostu temperatur w próbkach silikatowych podczas szybkiego nagrzewania próbek

Fig. 7. Part of the chart of temperatures increase in the silicate samples during fast heating of samples



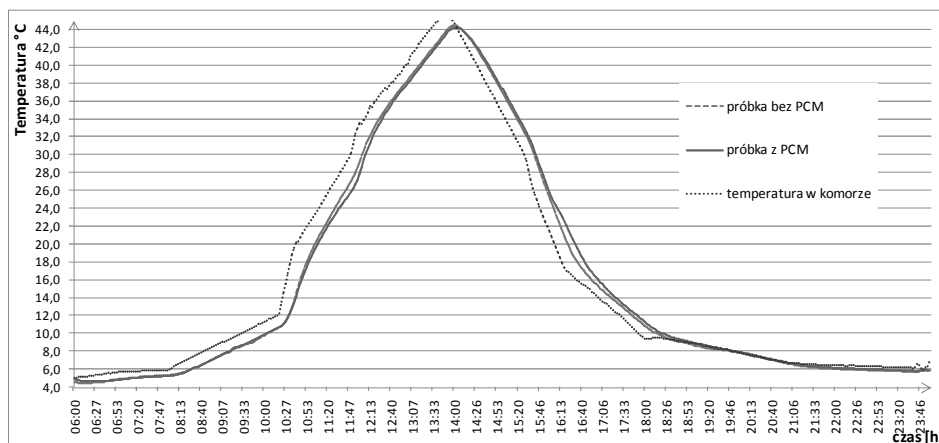
Rys. 8. Fragment wykresu spadku temperatury w próbkach silikatowych podczas szybkiego schładzania próbek

Fig. 8. Part of the chart of temperature decrease in the silicate samples during the fast cooling of samples

Na rysunku nr 8 przedstawiono spadek temperatury w obydwóch próbkach podczas szybkiego schładzania w komorze. Tendencja do wolniejszego obniżania temperatury w próbce z PCM została zauważona od początku spadku temperatury. Kiedy pojawił się proces krzepnięcia PCM ( $24^{\circ}\text{C}$ ) nastąpiło oddawanie zmagazynowanej energii cieplnej do elementu silikatowego, co świadczy o wzroście temperatury maksymalnie o  $1,95\text{ K}$  w porównaniu do elementu bez materiału zmiennofazowego. Po  $1,5$  godzinie utrzymywania temperatury na poziomie  $19^{\circ}\text{C}$  w komorze, wartości temperatur w obydwóch próbkach zbliżyły się do siebie.

W drugim cyklu podobnie jak w pierwszym podczas nagrzewania osiągnięto zbliżoną różnicę temperatury między próbkami, czyli przy wartości około  $30^{\circ}\text{C}$ , przekroczona została o  $3\text{ K}$ .

Biorąc pod uwagę możliwość zastosowania elementów silikatowych modyfikowanych materiałami zmiennofazowymi w przegrodach kolektorowo – akumulacyjnych, przeprowadzono dodatkowo, badanie określenia temperatur w próbkach, narzucając zbliżone temperatury w komorze z danych temperaturowych uzyskanych od promieniowania słonecznego na powierzchni wewnętrznej przeszklenia w ścianie kolektorowo – akumulacyjnej [5]. Przyjęto jeden dzień stycznia (11.01.2009r.) o dużym natężeniu promieniowania słonecznego. W tym dniu minimalna temperatura na wewnętrznej powierzchni przeszklenia wynosiła  $5,0^{\circ}\text{C}$ , maksymalna  $46,25^{\circ}\text{C}$ .



Rys. 9. Wykres przedstawiający temperatury w próbkach silikatowych oraz temperatury powietrza w komorze podczas narzuconych temperatur uzyskanych z promieniowania słonecznego na wewnętrznej stronie przeszklenia

Fig. 9. The chart showing the temperature of the silicate samples and air temperature in the chamber during the temperature imposed obtained from solar radiation on the inner side of the glazing

Podobnie jak w poprzednich badaniach, największa różnica temperatur między próbkami występowała w przedziale przemiany fazowej zarówno przy wzroście jak i spadku temperatur. Temperatura w próbce z PCM przy nagrzewaniu w przedziale między 25 a 30°C była niższa od próbki bez PCM ponad 1 K, a maksymalnie różnica wynosiła 1,3 K. Natomiast przy spadku była wyższa maksymalnie o 1,76 K, w przedziale 17÷24°C.

### 3. Wnioski

W przeprowadzonych badaniach na podstawie uzyskanych wartości temperatur w próbkach, można zauważyć i potwierdzić możliwość zwiększenia magazynowania energii cieplnej w elementach silikatowych, niezależnie od sposobu nagrzewania i schładzania próbek.

Przyrost oraz spadek temperatury w modyfikowanej próbce odbywa się w sposób łagodniejszy od próbki tradycyjnej.

W przypadku elementów silikatowych zastosowanie materiałów zmienno-fazowych może przyczynić się do zmniejszenia ich masy, jednocześnie nie redukując zalety tych materiałów, czyli dużej akumulacyjności.

Elementy silikatowe z wkomponowanym PCM mogą być wykorzystane również w ścianach kolektorowo – akumulacyjnych, co jest szansą na poprawę ich efektywności energetycznej.

Powyższe wstępne badania są przyczynkiem do dalszych badań w kierunku analizy możliwości zastosowania ich w takich przegrodach.



## Literatura

- [1] Cabeza L. F., Castellon C., Nogues M., Medrano M., Leppers R., Zubillaga O.: Use of microencapsulated PCM in concrete walls for energy savings, *Energy and Buildings* 39 (2007) 113–119
- [2] Entrop A.G., Brouwers H.J.H., Reinders A.H.M.E.: Experimental research on the use of micro-encapsulated Phase Change Materials to store solar energy in concrete floors and to save energy in Dutch houses, *Solar Energy* 85 (2011) 1007–1020
- [3] Hunger M., Entrop A.G., Mandilaras I., Brouwers H.J.H., Founti M.: The behavior of self-compacting concrete containing micro-encapsulated Phase Change Materials, *Cement & Concrete Composites* 31 (2009) 731–743
- [4] Kuznik F., David D., Johannes K., Roux J.J.: A review on phase change materials integrated in building walls, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 15 (2011) 379–391
- [5] Miąsik P.: Efektywność energetyczna szkieletowych przegród kolektorowo – akumulacyjnych, *Praca doktorska*, 2011

## DEFINING THE INFLUENCE OF THERMAL PULSES ON THE INTERNAL TEMPERATURE CHANGES IN SILICATE ELEMENTS MODIFIED WITH PHASE CHANGE MATERIALS

### Summary

The article presents preliminary research on the defining temperature values in the silicate element, where phase-change material (PCM) was placed. Temperatures were being recorded during heating and cooling of samples in the climatic chamber. For the comparison of the results, the research was conducted using two equal-mass silicate samples. The phase change material in the form of microgranules was added to one of the samples. The subject microgranule was in the form of paraffin, encapsulated in polymer coatings, to allow the insertion of the change phase material in the element of silicate directly without collateral of the inner wall surfaces. The samples were subjected to thermal pulses in two variants. In the first one, silicate elements were gradually heated and cooled within the specified time period, while in the second one, they were exposed to the rapid increase and decrease of temperature. Each test was carried out in two identical cycles. In the article, special attention was put to the presented charts focusing particularly on the temperature ranges in which the phase change occurs, both during the melting phase and the solidification phase of the material. The additional sample research was conducted in order to define the possibility of using silicate materials in thermal - storage barriers. The temperature values were assumed on the basis of data collected from the inner glazing surface and obtained from solar radiation during one day. The data was adopted by analyzing a selected day in January. Silicates belonging to the wall elements are characterized by high accumulation, which is related to their significant weight. A chance to reduce the weight of these materials while maintaining and possibly improving their accumulation capacity, is to use phase change materials in structure of silicate.

**Keywords:** PCM, accumulation, element walls, phase change

DOI:10.7862/rb.2014.97

*Przesłano do redakcji: 05.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Ewelina KRAWCZAK<sup>1</sup>  
Sławomir GUŁKOWSKI<sup>2</sup>  
Jan M. OLCHOWIK<sup>3</sup>

## **BADANIE EFEKTYWNOŚCI PRACY FOTOWOLTAICZNEGO SYSTEMU “OFF – GRID” W WARUNKACH ZIMOWO - WIOSENNYCH DLA LUBELSZCZYZNY**

W artykule poruszono tematykę związaną z zastosowaniem autonomicznego systemu fotowoltaicznego „off-grid” na Lubelszczyźnie. W Polsce istnieją dobre warunki do wykorzystania energii słonecznej. Lubelszczyzna charakteryzuje się występowaniem niezwykle korzystnych warunków do wytwarzania energii elektrycznej, z wykorzystaniem konwersji fotowoltaicznej. Praca systemu fotowoltaicznego „off-grid” zwanego autonomicznym, opiera się wyłącznie na energii, którą system sam generuje. System ten nie jest podłączony do sieci przesyłowej i znajduje zastosowanie w miejscach, gdzie niemożliwe jest doprowadzenie okablowania sieci elektroenergetycznej. Celem przeprowadzonych badań było określenie efektywności pracy autonomicznego systemu fotowoltaicznego „off-grid” w okresie wiosenno-zimowym dla Lubelszczyzny. Okres ten został wybrany ze względu na najbardziej niekorzystne warunki nasłonecznienia. Badania zostały przeprowadzone w specjalnie do tego celu stworzonym układzie pomiarowym, zlokalizowanym w kampusie Politechniki Lubelskiej, obejmującym moduł fotowoltaiczny o mocy 100 Wp, regulator ładowania, magazyn energii elektrycznej 12V o pojemności 33Ah oraz obciążenia. Rezultaty badań przedstawione zostały w postaci wykresów mocy w funkcji czasu dla wybranych obciążeń układu. Zbadano napięcie oraz natężenie w układzie obciążenia, uzysk energii produkowanej przez ogniwo PV w poszczególnych dniach, czas ładowania oraz rozładowywania akumulatora w zależności od wielkości podłączonego obciążenia i warunków atmosferycznych. Na podstawie przeprowadzonych badań wywnioskowano, że poziom uzysku energii elektrycznej z modułów PV jest uzależniony od warunków atmosferycznych, lokalizacji modułu PV oraz kąta padania promieni słonecznych a także od wielkości obciążenia układu przez odbiorniki energii.

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Ewelina Krawczak, Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38, e-mail: e.krawczak@pollub.pl

<sup>2</sup> Sławomir Gułkowski, Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38, e-mail: s.gulkowski@pollub.pl

<sup>3</sup> Jan M. Olchowik, Politechnika Lubelska, Wydział Inżynierii Środowiska, 20-618 Lublin, ul. Nadbystrzycka 38, e-mail: j.olchowik@pollub.pl

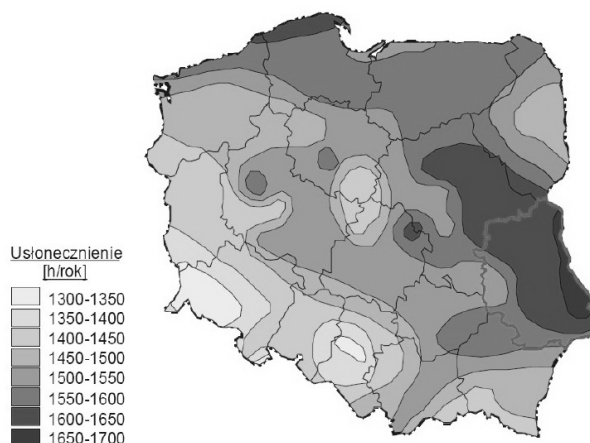
**Słowa kluczowe:** system wyspowy, system autonomiczny, fotowoltaika, energetyka słoneczna, OZE

## 1. Wprowadzenie

Technologie fotowoltaiczne pozwalają na konwersję energii słonecznej w elektryczną za pomocą ogniw fotowoltaicznych. Energia słoneczna w bardzo dużym stopniu może zastąpić konwencjonalne źródła, z których produkuje się energię elektryczną. Odgrywa ona coraz większą rolę w elektryfikacji, zwłaszcza dla obszarów oddalonych od zasilania sieciowego. Ponadto energię tę można magazynować w specjalnych bateriach. Bezpośrednie przetwarzanie energii Słońca na energię elektryczną jest technologią stosunkowo młodą, lecz bardzo prężnie rozwijającą się, w wyniku której powstaje czysta energia. Do pracy systemu fotowoltaicznego nie potrzeba żadnego paliwa, a w czasie produkcji nie powstają zanieczyszczenia, odpady, które mogłyby niekorzystnie wpływać na środowisko naturalne [1].

## 2. Warunki nasłonecznienia dla Lubelszczyzny

Lubelszczyzna jest to region położony we wschodniej Polsce. Województwo lubelskie jest jednym z najkorzystniejszych energetycznie regionów Polski. Napromieniowanie roczne wynosi około  $3800 \text{ MJ/m}^2/\text{a}$ , co daje około  $1500 \text{ kWh/m}^2/\text{a}$  (rys.1). W grudniu dzienna wartość napromieniowania wynosi  $1 \text{ MJ/m}^2/\text{d}$ , z kolei w czerwcu i lipcu wartość ta wzrasta do  $23 \text{ MJ/m}^2/\text{d}$ . Suma usłonecznienia na Lubelszczyźnie waha się w zakresie 1 500 - 1 700 godzin rocznie [3]. Zgodnie z ekspertyzą „Konwersja termiczna energii promieniowania słonecznego w warunkach krajowych” Komitetu Termodynamiki i Spalania PAN region podlasko-lubelski został uznany wraz z regionem nadmorskim za obszar, w których panują najkorzystniejsze warunki do wykorzystywania energii promieniowania słonecznego. Natomiast wg. Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej region Lubelski usytuowany jest w obszarze, gdzie roczne sumy promieniowania słonecznego kształtują się na poziomie  $950\text{-}1020 \text{ kWh/m}^2$  [1]. Region Lubelski charakteryzuje najniższe względem kraju średnie roczne zachmurzenia nieba, wynoszące poniżej 65 %, duży udział promieniowania bezpośredniego w promieniowaniu całkowitym. Ponadto Lublin osiąga dość wysokie średnie temperatury w ciągu miesiąca w porównaniu z innymi miastami w Polsce [3].



Rys. 1. Mapa usłonecznienia Polski, na podstawie [3]

Fig. 1. Map of sunshine hours of Poland, based on [3]

### 3. Rodzaje systemów fotowoltaicznych

Produkcja energii elektrycznej przez systemy fotowoltaiczne nabiera coraz większego znaczenia i jest coraz szerzej stosowana w Europie i świecie. Systemy te mogą pracować przez cały rok, produkując energię elektryczną, także przy niekorzystnych warunkach atmosferycznych, przekształcając padające na ogniwa PV rozproszone promieniowanie słoneczne [1]. Wyróżniane są dwie grupy systemów: system on-grid (grid-connected) oraz off-grid. Pierwszą grupę stanowią systemy zintegrowane z siecią, które nie potrzebują urządzeń służących do magazynowania energii. Przekazują (sprzedają) one wyprodukowaną energię do sieci energetycznej. W systemach off-grid energia elektryczna, pozyskiwana z modułów fotowoltaicznych w postaci prądu stałego jest zamieniana na prąd przemienny, który następnie wykorzystywany jest na potrzeby własne gospodarstwa domowego [2]. System off-grid nazywany również wyspowym lub autonomicznym współpracuje z magazynami energii, w których przechowywane są nadwyżki wyprodukowanej energii celem późniejszego wykorzystania. System autonomiczny funkcjonuje tylko dzięki energii, którą sam wytworzy. Istnieją trzy typy instalacji autonomicznych w zależności od sposobu i rodzaju zasilanych urządzeń energetycznych [3]:

- a) Bezpośrednie zasilanie urządzeń prądu stałego. Jest to najprostszy i zarazem najbardziej nieefektywny typ instalacji off-grid, w którym moduły PV zasilają bezpośrednio urządzenia elektryczne prądu stałego. W tym przypadku nie jest możliwy prawidłowy dobór mocy urządzenia, co prowadzi do bardzo niewydajnego wykorzystania uzyskiwanej energii. Bezpośrednie zasilanie akumulatorów przez moduły może doprowadzić do uszkodzenia magazynu energii, ponieważ nie ma możliwości kontrolowania wartości ładunku dostarczanego do baterii, głębokości jej rozładowania ani kontrolowania napięcia.

- b) Zasilanie urządzeń prądu stałego z wykorzystaniem regulatora ładowania. W systemie takim warunki pracy układu narzucane są przez akumulator i obciążenie oraz regulowane są przez regulator ładowania. W bateriach akumulatorów gromadzona jest nadwyżka produkowanej energii, która jest wykorzystywana do zasilania odbiorników prądu stałego w przypadku niekorzystnych warunków pogodowych. Regulatory ładowania dostosowują napięcie modułu PV do aktualnego napięcia niezbędnego do ładowania akumulatora, w zależności od poziomu jego naładowania. Ponadto zabezpieczają akumulator przed przeładowaniem oraz przed głębokim rozładowaniem, odcinając obciążenie.
- c) Zasilanie urządzeń prądu stałego i przemiennego z wykorzystaniem prądu przemiennego przetwornicy DC/AC oraz regulatora ładowania. System PV należy dodatkowo rozbudować o przetwornicę DC/AC (falownik), którą podłącza się do układu poprzez akumulator.

#### 4. System fotowoltaiczny i układ pomiarowy

System fotowoltaiczny, który został wykorzystany do wykonania badań efektywności pracy systemu off-grid znajduje się w kampusie Politechniki Lubelskiej [5-8]. Do budowy instalacji badawczej wykorzystano moduł polikrystaliczny usytuowany na dachu Auli Wydziału Zarządzania i Podstaw Techniki Politechniki Lubelskiej (rys.2).

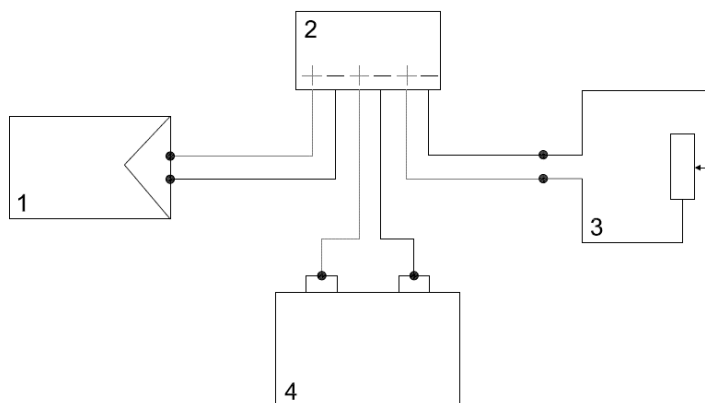


Rys. 2. System słoneczny zainstalowany na dachu Auli Wydziału Zarządzania i Podstaw Techniki Politechniki Lubelskiej.

Fig. 2. Solar system installed on the roof of the assembly hall of Lublin University of Technology

System badawczy, przedstawiony na rysunku 3, składa się z następujących urządzeń:

1. Moduł fotowoltaiczny o mocy 100 Wp;
2. Regulator ładowania;
3. Odbiornik z możliwością regulacji wartości obciążenia.
4. Akumulator 12 V o pojemności 33Ah.



Rys. 3. Schemat instalacji badawczej

Fig. 3. Schematic diagram of the research photovoltaic system

Układ pomiarowy składa się z trzech obwodów: obwodu modułu, obciążenia oraz akumulatora. Moduł PV wykorzystany przy budowie systemu off-grid jest polikrystalicznym krzemowym modułem firmy Solara SM 400 S. Moc nominalna zainstalowanego modułu wynosi 100 Wp. Zastosowano regulator ładowania firmy Steca, typ Solsum 8.8F. Kontroler rozpoznaje napięcie akumulatora i automatycznie przełącza na napięcie 12V-24V. Ponadto posiada funkcję automatycznego odłączania obciążenia w celu zabezpieczenia akumulatora przez przeładowaniem oraz głębokim rozładowaniem.

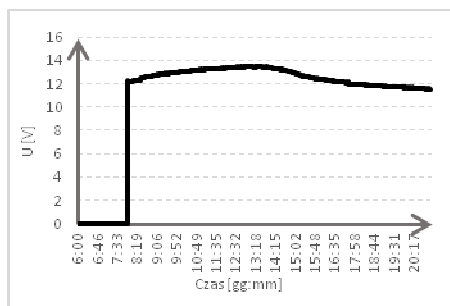
Rolę obciążenia w systemie pomiarowym spełnia opornik, który zastępuje rezystancję rzeczywistego odbiornika prądu w gospodarstwie domowym, np. żarówka. Rezystor został zbudowany specjalnie na potrzeby omawianej instalacji i posiada możliwość regulacji wartości obciążenia w zakresie  $1\Omega$  do  $10\Omega$ . Zastosowany układ pozwala na automatyczną rejestrację parametrów charakteryzujących pracę systemu w układzie obciążenia [9,10]. Magazynem energii elektrycznej w instalacji pomiarowej jest akumulator firmy Haze, typ HZY EV 12V-33. Jest to akumulator ołowiowo-kwasowy wykonany w technologii żelowej o pojemności 33 Ah. Magazyn energii firmy Haze przeznaczony jest do codziennej pracy cyklicznej, dlatego znalazł zastosowanie w instalacji fotowoltaicznej. W instalacji PV wykorzystana jest również karta przekaźnikowa ADVANTECH PCI-1710, dzięki której możliwy jest automatyczny zapis m.in. napięcia, natężenia prądu, temperatury zewnętrznej oraz temperatury modułu fotowoltaicznego w pamięci komputera. Pracą układu badawczego steruje komputerowy program „Pomiary PV”, który odpowiada za rejestrację wejściowych parametrów, m.in. czasu rozpoczęcia, liczby kanałów czy rezystancji obciążenia oraz konwersji tych wartości do postaci liczbowej. Jako moduł referencyjny

został wykorzystany monokrystaliczny moduł 10W znajdujący się w tej samej lokalizacji, co moduł polikrystaliczny.

Badanie wartości napięcia i natężenia prądu w obwodzie akumulatora wykonano ręcznie w specjalnie zmodyfikowanym układzie pomiarowym poprzez podłączenie woltomierza i amperomierza.

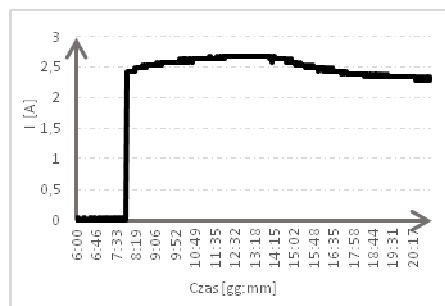
## 5. Wyniki

Pomiary pracy instalacji badawczej, zostały przeprowadzone w terminie 11.03.2014 r. – 23.03.2014 r. przy rezystancji równej  $5\Omega$ . Na rys. 4 oraz rys. 5 zostało przedstawione napięcie oraz natężenie prądu odczytane z modułu badanego w dniu 12.03.2014 r., który został uznany za modelowy dzień słoneczny. Około godziny 08:00 automatycznie zostało włączone obciążenie przez system, a napięcie osiągnęło wartość w zakresie 12-14 V. Najwyższe wartości napięcia osiągnęło w godzinach największego natężenia promieniowania słonecznego, przypadającego na godziny okołopołudniowe. Spadek wartości napięcia od godziny 13:30 świadczy o powolnym rozładowywaniu się magazynu energii, w wyniku przekazywania części energii na obciążenie. Po podłączeniu odbiornika do systemu off-grid prąd generowany przez badany moduł PV, od godziny 08:00 do 15:30 zmieniał się w zakresie 2,4-2,6 A, następnie osiągnął stałą wartość na poziomie 2,4 A.



Rys. 4. Napięcie odczytane z modułu polikrystalicznego 100 W w dniu 12.03.2014 r.

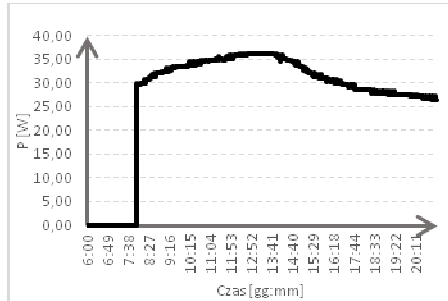
Fig. 4. Voltage of the polycrystalline module 100W on 12.03.2014



Rys. 5. Natężenie odczytane z modułu polikrystalicznego 100 W w dniu 12.03.2014 r.

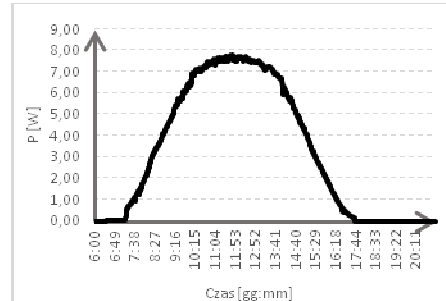
Fig. 5. Intensity scored polycrystalline module 100W on 12.03.2014

W oparciu o wartości napięcia i natężenia prądu wyliczono moc generowaną w systemie fotowoltaicznym, którą przedstawiono na rys. 6. Po podłączeniu odbiornika przez kontroler ładowania ilość przekazywanej mocy wynosiła 30 W. W godzinach okołopołudniowych ilość ta zmieniała się w zakresie 5%, aby w maksymalnym punkcie pracy osiągnąć wartość 35 W. Porównując rys. 6 z rys. 7, na którym została przedstawiona moc wygenerowana przez moduł refe-



Rys. 6. Moc uzyskiwana z modułu polikrystalicznego 100 W w dniu 12.03.2014 r.

Fig. 6. Power derived from polycrystalline module 100W on 12.03.2014

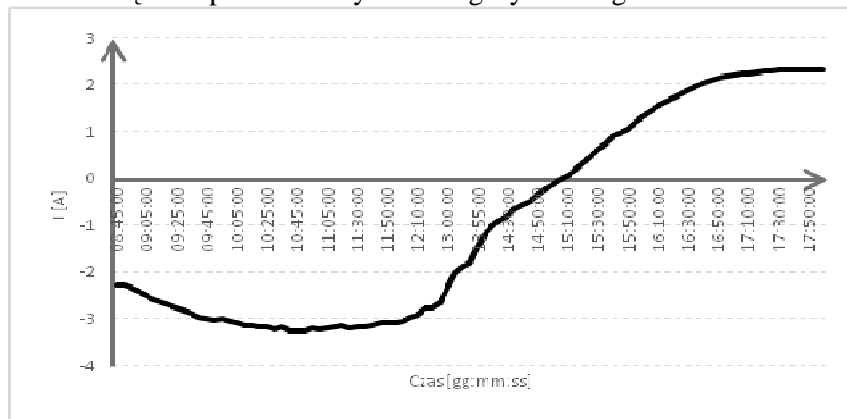


Rys. 7. Moc uzyskiwana z modułu monokrystalicznego 10 W w dniu 12.03.2014 r.

Fig. 7. Power derived from monocrystalline module 10W on 12.03.2014

rencyjny, można zauważyć, że po godzinie 17:30 rozpoczęła się autonomiczna praca systemu, podtrzymywana przez akumulator.

Wartości natężenia prądu uzyskane z pomiarów ręcznych w obwodzie akumulatora zostały przedstawione na rys. 8. Analizując wykres można stwierdzić, iż akumulator ładowany był do godziny 15:05. Po tej godzinie natężenie przyjęło wartości dodatnie, co świadczy o tym, iż zmienił się kierunek przepływu prądu w układzie, a energia kierowana na obciążenie pobierana była zarówno z akumulatora, jak i modułu PV. O godzinie 17:15 wartość natężenia ustabilizowała się na poziomie 2,33 A. Dowodzi to, iż w tym czasie energia przesyłana na obciążenie pochodziła tylko z magazynu energii.

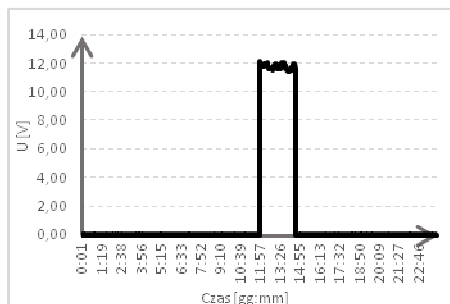


Rys. 8. Natężenie prądu w obwodzie akumulatora

Fig. 8. Intensity in the battery circuit

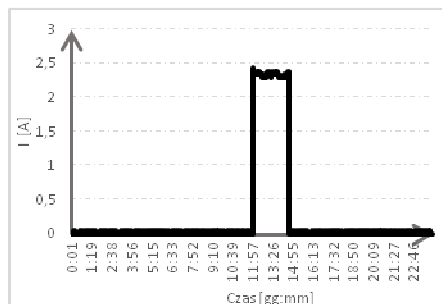


Dzień 15.03.2014 r. został wybrany jako pokazowy dzień pochmurny. Na rys. 9 oraz rys. 10 przedstawiono odpowiednio napięcie oraz natężenie prądu generowane przez moduł PV. Do godziny 11:30 oraz po godzinie 14:30 regulator odłączył obciążenie, aby nie doprowadzić do głębokiego rozładowania akumulatora. Napięcie w godzinach okołopołudniowych osiągnęło wartość 12 V, a natężenie 2,4 A.



Rys. 9. Napięcie odczytane z modułu polikrystalicznego 100 W w dniu 15.03.2014 r.

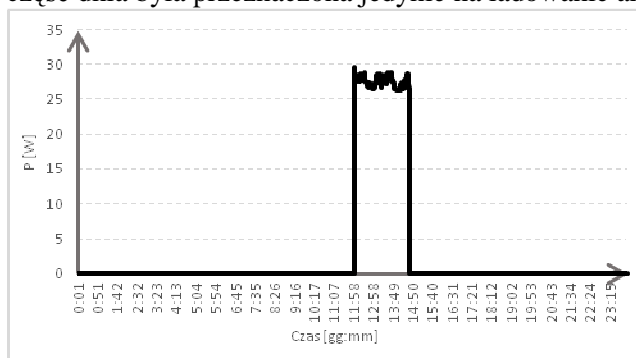
Fig. 9. Voltage of the polycrystalline module 100W on 15.03.2014



Rys. 10. Natężenie odczytane z modułu polikrystalicznego 100 W w dniu 15.03.2014 r.

Fig. 10. Intensity scored polycrystalline module 100W on 15.03.2014

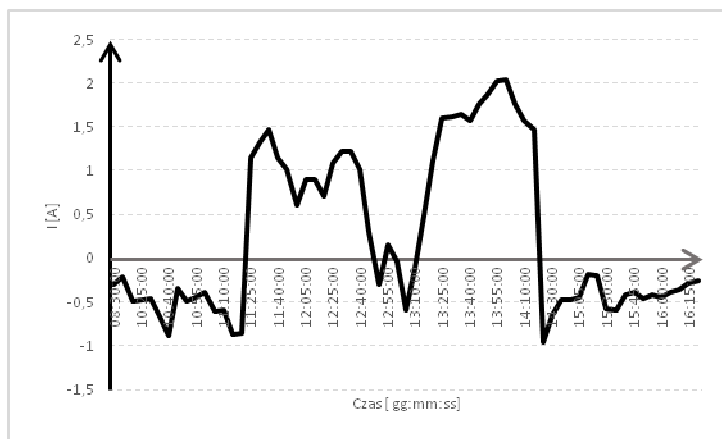
Moc przekazywana była na obciążenie tylko pomiędzy godziną 11:30 a 14:30 w ilości 28-30W, co świadczy o niekorzystnych warunkach atmosferycznych i niewielkim natężeniu promieniowania poza tym przedziałem czasowym (rys.11). Poza tym okresem działał system ochrony akumulatora przed głębokim rozładowaniem. Panujące warunki pozwoliły na naładowanie akumulatora tylko w niewielkim stopniu, co niestety nie pozwoliło na podłączenie obciążenia na dłuższy okres czasu. Cała ilość generowanej mocy przez większą część dnia była przeznaczona jedynie na ładowanie akumulatora.



Rys. 11. Moc uzyskiwana z modułu polikrystalicznego 100 W w dniu 15.03.2014 r.

Fig. 11. Power derived from polycrystalline module 100W on 15.03.2014

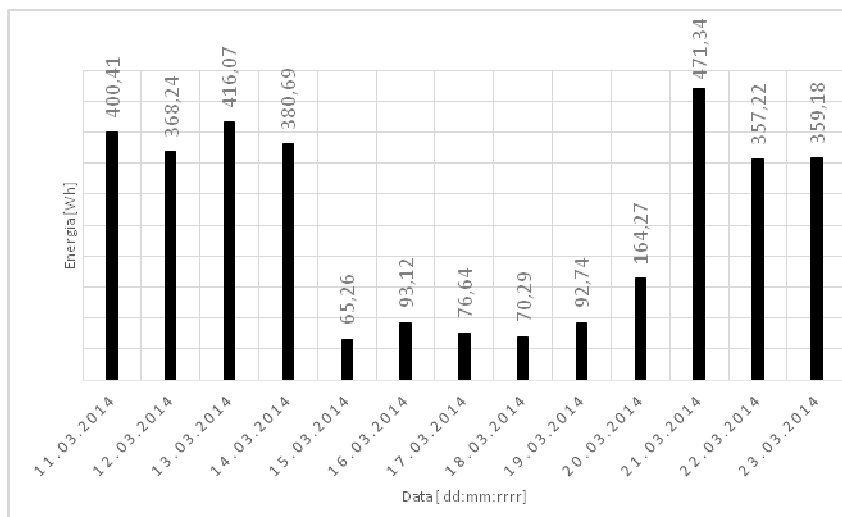
Zbadano również natężenie w obwodzie akumulatora w dzień pochmurny, co zostało przedstawione na rys. 12. Układ charakteryzował się pracą cykliczną. W momentach przejaśnień moc przekazywana na obciążenie pochodziła z obu źródeł (akumulator i moduł), natomiast w momencie niskiego natężenia promieniowania tylko magazyn energii przesyłał energię.



Rys. 12. Natężenie prądu w obwodzie akumulatora

Fig. 12. Intensity in the battery circuit

Wykres przedstawiony na rys.13 przedstawia ilość wygenerowanej energii elektrycznej w dniach od 11.03.2014r do 23.03.2014r. Największy uzysk energii nastąpił w dniu 21.03.2014r. i wynosił 471,34 Wh. Tak wysoki poziom uzysku energii jest możliwy, gdy natężenie promieniowania słonecznego jest bardzo wysokie i zbliżone do natężenia w warunkach STC oraz gdy został zastosowany akumulator, który podtrzymuje pracę systemu. Wysoki poziom generacji energii elektrycznej wystąpił również w dniach o korzystnych warunkach pogodowych i wynosił 13.03.2014r. – 416,07 Wh, 14.03.2014r. – 380,69 Wh, 20.03.2014r. – 164,27 Wh, 22.03.2014r. – 357,22 Wh, 23.03.2014r. – 359,18 Wh. Pozostałe dni charakteryzowały się gorszymi warunkami atmosferycznymi, więc uzysk energii był mniejszy, co widać na rysunku 13.



Rys. 13. Uzysk energii w dniach 11.03. – 23.03.2014 r.

Fig. 13. Energy obtained on 11.03 - 23.03.2014

## 6. Podsumowanie

Województwo Lubelskie charakteryzuje się bardzo dużymi zasobami energii słonecznej w porównaniu z resztą Polski. Ilość generowanej energii przez badany moduł polikrystaliczny jest ściśle związana z warunkami atmosferycznymi. Na uzysk energii ma również wpływ położenie Słońca na nieboskłonie oraz wielkości obciążenia układu przez odbiornik energii. Zainstalowanie autonomicznego systemu na Lubelszczyźnie może zapewnić zasilanie obciążenia przez całą dobę w dni słoneczne w najbardziej niekorzystnych warunkach tj. w okresie wiosenno-zimowym. Jednak w dni pochmurne może dojść do wstrzymania pracy systemu, z uwagi na zbyt niski poziom naładowania akumulatora i niewystarczająca ilość produkowanej energii elektrycznej. W celu poprawienia wydajności systemu off-grid należy rozważyć zmianę wielkości obciążenia oraz zweryfikować liczbę godzin zasilania odbiornika obciążenia.

## Literatura

- [1] Klugmann-Radziemska E.: Fotowoltaika w teorii i praktyce, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2010;
- [2] Nofuentes G i inni.: PVS in Bloom: podręcznik techniczny: instalowanie naziemnych farm fotowoltaicznych na terenach marginalnych, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2011;
- [3] Strzyżewska D.: Energie odnawialne. Przegląd technologii i zastosowań, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2012;

- [4] Szymański B.: Instalacje fotowoltaiczne. Teoria, praktyka, prawo, ekonomika. Wydawnictwo GLOBEnergia, Kraków 2013;
- [5] J.M. Olchowik, I. Józwik, R. Tomaszewski, D. Szymczuk, J. Adamczyk, T. Cieplak, K. Zabielski, J. Mucha, Optimization of work conditions of solar cells in hybrid solar system under conditions of Southeast Poland, Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand 26-30 January 2004, vol. I, p.495;
- [6] J.M. Olchowik, K.Cieslak, S. Gulkowski, I. Jozwik, J. Banas, G. Olchowik, K. Zabielski, J. Adamczyk, R. Tomaszewski, Comparative analysis of solar cells efficiency in stationary and navigated hybrid systems under southeast Poland conditions, IEEE 2006 Proc. of 4<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii, 7-12 May 2006, 2506;
- [7] J.M. Olchowik, S. Gulkowski, K. Cieslak, I. Jozwik, J. Banas, S. Olchowik, A. Zdyb, D. Szymczuk, J. Adamczyk, R. Tomaszewski, K. Zabielski, J.Mucha, T. Cieplak, 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 and Exhibition, 4-8 September 2006, Dresden (Germany), 3049;
- [8] J.M.Olchowik, S.Gulkowski, K.Cieslak, S.Olchowik, K.Zabielski, I.Jozwik, D.Szymczuk, J.Adamczyk, R.Tomaszewski, analysis of the influence of diffuse solar radiation on the efficiency of photovoltaic conversion at south-eastern Poland conditions, Proc. of 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 3-7 September 2007, Milan (Italy), 3238.;
- [9] J. Banaś, R. Tomaszewski, J.M. Olchowik, Komputerowe sterowanie układem „follow the sun” modułów PV Politechniki Lubelskiej, W monografii: „Rachunek Globalny a Przyszłość Informatyki” (red. J.M. Olchowik), Wydawnictwa Naukowe Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Białej Podlaskiej, Biała Podlaska 2004, str. 188;
- [10] S. Olchowik, J.M. Olchowik, DELPHI jako środowisko monitoringu pracy ogniw fotowoltaicznych, W monografii: „Rachunek Globalny a Przyszłość Informatyki” (red. J.M. Olchowik), Wydawnictwa Naukowe Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Białej Podlaskiej, Biała Podlaska 2004, str. 180.

## **RESEARCH WORK THE EFFICIENCY OF THE PHOTOVOLTAIC SYSTEM OFF-GRID IN THE LUBLIN PROVINCE DURING WINTER/SPRING CONDITIONS**

### **S u m m a r y**

The paper discusses issues related to the use of autonomous system off-grid in the Lublin province. In Poland there are good conditions for the use of solar energy by changing the type and properties of systems using the energy. Lubelszczyzna has good conditions for the generation of electricity using photovoltaic conversion. Work of photovoltaic system "off-grid" called also autonomous, based solely on the energy produced by himself. This system is not connected to the grid and is used in places where it is impossible to supply electricity network cabling. The aim of this study was to determine efficiency of autonomous photovoltaic system off-grid in the Lublin province during winter/spring conditions. This period was chosen because of the most unfavora-

ble conditions of sunlight. The tests were conducted in a specially designed measuring system, located on the Lublin University of Technology campus, including a photovoltaic module with a capacity of 100 Wp, charge controller, storage of electricity 12V with capacity 33 Ah and load. The results of tests are shown in graphs of power versus time for the selected load. The tension and intensity of the system load, value of energy produced by the PV cell for each day, the time of charging and discharging the battery - depending on the size of the connected load - and atmospheric conditions were examined. The results show that the level of energy produced by photovoltaic cells depends on weather conditions, location of the photovoltaic cells and the angle of the sun, as well as the size of the system load. The results have confirmed that fixing off-grid installations in the Lublin Province is effective, even in the most adverse weather conditions.

**Keywords:** off -grid system, autonomous system, photovolatics, solar energy, renewable energy.

DOI:10.7862/rb.2014.98

*Przesłano do redakcji: 27.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Zofia LUBAŃSKA<sup>1</sup>  
Tomasz GRUDNIEWSKI<sup>2</sup>

## ANALIZA WŁAŚCIWOŚCI STRUKTUR OTRZYMANYCH W PROCESIE NANOSZENIA WARSTW METODĄ SPUTTERINGU MAGNETRONOWEGO Z WYKORZYSTANIEM TARGETÓW O MODYFIKOWANYM SKŁADZIE

Wykorzystanie sputteringu jako metody nanoszenia cienkich warstw materiałów wykorzystywanych w produkcji paneli fotowoltaicznych jest powszechnie znane. W sferze eksperymentalnej częstym problemem pozostaje ekonomiczne źródło pozyskiwania targetów o modyfikowanym składzie (wieloskładnikowych) – szczególnie targetów niezbędnych do wykonania pojedynczych eksperymentów. Szczególnie problem ten jest dotkliwy w urządzeniach wykorzystujących targety o dużych rozmiarach, takich jak Line 440 firmy Alliance Concept. Rozmiar targetu w Line 440 to 38 x 13 cm i sporadycznie używana jest powierzchnia całego targetu. Uwarunkowania techniczne umieszczania targetów (w urządzeniach w konfiguracji odwróconej, gdzie target znajduje się nad napyłaną próbką), koncepcji ich wytwarzania, statystyk dystrybucji materiału oraz wprowadzania niepożądanych pierwiastków zanieczyszczeń, wymagała opracowania i przygotowania oddzielnego, poświęconego tylko tej tematyce procesu badawczego. Ważne jest, że konfiguracja odwrócona magnetronu, uniemożliwia zastosowanie dodatków w postaci np. sprasowanych tabletek z materiałem. Należy nadmienić, że próba stworzenia własnych targetów do pojedynczych napyleń była rzeczą priorytetową w przedstawionych badaniach. Przeanalizowano możliwość zastosowania siatki jako elementu umożliwiającego wybijanie dodatkowego pierwiastka znajdującego się pod stworzonym targetem wieloskładnikowym. W niniejszej pracy został zawarty opis prób polegających na wytworzeniu własnych targetów wieloskładnikowych oraz metod ich montażu. Dodatkowo wykonano szczegółową analizę składu napyłonych powłok, przeanalizowano możliwość mieszania się składników pochodzących z targetu w wytworzonej cienkiej warstwie oraz dystrybucję pierwiastków targetu w obrębie komory magnetronu.

**Słowa kluczowe:** napylenie, cienkie warstwy, fotowoltaika, ogniwa fotowoltaiczne

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Zofia Lubańska, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Biała Podlaska 21-500, ul. Sidorska 95/97, +48 83 344 99 00 w. 255, z.lubanska@dydaktyka.pswbp.pl

<sup>2</sup> Tomasz Grudniewski, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Biała Podlaska 21-500, ul. Sidorska 95/97, +48 83 344 99 00 w.908, gisbourne2@gmail.com

## 1. Wstęp

Wytwarzanie fotowoltaicznych ogniw cienkowarstwowych jest jedną z najbardziej obiecujących technik ze względu na własności otrzymywanych warstw oraz koszty procesu produkcyjnego. Jedną z metod uzyskiwania warstw cienkich jest sputtering magnetronowy [1-3]. Technika ta polega na wybijaniu atomów targetu i nanoszeniu ich na przygotowane podłoża. Nie jest jednak możliwe modyfikowanie składu w trakcie procesu. Pojawiają się zatem niedogodności polegające na ograniczeniu procesu do otrzymywania pojedynczych warstw mono-materiałowych zbudowanych wyłącznie z posiadanych targetów. Modyfikacja własności otrzymywanych warstw jest możliwa jedynie poprzez zmianę czynników związanych z procesem napyłania, takich jak: temperatura, rodzaj gazu i czas [4,5].

Opracowanie metody umożliwiającej mieszanie składników z posiadanych targetów na potrzeby badawcze było niezbędne. Możliwy jest oczywiście zakup wskazanych składnikowo targetów, lecz niepewność rezultatów naraża na duże koszty budżet jednostek badawczych. W przypadku targetów 38x13 cm jest to koszt zaczynający się od 20 000 zł. Warto zatem zainteresować się przygotowaniem targetów o zadanym składzie do pojedynczych eksperymentów. W prezentowanej pracy zdecydowano się na metodę modyfikacji własności otrzymywanych struktur poprzez mieszanie materiałów i budowanie nowych własnych targetów [4,5]. Proces ten wydaje się stosunkowo prosty w urządzeniach posiadających tagrety w taki sposób, że możliwe jest umieszczenie na nich np. sproszkowanych materiałów (proces oddolny). Trudność pojawia się dopiero wtedy, gdy targety umieszczone są nad próbką (proces odgórny), co uniemożliwia zastosowanie dodatków w formie sypkiej czy sprasowanych tabletek [6]. By rozwiązać ten problem i rozszerzyć możliwości zastosowań posiadanego przez Państwową Szkołę Wyższą w Białej Podlaskiej magnetronu Line 440 Alliance Concept zdecydowano się na serię eksperymentów prowadzących do sprawdzenia możliwości uzyskania targetów wieloskładnikowych w urządzeniu pracującym w trybie odgórnym. Postanowiono zgłębić temat wykonania, modyfikacji, jakości i składu otrzymywanych warstw w targetach wieloskładnikowych własnej produkcji.

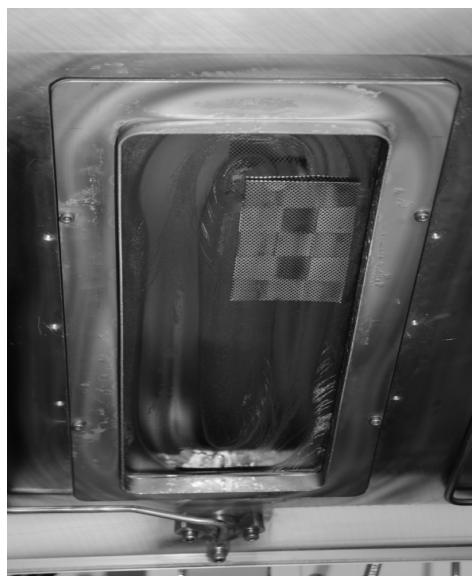
Autorzy w prezentowanej pracy postanowili w oparciu o posiadane targety stworzyć źródła wieloskładnikowe. Zbadano również własności warstw otrzymanych w procesie sputteringu magnetronowego, naniesionych z targetów własnej produkcji.

## 2. Eksperyment

Eksperymenty wykonano stosując Magnetron Line 440 Alliance Concept wyposażony w targety: Si, In, Sn, Cu. Magnetron stanowi element wyposażenia laboratorium Centrum Badań nad Innowacjami przy Państwowej Szkole Wyż-

szej w Białej Podlaskiej. Analizowane warstwy były nanoszone na podłoża szklane (Microscope slides LABGLASS). Pomiarów składu warstwy wykonano mikroskopem SEM (Hitachi T3000) wyposażonym w mikrosondę Swift ED 3000.

Jak wspomniano wcześniej, odgórny tryb pracy posiadanego urządzenia uniemożliwia zastosowanie targetów w postaci tabletek lub proszków. Konieczne było zatem zastosowanie elementu mocującego – zarazem nośnika targetu wieloskładnikowego. Ze względu na konstrukcję magnetronu, a konkretnie wbudowane weń magnesy zdecydowano się na siatkę stalową (Rys. 1), która była przyciągana do zamocowanego targetu z materiałem. Dodatkowymi atutami zastosowania siatki stalowej były własności samej siatki takie jak: spodziewana odporność na wybijanie atomów żelaza czy odporność na zmiany temperatury. Stwierdzono równocześnie, że zastosowanie siatki umożliwi wybijanie atomów targetu, do którego przymocowana jest siatka – co w rezultacie pozwala dodać jeden element do targetu wieloskładnikowego. Przy współczynniku wypełnienia zbliżonym do: 2/3 drut stalowy i 1/3 otwór w siatce, możliwe jest teoretycznie optymalne rozdzielanie ilości materiałów dla 3 składników (Rys. 1).



Rys.1. Zdjęcie siatki stalowej zamocowanej w Line 440

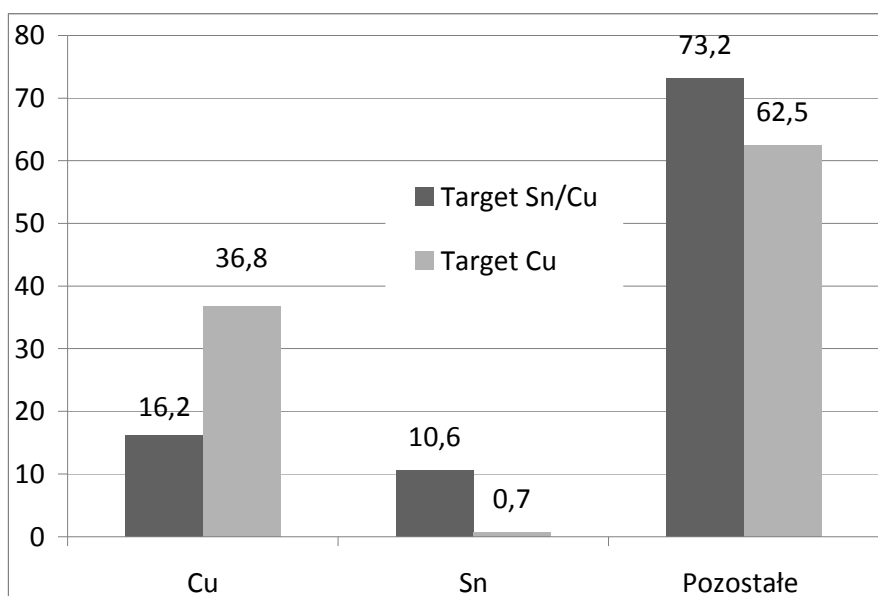
Fig.1. Photo of the steel mesh mounted in Line 440



### 3. Rezultaty badań

W ramach prowadzonych eksperymentów wykonano cztery próby napylenia, w celu porównania i wybrania najlepszych parametrów konfiguracji nowego targetu i zbadania możliwości zastosowań w praktyce.

W pierwszej próbie na stalową siatkę napyłono cynę (czas 1 minuta, moc 600 W DC, gaz roboczy - argon), następnie siatkę przymocowano do targetu z miedzią. Ułożono dwie płytki szklane: główną oraz referencyjną. Pierwszą pod siatką z napyłoną cyną, a drugą obok siatki (celem obserwacji migracji i oszacowania ilości wybijanych atomów z siatki). W eksperymentach zdecydowano się na umieszczanie płytki referencyjnej w maksymalnie skrajnym obszarze pracy manetronu - tak aby wyeliminować atomy pochodzące z targetu wytworzonego. Wykonano napylenie miedzią (czas 1 minuta, moc 600 W DC, gaz roboczy - argon). W wyniku pracy urządzenia oraz wybijania atomów metali na podłoże szklane nanoszone były zarówno atomy miedzi jak i cyny. Atomy miedzi były przesiewane przez oczka siatki, z której wybite były dodatkowo atomy cyny. Zaobserwowano, że zamocowana siatka nie wpływała na utrzymanie oraz nie zaburzała w sposób widoczny procesu powstawania plazmy. Po wykonanym procesie napylenia zbadano skład próbek rezultaty zamieszczono na Rys. 2.

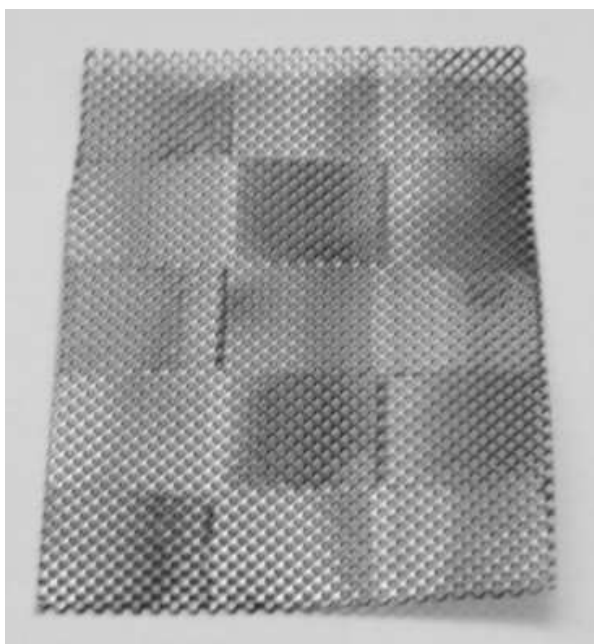


Rys. 2. Składy warstw napylnych w pierwszym eksperymencie [%]

Fig. 2 The composition of the layers sputtered in the first experiment [%]

Porównując składy próbek z naniesionymi warstwami do czystego szkła, można zaobserwować kilkunastoprocentowy udział miedzi i cyny. W próbce, która nie była umieszczona pod zmodyfikowanym targetem ilość miedzi znacząco się zwiększyła, a śladowe ilości cyny (0,7 %) to prawdopodobny rezultat migracji atomów tego pierwiastka w obszarze komory magnetronu w trakcie procesu. Na duży udział pozostałych składników (niepożądanych – żelazo z siatki, zanieczyszczenia) miał (jak sprawdzono w późniejszych eksperymentach) czas napylenia kolejnych pierwiastków. Ilość pierwiastków niepożądanych malała ilościowo w stosunku do składników targetu do 20% przy czasie napylenia równym około 15 minut.

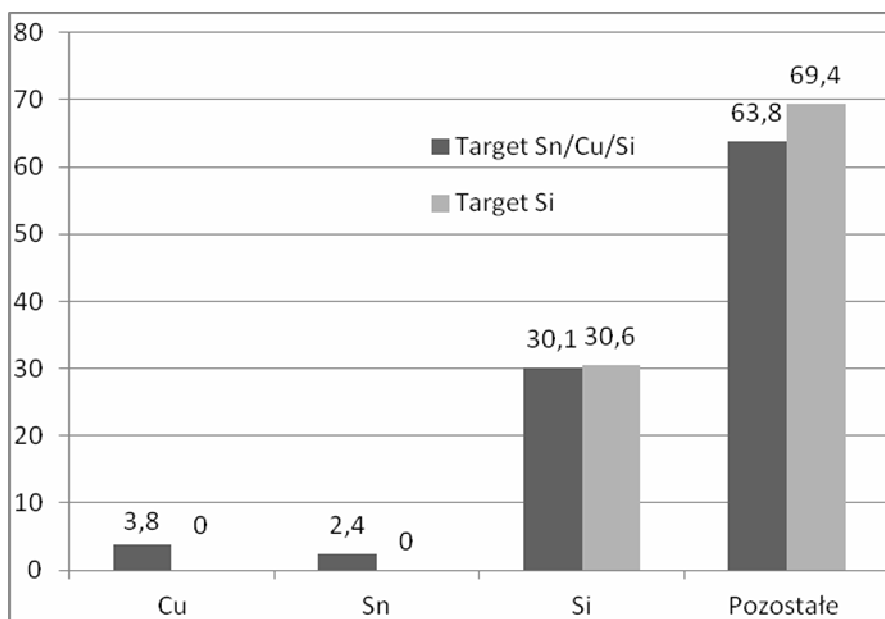
Druga próba wykonana była w celu zbadania możliwości wytworzenia targetu trójskładnikowego. Dwa składniki: Cu (czas napylenia 3 minuty, moc 600 W DC, gaz roboczy – argon), Sn (czas napylenia 3 minuty, moc 600 W DC, gaz roboczy – argon) napyłono na siatkę z wykorzystaniem maski o współczynniku wypełnienia 50 %. Najpierw naniesiono miedź (stosując przysłonę), a następnie cynę (stosując negatyw przysłony). W wyniku tego procesu otrzymano target dwuskładnikowy (Rys. 3). Trzecim składnikiem źródła materiałów miał być target właściwy, do którego przymocowana była siatka, a którego atomy były wybijane przez oczka siatki. Ze względu na dostępność zdecydowano się na target krzemowy typu n.



Rys. 3. Siatka stalowa z napyłonymi dwoma składnikami: Sn i Cu

Fig. 3. Used steel mesh with two components: Sn and Cu

Stworzony target (siatkę) umieszczono pod targetem Si, zamocowanym w magnetronie Line 440. Podobnie jak w pierwszym eksperymencie posłużono się dwoma szklanymi płytkami. Docelową i referencyjną. Jedną umieszczono pod stworzonym targetem (siatką) a drugą obok siatki. W procesie napylenia wybijane były atomy z uzyskanego targetu (Cu-Sn) w połączeniu z atomami Si, które były przesiewane przez oczka siatki (czas napylenia 3 minuty, moc 800 W RF, gaz roboczy – argon). Po wykonanym procesie napylenia zbadano skład próbek. Rezultaty zamieszczono na Rys. 4.



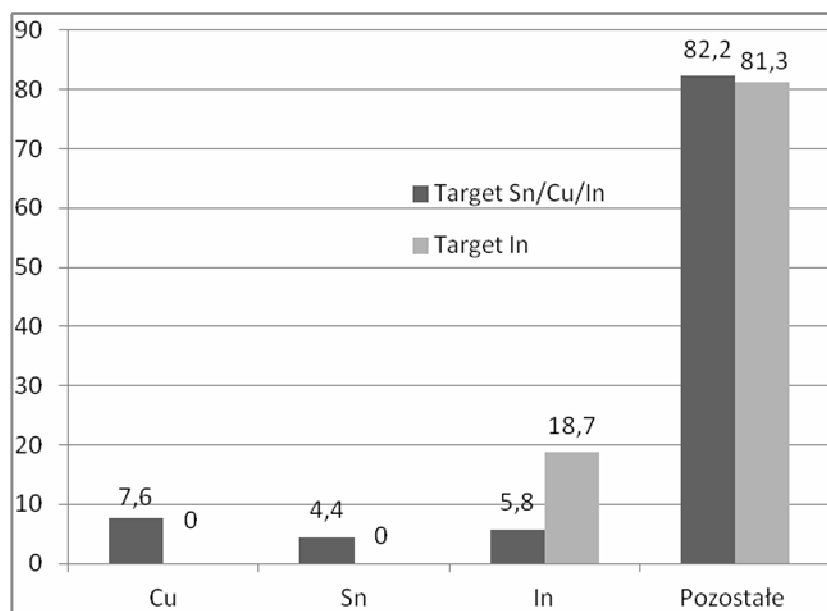
Rys. 4. Składy warstw napylnych w drugim eksperymencie [%]

Fig.4. The composition of sputtered layers in the second experiment [%]

Porównując składy próbek z naniesionymi warstwami do czystego szkła, można zaobserwować kilkuprocentowy udział miedzi, cyny i krzemu. W próbce, która nie była umieszczona pod zmodyfikowanym targetem zaobserwowano jedynie krzem. Jak wspomniano powyżej, w odróżnieniu od targetów metalicznych w przypadku krzemu zastosowano sterowanie generatorem RF (generator wykorzystywany w procesie napylenia krzemu). Zdecydowano się powtórzyć testy z targetem trójskładnikowym z tym, że krzem zastąpiono łatwym do napylenia indem (z zastosowaniem generatora DC).

Identycznie przygotowany target dwuskładnikowy Cu-Sn (siatkę) umieszczono pod targetem In. W analogiczny sposób - jak poprzednio - ułożono dwie szklane płytki, jedną pod siatką drugą obok (czas napylenia 1 minuta, moc 600 W DC, gaz roboczy – argon). Tym razem wybijane atomy indu miały mieszać

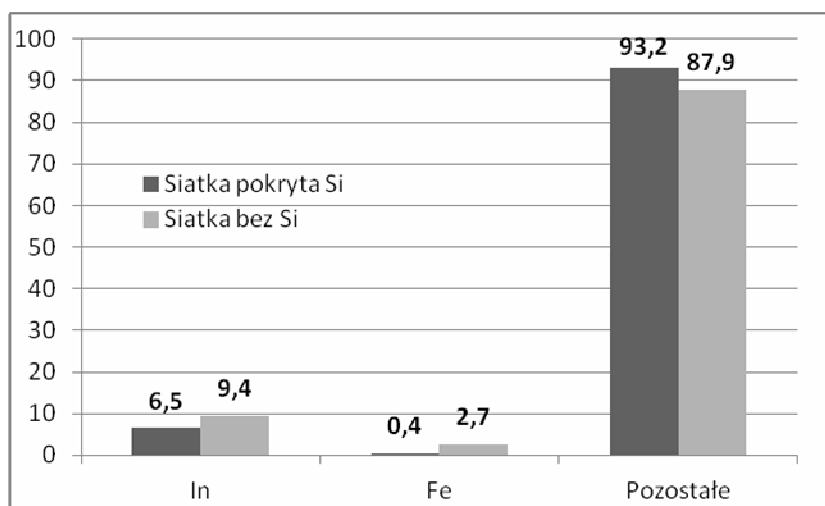
się z atomami miedzi i cyny. Po wykonanym procesie napylenia zbadano skład próbek. Rezultaty zamieszczono na Rys. 5.



Rys. 5. Składy warstw napylnych w trzecim eksperymencie [%].

Fig. 5. The composition of sputtered layers in the third experiment [%].

W trakcie kolejnych eksperymentów zaobserwowano pojawianie się atomów żelaza w napyłonej warstwie. Jedynym źródłem tego pierwiastka mogła być siatka (nośnik targetu). Postanowiono zbadać, jaki wpływ wnosi siatka do eksperymentu oraz czy istnieją możliwości wyeliminowania atomów żelaza z procesu nanoszenia warstw. Zaobserwowano, że pełne pokrycie siatki poprzez napylenie na nią targety jest bardzo trudne, co więcej czas rozpylania materiałów jest różny. Różnice w czasie mogą powodować występowanie artefaktów w warstwach materiałów na siatce i tym samym ułatwiać migrację atomów żelaza. W związku z relatywnie bardziej wymagającym procesem napylenia krzemu, zdecydowano się na eksperyment polegający na naniesieniu targetu na siatkę stalową pokrytą krzemem. Dodatkowo proces naniesienia krzemu wykonano w wysokiej temperaturze (350 stopni). Rezultaty prac zawarto na Rys. 6. Czas napylenia 1 minuta, moc 600 W DC, gaz roboczy – argon.



Rys. 6. Ilość żelaza i indu w procesie napyłania przez stalową siatkę [%].

Fig. 6. The amount of iron and indium in the sputtering process thru the steel mesh [%]

#### 4. Wnioski

Przeprowadzone badania pokazały, że istnieje sprawna i ekonomicznie opłacalna metoda wytwarzania targetów wieloskładnikowych na potrzeby pojedynczych eksperymentów inżynierii materiałowej. Procentowy udział składników napyłanych na podłoża umieszczane pod targetem był uzależniony od własności nanoszonych materiałów, czasu i umiejscowienia próbki pod targetem. Zaobserwowanym podczas eksperymentów problemem był nośnik targetu. Zastosowanie materiałów, z których może być wykonany nośnik ograniczają własności samego urządzenia. Konieczność izolacji targetu od obudowy ogranicza możliwości mocowania, a zastosowanie innych technik niż przyciąganie (przyklejanie, przykręcanie) nie zdało egzaminu.

Zastosowanie nośnika w postaci siatki stalowej umożliwiło zwiększenie palety zastosowań, gdyż otwory w siatce pozwoliły na dodanie jednego składnika więcej. Napotkanym problemem okazała się migracja (wybijanie) atomów żelaza z siatki. Na obecnym stanie eksperymentów stwierdzono, że pokrycie siatki materiałem trudnym do napylenia (w badanym przypadku krzem), nie zmienia własności targetu a skutecznie obniża ilość atomów żelaza w naniesionej warstwie. Alternatywną metodą może być zwiększenie ilości materiałów targetu naniesionych na siatkę.

## Literatura

- [1] Dimitrova V. i in.: Aluminium nitride thin films deposited by DC reactive magnetron sputtering. *Vacuum*, 51(1998).
- [2] Manova D. i in.: Investigation of D.C.-reactive magnetron-sputtered AlN thin films by electron microprobe analysis, X-ray photoelectron spectroscopy and polarised infra-red reflection. *Surf.Coat.Techn.*, 106(1998).
- [3] Mars K., Technologia magnetronowa do przemysłowego otrzymywania powłok wielowarstwowych na szkło płaskim, *Elektronika: konstrukcje, technologie i zastosowania* 11, (2011).
- [4] R. Brüggemann, A. Hierzenberger, P. Reinig *et al.* Electronical and optical properties of hotwire deposited microcrystalline silicon, *J. Non-Cryst. Solids*, 227–230 (1998).
- [5] Posadowski W.M., Wiatrowski A., Tadaszak K., Gruszka M., Zdunek K., Wpływ parametrów pracy magnetronu na warunki nanoszenia cienki warstw podczas procesu rozpylania, *Elektronika: konstrukcje, technologie i zastosowania* 11, (2011).
- [6] Musil J., Baroch P., Vlcek J., Nam K.H., Han J.G.: Reactive magnetron sputtering of thin films: present and trends, *Thin Solid Films*, vol. 475 (2005).

## ANALYSIS OF THE LAYERS PROPERTIES OBTAINED IN THE MAGNETRON SPUTTERING PROCESS USING A TARGETS WITH MODIFIED COMPOSITION

### Summary

The magnetron sputtering method is well known as a technique for thin layers preparation. Obtained photosensitive thin layers can find usage in many fields of electronic and photovoltaic technology. Mainly prepared experiments are based on material targets provided by specialized manufacturers – with defined composition. Size of the targets define costs of its purchase specially when experiments do not provide usage of the prepared target more then once. This problem is important with devices equipped by large size targets - such as Alliance Concept Line 440 (38 x 13 cm target size). The common difficulty in experimental applications is a method of preparation of the targets with modified composition - specially multi-component ones. The technical specifications for targets (in used by presented experiments up-right magnetron construction), the concept of its preparation (compressed tablets, sputtered structures), material distribution statistics (aperture, mouting method), impurity elements – creates very interesting issue in own targets preparation and obtained layers analysis. Attempt to create targets for individual layer composition in Line 440, seemed very desirable thing and it was a priority in the presented research. In the present work has been included description of the prepared tests involving the creation of their own multiple targets and obtained structures analysis.

**Keywords:** layer creation, thin layers, photovoltaic

DOI:10.7862/rb.2014.99

*Przesłano do redakcji: 25.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*



Michał MARCHACZ<sup>1</sup>  
Leszek DULAK<sup>2</sup>

## BADANIA AKUSTYCZNE WNETRZA ZABYTKOWEGO KOŚCIOŁA PW. WSZYSTKICH ŚWIĘTYCH W SIEROTACH

Praca przedstawia badania akustyczne przeprowadzone w zabytkowym kościele pw. Wszystkich Świętych zlokalizowanym w powiecie gliwickim, w miejscowości Sieroty. Pierwsze ślady bytności kościoła datowane są na początek XIII wieku. Na przestrzeni wieków kościół był wielokrotnie przebudowywany. Konstrukcja obiektu w obecnym kształcie ma charakter mieszany. Część zawierająca prezbiterium jest murowana. Nawa główna oraz chór z wieżą (zawierającą przedsionek i wejście) są drewniane. Wieżę dobudowano do istniejącej części kościoła w drugiej połowie XVIII wieku. Jednym z obszarów prac prowadzonych na obiekcie była ocena jakości akustycznej wnętrza obiektu. W tym celu przeprowadzono pomiary czasu pogłosu wewnątrz kościoła. Czas pogłosu jest podstawowym parametrem służącym do oceny danego wnętrza pod kątem jego akustyki. Badania wykonano przy pomocy metody tzw. zanikowej z wykorzystaniem widma szumu różowego. Sprzęt pomiarowy składał się z części nadawczej w postaci generatora dźwięku i kuli głośnikowej. Część odbiorczą stanowił zestaw mikrofonów wraz miernikiem poziomym dźwięku. W oparciu o uzyskane krzywe zaniku czasu pogłosu oraz metodologię normową wyznaczono charakterystyki czasu pogłosu w funkcji częstotliwości dla poszczególnych punktów pomiarowych. Następnie wyniki uśredniono. Uzyskany w ten sposób średni czas pogłosu badanego wnętrza posłużył do jego oceny pod kątem akustyki. Powyższe badania wpisują się w szereg działań prowadzonych przez Katedrę Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli w różnych obiektach o charakterze zabytkowym, dotyczących problemów utrzymania i użytkowania tego typu obiektów.

**Słowa kluczowe:** zabytkowy kościół, akustyka wnętrz, czas pogłosu, badania czasu pogłosu

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Michał Marchacz, Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej, ul. Akademicka 5, 44-105, Gliwice, 322372288, [michal.marchacz@polsl.pl](mailto:michal.marchacz@polsl.pl).

<sup>2</sup> Leszek Dulak, Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej, ul. Akademicka 5, 44-105, Gliwice, 322372288, [leszek.dulak@polsl.pl](mailto:leszek.dulak@polsl.pl).



## 1. Wstęp

Pierwsze wzmianki historyczne o kościele pw. Wszystkich Świętych w Sierotach (Śląskie, powiat gliwicki) datują się na początek XIII wieku. Na przestrzeni czasu ulegała zmianie pierwotna forma obiektu. Kościół w obecnej formie (rys.1) złożony jest z części murowanej oraz drewnianej wieży powstałej w 1770 roku. Cechą charakterystyczną wnętrza kościoła są zachowane, zabytkowe polichromie pokrywające ściany kościoła [1,2]. Obiekt znajduje się na szlaku architektury drewnianej województwa śląskiego.

Powyższy kościół w związku ze swoją wartością historyczną, jest jednym z obiektów objętych szeregiem działań mających na celu diagnostykę stanu istniejącego, próbę wskazania możliwych dróg dalszej ochrony oraz użytkowania tego typu obiektów.

Konstrukcja kościoła jest mieszana. W obecnej formie prezbiterium posiada ściany murowane. Dotyczy to również przestrzeni nad prezbiterium i częściowo pomieszczenia znajdującego się po lewej stronie prezbiterium patrząc od wejścia. Najprawdopodobniej pomieszczenie to pełniło rolę pomieszczenia o charakterze podobnym do tzw. babińca. Konstrukcja ścian nawy głównej oraz wieży i dachu jest drewniana. Wieża dzwonnicy znajdująca się w obszarze głównego wejścia do kościoła zawiera w swojej konstrukcji wydzielony przedśrodek wraz z wejściem na chór. Chór wypuszczony jest nieznacznie w przestrzeń nawy głównej. Drewniana jest również konstrukcja stropu przekrywającego nawę główną. Nawa główna charakteryzuje się wymiarami ok. 9,5 m na 10m. Natomiast prezbiterium zawiera się w przestrzeni około 6m na 8m.



Rys. 1. Kościół pw. Wszystkich Świętych w Sierotach

Fig. 1. Church of All Saint in Sieroty

Opisane w artykule badania zrealizowane zostały w ramach prowadzonego przez Katedrę Budownictwa Ogólnego i Fizyki Budowli Politechniki Śląskiej seminarium wewnętrznego oraz wydawnictwa Spotkanie z Zabytkiem. Pierwszy etap podjętych działań jest związany z potrzebą wielokierunkowego zdiagnozowania stanu istniejącego obiektu. Jednym z elementów zrealizowanych działań jest określenie parametrów akustycznych wnętrza kościoła. W ramach przeprowadzonych badań wykonano pomiar czasu pogłosu wnętrza nawy głównej kościoła z uwzględnieniem elementów miękkich pokryć ław kościelnych oraz po ich demontażu. Pomiar przeprowadzono 30 października 2013 roku. Wykonane badania stanowiły podstawę do dalszego opracowania uzyskanych wyników. Na poniższych fotografiach (rys.2) pokazano widok ogólny wnętrza nawy głównej kościoła wraz z umiejscowieniem niektórych punktów pomiarowych.

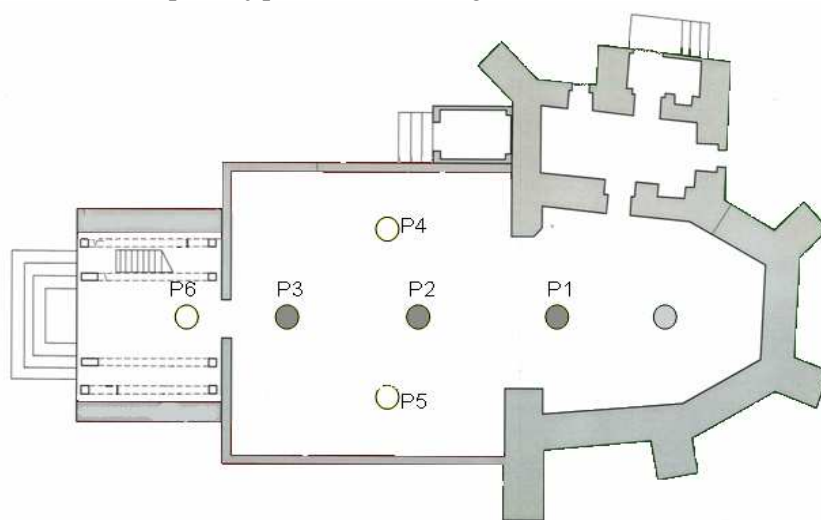


Rys. 2. Widok wnętrza nawy głównej kościoła w Sierotach  
Fig. 2 Main nave of church in Sieroty

## 2. Metodyka prowadzonych pomiarów i obliczeń

Badania przeprowadzono zgodnie z metodologią zawartą w normie PN-EN ISO 3382-2:2010 [3] oraz w oparciu o ogólne wytyczne zawarte w [4]. Pomiar wykonano przy użyciu metody szumu przerywanego. Zestaw badawczy składał się z kuli głośnikowej wraz z generatorem oraz zestawu odbiorczego w postaci miernika poziomu dźwięku Svan 958 wraz z osprzętem. Źródło wytwarzało poziom ciśnienia akustycznego wystarczający do tego, aby krzywa zaniku rozpoczynała się przynajmniej 35 dB powyżej tła akustycznego w odpowiednim zakresie częstotliwości. Źródło dźwięku umiejscowiono bezpośrednio przed ołtarzem. Przyjęto dla każdego z wariantów pomiarowych 6 pozycji umiejscowienia punktów odbioru w postaci mikrofonów. W każdej z niezależnych pozycji

pomiarowych wykonano po 6 powtórzeń pomiaru w celu zminimalizowania wpływu losowości sygnału pobudzającego. Schemat pomieszczenia wraz ze sposobem ustawienia źródła dźwięku i mikrofonów pokazano na rys.3 (opracowany w oparciu o [5,6]). Należy zaznaczyć, że zarówno umiejscowienie punktów pomiarowych jak i źródła dźwięku zostało dobrane w taki sposób aby zachować odpowiednie minimalne odległości zarówno od powierzchni odbijających jak i odległości punktów pomiarowych od samego źródła dźwięku. W celu oceny parametrów pogłosowych pomieszczenia wyznaczono czas pogłosu  $T_{20}$ . W tym celu ocenie poddano zakres każdej z krzywych zaniku w zakresie od 5 dB do 25 dB poniżej poziomu ustalonego.

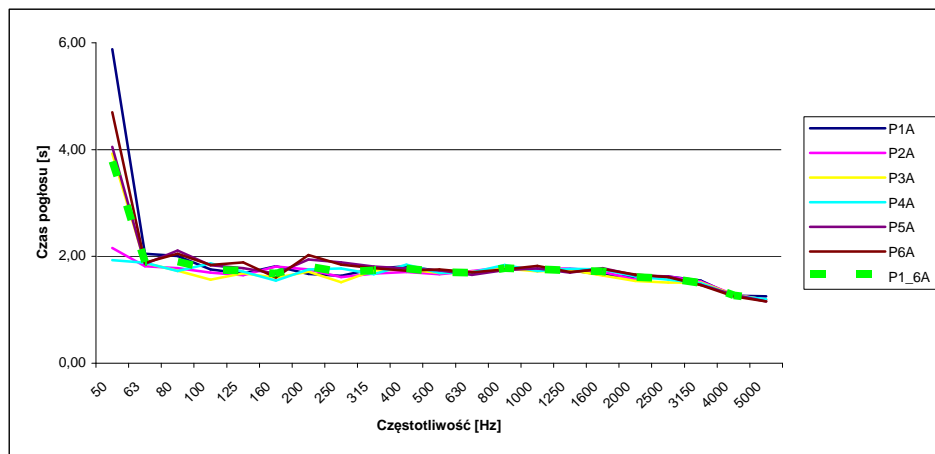


Rys. 3. Schematyczne przedstawienie lokalizacji punktów pomiarowych oraz źródła dźwięku

Fig. 3. Scheme of measurement points and source of sound

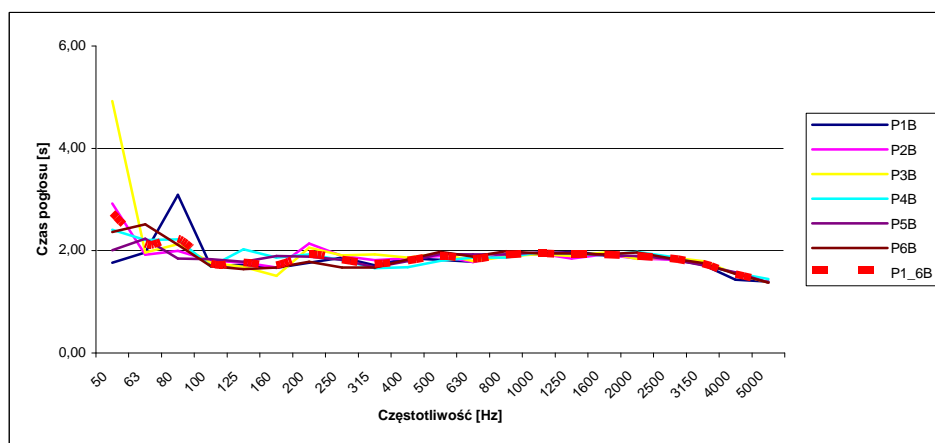
### 3. Wyniki pomiarów i podsumowanie

W tabelicy 1 zamieszczono wyniki pomiarów czasu pogłosu  $T_{20}$  dla wnętrza nawy głównej rozpatrywanego kościoła odpowiednio przed (sytuacje P1A – P6A) i po wykonaniu demontażu miękkich poszyc łąw (sytuacje P1B – P6B) odpowiednio dla 6 punktów pomiarowych w każdej sytuacji pomiarowej oraz uśrednienie dla obu przypadków. Poniższe wyniki celem zobrazowania pokazano w formie wykresu na rys.4 i rys.5. Na rys.6 zestawiono uśrednione wartości czasu pogłosu  $T_{20}$  dla obu sytuacji pomiarowych.



Rys. 4. Wyniki pomiarów czasu pogłosu  $T_{20}$  dla 6 punktów pomiarowych przed usunięciem pokryć ław kościelnych (P1A do P6A gdzie P1\_6A - uśredniony czas pogłosu)

Fig. 4. Results of measurements of reverberation time  $T_{20}$  for 6 measurement points before remove soft pillows out of church benches (P1A to P6A were P1\_6A – average reverberation time)



Rys. 5. Wyniki pomiarów czasu pogłosu  $T_{20}$  dla 6 punktów pomiarowych po usunięciu pokryć ław kościelnych (P1B do P6B gdzie P1\_6B - uśredniony czas pogłosu)

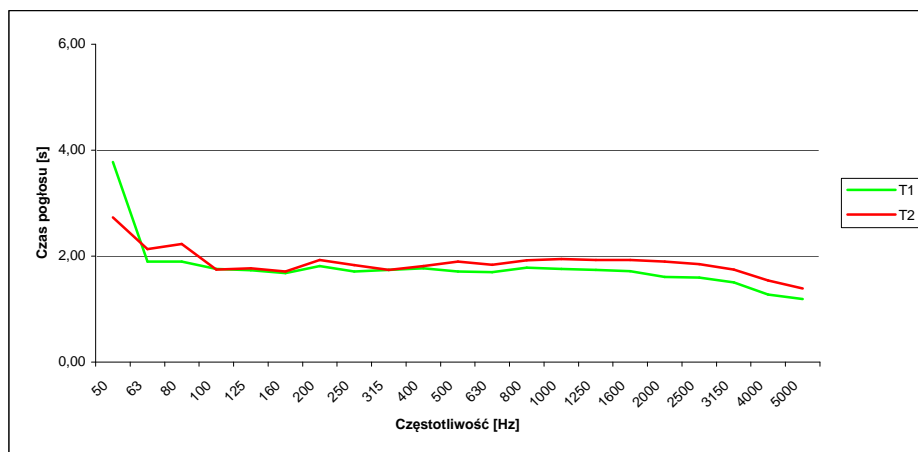
Fig. 5. Results of measurements of reverberation time  $T_{20}$  for 6 measurement points after remove soft pillows out of church benches (P1B to P6B were P1\_6B – average reverberation time)

Tabela (tablica) 1. Wyniki pomiarów czasu pogłosu  $T_{20}$  dla 6 punktów pomiarowych przed usunięciem pokryć ław kościelnych (P1A – P6A) oraz po usunięciu pokryć (P1B – P6B), gdzie P1\_6A i P1\_6B- uśredniony czas pogłosu

Table 1. Results of measurements of reverberation time  $T_{20}$  for 6 measurement points before remove soft pillows out of church benches (P1A – P6A) and after (P1B – P6B) were P1\_6A and P1\_6B – average reverberation time

f	NR PUNKTU POMIAROWEGO												uśredniony $T_{20}$ [s]	
	[Hz]	P1A	P2A	P3A	P4A	P5A	P6A	P1B	P2B	P3B	P4B	P5B	P6B	P1_6A
50	5.88	2.15	3.92	1.93	4.05	4.70	1.77	2.92	4.92	2.41	2.01	2.37	3.77	2.73
63	2.05	1.82	1.88	1.88	1.86	1.88	1.96	1.92	1.96	2.21	2.23	2.52	1.89	2.13
80	2.01	1.78	1.73	1.73	2.11	2.05	3.09	2.00	2.13	2.22	1.85	2.11	1.90	2.23
100	1.75	1.70	1.56	1.87	1.83	1.84	1.69	1.80	1.76	1.69	1.83	1.70	1.76	1.75
125	1.68	1.65	1.68	1.71	1.78	1.89	1.73	1.77	1.69	2.03	1.78	1.64	1.73	1.77
160	1.82	1.81	1.60	1.54	1.68	1.61	1.67	1.67	1.51	1.87	1.89	1.67	1.68	1.71
200	1.67	1.76	1.71	1.76	1.94	2.02	1.76	2.14	2.06	1.93	1.88	1.78	1.81	1.93
250	1.64	1.61	1.52	1.77	1.89	1.84	1.86	1.89	1.91	1.81	1.82	1.67	1.71	1.83
315	1.77	1.68	1.74	1.67	1.81	1.78	1.71	1.81	1.93	1.66	1.68	1.67	1.74	1.74
400	1.82	1.71	1.76	1.85	1.77	1.73	1.85	1.85	1.86	1.68	1.79	1.83	1.77	1.81
500	1.73	1.67	1.69	1.69	1.74	1.75	1.82	1.89	1.95	1.80	1.93	1.98	1.71	1.90
630	1.69	1.73	1.71	1.70	1.66	1.70	1.78	1.78	1.79	1.86	1.93	1.88	1.70	1.84
800	1.77	1.80	1.77	1.84	1.74	1.76	1.93	1.93	1.88	1.86	1.93	1.99	1.78	1.92
1000	1.74	1.77	1.72	1.73	1.77	1.82	1.94	1.95	1.93	1.96	1.96	1.95	1.76	1.95
1250	1.74	1.78	1.75	1.77	1.70	1.71	1.98	1.84	1.90	1.94	1.96	1.95	1.74	1.93
1600	1.66	1.71	1.64	1.76	1.78	1.76	1.93	1.92	1.96	1.91	1.91	1.93	1.72	1.93
2000	1.61	1.57	1.54	1.62	1.65	1.66	1.86	1.84	1.84	1.97	1.90	1.96	1.61	1.90
2500	1.63	1.63	1.51	1.57	1.63	1.61	1.83	1.83	1.87	1.89	1.84	1.85	1.59	1.85
3150	1.55	1.53	1.51	1.50	1.47	1.46	1.73	1.76	1.80	1.73	1.72	1.76	1.50	1.75
4000	1.27	1.29	1.28	1.27	1.28	1.25	1.44	1.55	1.55	1.56	1.58	1.55	1.27	1.54
5000	1.25	1.18	1.19	1.20	1.16	1.16	1.40	1.38	1.38	1.44	1.38	1.38	1.19	1.39

Uzyskane wyniki zestawione w formie wykresów oraz tabelarycznej, wskazują na równomierny rozkład czasu pogłosu w funkcji częstotliwości praktycznie w całym zakresie rozpatrywanego widma dźwięku. Rozbieżności pomiarowe występujące w zakresie niskich częstotliwości, pomiędzy 50 Hz, a około 125 Hz, są cechą charakterystyczną tego typu pomiarów. Związane jest to zarówno ze zróżnicowaniem umiejscowienia punktów pomiarowych ale również większą długością fali akustycznej w zakresie niższych częstotliwości, co przekłada się na większy rozrzut uzyskiwanych wyników.



Rys. 6. Uśrednione wartości czasu pogłosu T20 w nawie głównej kościoła przed (T1) oraz po (T2) zdjęciu miękkich pokryć ław kościelnych odpis i objaśnienie rysunku w języku artykułu

Fig. 6. Average values of reverberation time T20 for main church nave before (T1) and after (T2) remove soft pillows out of church benches

Przedstawione wyniki pomiaru czasu pogłosu w funkcji częstotliwości (Rys.6) wskazują, zgodnie z oczekiwaniami, na wzrost wartości czasu pogłosu po zdjęciu miękkich pokryć ław kościelnych (sytuacja T2). Różnica ta dostrzegalna jest dla częstotliwości powyżej 250 Hz, jednak jest ona niewielka. Uśredniony z wszystkich punktów pomiarowych dla danej sytuacji pomiarowej czas pogłosu różni się pomiędzy sytuacjami pomiarowymi o 0,1s. Kubatura badanego wnętrza wynosi w przybliżeniu około 1000 m<sup>3</sup>. Dla sytuacji T1 z uwzględnieniem pokryć wartość ta wynosi 1,8s natomiast po zdjęciu pokryć, dla sytuacji T2 wzrasta do 1.9s.

#### 4. Wnioski

Uzyskane wartości czasów pogłosu wskazują na dobre parametry akustyczne wnętrza [7]. Uzyskany czas pogłosu może wskazywać zwłaszcza na przydatność w zakresie odsłuchu muzyki. Cecha określana jako „żywość” wnętrza wg Beranka [8] wskazuje, iż szczególnie nadaje się ono do odtwarzania muzyki o charakterze klasycznym, symfonicznym i barokowym gdzie optymalny czas pogłosu powinien kształtować się w przedziale 1,4 do 2s.

#### Literatura

- [1] W oparciu o materiały zgromadzone na <http://www.sieroty.hosting.deum.pl/> dostęp na dzień 29.04.2014.
- [2] Ernst Kloss, Herbert Rode, Wilhelm Steps, Hilde Eberle: Die Bau- und Kunstdenkmäler des Kreises Tost-Gleiwitz, wyd. Willh. Gottl. Korn Verlag Breslau.

- [3] PN-EN ISO 3382-2:2010 - „Akustyka - Pomiar parametrów akustycznych pomieszczeń - Część 2: Czas pogłosu w zwyczajnych pomieszczeniach”.
- [4] PN-87/B-02156 „Akustyka budowlana -- Metody pomiaru poziomu dźwięku A w budynkach”.
- [5] Kaczorowski S, Górczyński H: Projekt budowlany prac remontowo konserwatorskich polegających na wzmocnieniu izolacji fundamentów oraz wymianie wybranych drewnianych elementów konstrukcyjnych ścian i dachu kościoła pw. Wszystkich Świętych w Sierotach.
- [6] Żaba A. [red.]: Kościół parafialny pw. Wszystkich Świętych w Sierotach; Zabytek Roku 2014. Gliwice: Wydział Budownictwa Politechniki Śląskiej w Gliwicach (nieopublikowane opracowanie studentów profilu dyplomowania Eksploatacja Obiektów Budowlanych), 2014.
- [7] Mc Minn T. Development of an evaluation tool for use at the design stage of auditoria with respect to unassisted speech reinforcement. December 1996.
- [8] Kulowski A. Akustyka Sal. Gdańsk 2007.

## ACOUSTIC INVESTIGATIONS OF INTERIOR OF HISTORIC ALL SAINT CHURCH IN SIEROTY

### Summary

The paper presents acoustic researches in historic All Saints church localized in Gliwice country area, in Sieroty. First traces of All Saint church are dated on beginning of XIII century. Over the centuries, church was many times redevelopment. Construction of the church in current form is mixed. Chancel's part is build of brick. Main nave and choir with tower (contain vestibule and entrance) are wooden. Tower was added to existed part of the church in second part of XVIII century. One of the investigations areas in church was assessment of the acoustic quality of church's interior. In this aim measurements of reverberation time were made inside of the church. Reverberation time is a basic parameter served to acoustic evaluation of interior. Measurement was made by fade out sound method with using of pink noise spectrum. Measurement's equipment contain transmitting part includes sound generator and speaker (special sphere shape). Receiver part includes set of microphones and noise level meter. Base on reverberation time fading curve and standard methodology, characteristics of reverberation time depend on frequency was determined to each measurement point. Next, results were averaged. Obtain average reverberation time for investigated interior was used to acoustic evaluation of this interior. Program of investigations, make by chair of Building Engineering and building physics, includes in numbers of activities in different types of historical buildings concerning maintenance and utilization of these kind of buildings.

**Keywords:** historic church, interior acoustics, reverberation time, investigations of reverberation time

DOI:10.7862/rb.2014.100

*Przesłano do redakcji: 18.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Andrzej MARECKI<sup>1</sup>

## PROBLEMY FORMALNE, ARCHITEKTONICZNE I KONSTRUKCYJNE REMONTÓW ZABYTKOWYCH MIEJSKICH MOSTÓW DROGOWYCH

Sposób remontu zabytkowego miejskiego drogowego obiektu mostowego determinuje objęcie go ustawową ochroną w formie wpisu do rejestru zabytków, uznanie za pomnik historii, utworzenie parku kulturowego bądź ustalenie ochrony w miejscowym planie zagospodarowania. Obiekt chroniony w wyżej wymieniony sposób objęty jest obowiązkową opieką konserwatora zabytków i podlega przepisom związanym z ochroną dziedzictwa narodowego. Należy podkreślić, że oczekiwanym efektem remontu miejskiego mostu drogowego jest ponowne integralne włączenie obiektu w strukturę układu drogowego i transportowego aglomeracji miejskiej. Zabieg ten wymaga przeprowadzenia prac budowlano-konstrukcyjnych spełniających zarówno wymogi ustawy o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami jak i w rozporządzeniu o warunkach technicznych jakim powinny odpowiadać drogowe obiekty inżynierskie i ich usytuowanie, a projekt powinien być opracowany z zasadami określonymi w normach europejskich. Charakterystyczna jest szczególna wrażliwość realizacyjnych planowanych działań remontowych na czynniki pozatechniczne, przypadkowe odkrycia o znaczeniu historycznym, którym ustawodawca zagwarantował specjalny tryb postępowania. Dlatego planując remont zabytkowego mostu należy poprzedzić go szczegółowym rozpoznaniem Racjonalne wyeksponowanie i wykorzystanie atrakcyjnych cech budowlanego produktu finalnego, wynikających z jego wartości historyczno-zabytkowych, wymaga uwzględnienia w procesie projektowo-budowlanym trzech podstawowych elementów: substancji materialnej (kubaturowej), wartości historycznej oraz funkcji użytkowej. Pogodzenie wymogów konserwatorskich i współczesnych warunków stanów granicznych i użytkowania, wymaga racjonalnego *consensusu* pomiędzy stronami inwestycyjnego procesu remontowego. W artykule omówiono zasady takiego działania oraz podano przykład realizacji remontu zabytkowego miejskiego mostu drogowego na przykładzie remontu wiaduktu im. S. Markiewicza w Warszawie.

**Słowa kluczowe:** mostownictwo, konserwacja zabytków, infrastruktura drogowa

---

<sup>1</sup> Andrzej Marecki, WIL PW, Al. Armii Ludowej 16, 00-637 Warszawa, 510 205 934, a.marecki@il.pw.edu.pl



## **1. Most jako zabytek**

### **1.1. Uwagi ogólne**

Formalnie zgodnie z ustawą o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami [1](art. 3 pkt. 1), zabytkiem jest nieruchomość lub rzecz ruchomą, ich części lub zespoły, będące dziełem człowieka lub związane z jego działalnością i stanowiące świadectwo minionej epoki bądź zdarzenia, których zachowanie leży w interesie społecznym ze względu na posiadaną wartość historyczną, artystyczną lub naukową.

Zabytkowe budynki mieszkalne i obiekty użyteczności publicznej (w tym również mosty) to obiekty budowlane objęte ochroną. Zgodnie z Ustawą [1] (art. 7) w Polsce występują cztery formy ochrony zabytków: wpis do rejestru zabytków, uznanie za pomnik historii, utworzenie parku kulturowego, ustalenie ochrony w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego albo w decyzji o ustaleniu lokalizacji celu publicznego.

Podstawą wpisu do rejestrów zabytków jest decyzja Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków, wydana z urzędu, na wniosek właściciela zabytku nieruchomego lub użytkownika wieczystego gruntu, na którym znajduje się zabytek nieruchomy. Most objęty ustawową ochroną jest zaliczany do tzw. grupy zabytków nieruchomych. Na terenie Polski, istnieją 132 mosty /wiadukty i kładki/, w tym 16 we Wrocławiu, które są wpisane do rejestru zabytków [2].

### **1.2. Remont zabytkowego obiektu mostowego - problemy formalne i konstrukcyjne**

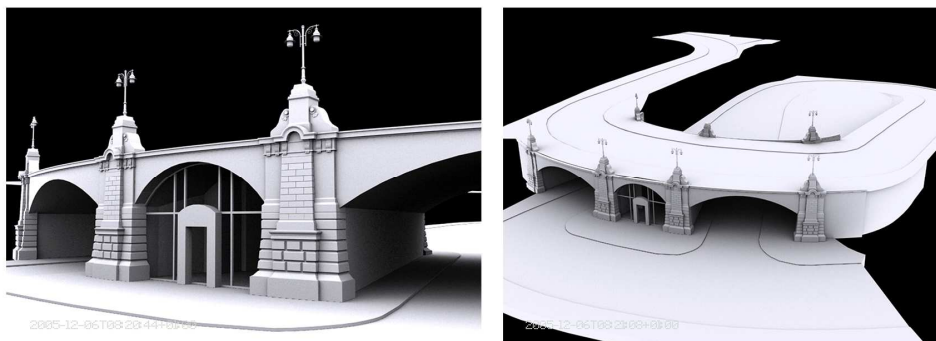
W przypadku działań inwestycyjnych, których przedmiotem są mosty zabytkowe wszelkie działania muszą być uzgodnione z Urzędem Konserwatora Zabytków i muszą być zgodne z obowiązującymi w tym zakresie przepisami zarówno w zakresie dozwolonych ingerencji w substancję zabytkową, jak i sposób prowadzenia robót budowlanych, ich nadzoru oraz odbioru.

W stosunku do remontów i modernizacji obiektów mostowych nie objętych ochroną, akceptowalnym produktem projektu naprawy jest budowla tożsama pierwowzorowi tak architektonicznie, jak i materiałowo. Dopuszczalne są w miarę dyskretne zmiany konstrukcyjne lub technologiczne, wymuszone dostosowaniem obiektu do zadań użytkowych, których spełnienie jest warunkiem zezwolenia na użytkowanie [3] (Art. 54, 56). Należą do nich przede wszystkim postulaty dotyczące obsługi osób niepełnosprawnych oraz warunki przeciwpożarowe i ewakuacyjne. W uzasadnionych przypadkach dozwolone jest zachowanie tylko fragmentu budowli pierwotnej i świadoma jego ekspozycja, której celem jest pokreślenie więzi historycznej i tradycji oraz osiągnięć miejscowej sztuki i techniki budowlanej.

W przypadku mostu wpisanego do rejestru zabytków, konsekwencją przyjętego programu użytkowo-funkcjonalnego dla takiego obiektu, jest konieczność pogodzenia w projekcie remontu postulowanych funkcji użytkowych z formą architektoniczną i pierwotnym rozwiązaniem konstrukcyjnym obiektu. Pociąga to za sobą konieczność znalezienia indywidualnych i dopuszczalnych z punktu widzenia ochrony substancji zabytkowej, rozwiązań konstrukcyjno-technologicznych. Wymaga to świadomego wyboru technologii dostosowanych do rangi historycznej obiektu, stopnia jego degradacji, założonego programu funkcjonalno-użytkowego i prognozowanego okresu użytkowania.

Należy podkreślić szczególną wrażliwość realizacyjną planowanych działań remontowych na czynniki pozatechniczne, przypadkowe odkrycia o znaczeniu historycznym w trakcie realizacji, którym ustawodawca zagwarantował specjalny tryb postępowania. Dlatego planując remont zabytkowego miejskiego mostu drogowego należy poprzedzić go szczegółowym rozpoznaniem przedmiotu działania inwestycyjnego. Racjonalne wyeksponowanie i wykorzystanie atrakcyjnych cech budowlanego produktu finalnego, wynikających z jego wartości historyczno-zabytkowych, wymaga uwzględnienia w procesie projektowo-budowlanym trzech podstawowych elementów: substancji materialnej (kubaturowej), wartości historycznej oraz funkcji użytkowej.

Wspomniany wyżej *consensus* znajduje swój wyraz w programie funkcjonalno-użytkowym zamierzenia inwestycyjnego, w którym intuicyjne oszacowanie, wpływu wspomnianej wartości dodanej na końcowy efekt ekonomiczny, decyduje o skali przedsięwzięcia remontowego.



Rys. 1. Wizualizacja - Wiadukt im. S. Markiewicza w Warszawie

Fig. 1. Visualization - the S. Markiewicz viaduct in Warsaw

Pomocna na tym etapie może być rekonstrukcja wirtualna projektu oparta na szczegółowych pomiarach inwentaryzacyjnych przetworzonych następnie na model 3D (Rys.1).

Zalecenia konserwatorskie uzupełnione badaniami historycznymi, architektonicznymi i materiałowymi są podstawą merytorycznego programu konserwatorskiego i projektu budowlanego będącego bazą dla racjonalnych projektów wykonawczych.

Projekty budowlane i projekty wykonawcze inwestycji we współczesnej Polsce, obligatoryjnie podlegają wymaganiom funkcjonalnym i technicznym Unii Europejskiej. Na pierwsze miejsce wysuwa się tu postulat obsługi osób niepełnosprawnych oraz obligatoryjny warunek bezpieczeństwa budowli.

Warunek pierwszy, spełniony jest na drodze rozwiązań architektonicznych, natomiast spełnienie warunków stanu granicznego nośności<sup>2</sup> wynikających z konieczności zastosowania nowych współczynników obciążeń stałych i ruchomych oraz uzupełniających współczynników materiałowych, wymaga zwykle daleko idących zmian konstrukcyjnych. Prowadzi to zwykle do ingerencji w układ statyczny obiektu mostowego, wzmocnienia ustroju nośnego itp. oraz konieczność zastosowania technologii różniących się od pierwotnej techniki budowlanej. Zakres tych zmian musi być akceptowany przez nadzór budowlany i musi być zgodny z postulatami obowiązujących, ratyfikowanych konwencji konserwatorskich<sup>3</sup>.

W procesie uzgadniania zaleceń konserwatorskich i programu konserwatorskiego oraz w bezpośrednim nadzorze i odbiorze remontowych robót budowlanych bierze udział Urząd Konserwatora Zabytków. Sposób działania i zakres jego uprawnień określają Prawo budowlane [3] i Ustawa o ochronie zabytków [1] oraz związane rozporządzenia wykonawcze [5].

Uzyskanie decyzji o pozwoleniu na budowę, otwiera drogę do opracowania dokumentacji przetargowej i przystąpienia do wyboru wykonawcy. Integralnym elementem dokumentacji przetargowej jest program konserwatorski.

Należy podkreślić, że jakość dokumentacji przetargowej jest funkcją rzetelności i profesjonalności przygotowań na etapie badań historycznych, architektonicznych i materiałowych i tym samym decyduje o wycenie oferenta, opartej na przedmiarze inwestorskim. Błędy w dokumentacji przetargowej skutkują nie tylko zaniżoną kalkulacją, ale również niedocenieniem przez wykonawcę skali problemów technicznych. Pokutuje to na etapie realizacji inwestycji problemami z jakością, terminowością i dyscypliną finansową realizowanego przedsięwzięcia remontowego.

Końcowym etapem przedstawionego procesu inwestycyjnego jest odbiór robót budowlanych, uzyskanie pozwolenia na użytkowanie i ewentualne opracowanie zasad użytkowania remontowanego obiektu mostowego, obejmujących program funkcjonalno użytkowy, zasady monitoringu i inne określone przepisami zalecenia.

---

<sup>2</sup> Nowe zasady projektowania dostosowane do zasad zawartych w Eurokodach

<sup>3</sup> Karta wenecka z 1964 r.

### **1.3. Schemat procesu inwestycyjnego remontu zabytkowego obiektu mostowego w odniesieniu do stanu technicznego, bezpieczeństwa konstrukcji i warunków użytkowalności**

Przebieg remontu zabytkowych obiektów mostowych pod względem strukturalnym czytelnie wpisuje się w typowy proces inwestycyjny w budownictwie. Opisuje go również typowy schemat ogólnego procesu rewitalizacyjnego. Odnajdujemy w nim wyraźnie sprecyzowane obszary działań przypisane lub zarządzane przez podmioty procesu t.j. : inwestora, projektanta, wykonawcę oraz administrację (urząd konserwatorski, urząd nadzoru budowlanego i.t.p.).

Na przedstawionym na rys. 2 schemacie rewitalizacji, odnajdujemy obszary współdziałania w/w podmiotów oraz hierarchię następstwa działań, wyznaczoną przez teoretyczne kamienie milowe, związane z zakończeniem głównych etapów realizacyjnych:

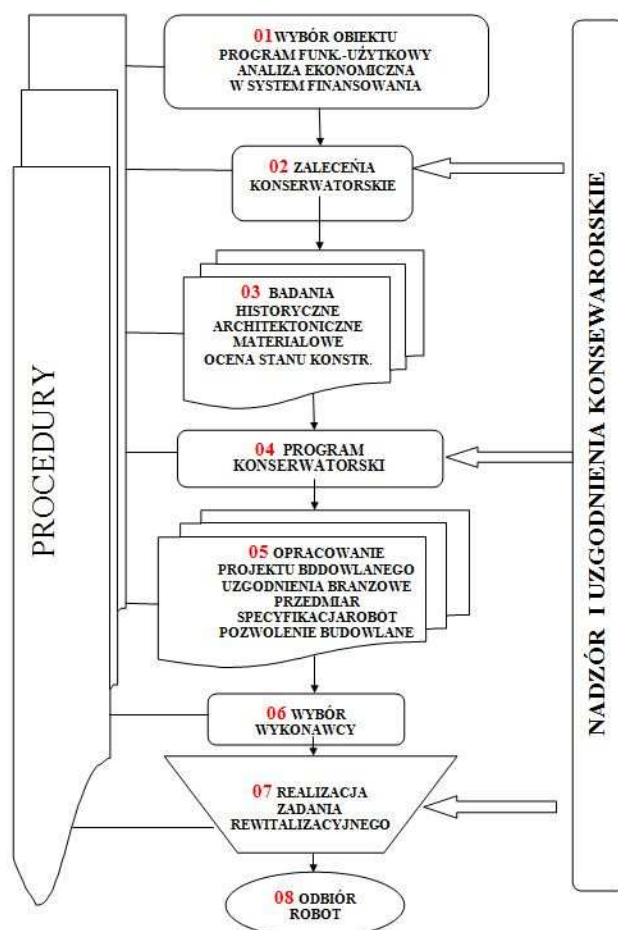
**Pierwszy kamień milowy (01)** – to wytypowanie obiektu do remontu, sprawdzenie lub usankcjonowanie stanu własności i opracowanie programu funkcjonalno użytkowego. Na tym etapie musi być również przeprowadzona ocena ekonomiczna oraz wybór rozwiązania instytucjonalnego procesu inwestycyjnego. W przypadku obiektów o znaczeniu dla dziedzictwa historycznego może być przeanalizowana jedna z form realizacji w ramach partnerstwa publiczno – prywatnego.

**Drugi kamień milowy (02,03,04)** – dotyczy uzgodnień konserwatorskich i przeprowadzenia badań: historycznych, architektonicznych, materiałowych, wytrzymałościowych, chemicznych, biologicznych i pozostałych niezbędnych do opracowania programu konserwatorskiego. Należy podkreślić, że zgodnie z Art. 39 [3] uzyskanie pozwolenia Wojewódzkiego Konserwatora Zabytków na podjęcie robót budowlanych przy zabytku wpisanym do rejestru nie zwalnia z obowiązku uzyskania pozwolenia na budowę albo zgłoszenia, w przypadkach określonych przepisami Prawa budowlanego”.

**Trzeci kamień milowy(05,06)** – dotyczy prac projektowych, procesu uzgodnień branżowych i konserwatorskich. Projektant rozpoczynając pracę nad projektem budowlanym i projektami wykonawczymi dotyczącymi obiektu zabytkowego, rozpoczyna pracę od analizy katalogu postulatów wpisanych przez WKZ do zaleceń konserwatorskich. Prace projektowe kończą się uzyskaniem prawomocnego pozwolenia na budowę.

**Czwarty kamień milowy (07,08)** - po wyborze wykonawcy następuje faza realizacyjna, kończąca się oddaniem do użytku remontowanego obiektu. Obligatoryjne sprawdzenie warunków bezpieczeństwa konstrukcji i używalności następuje na etapie odbioru robót przez urząd nadzoru budowlanego i urząd konserwatorski, który jest również ustawową stroną w omawianym procesie inwestycyjnym.

Omawiany powyżej schemat postępowania oparto na sieci powiązań, które obrazują dyrektywne obowiązki i relacje zachodzące pomiędzy podmiotami remontowego procesu inwestycyjnego [4].



Rys. 2. Schemat procesu rewitalizacyjnego, na podstawie [4]

Fig. 2. Revitalization process diagram, based on [4]

## 2. Przykład remontu zabytkowego miejskiego wiaduktu drogowego

### 2.1. Negocjacje bez ogłoszenia

W przypadku zamówień publicznych, obligatoryjnym trybem wyboru wykonawcy jest kryterium ceny. Prowadzić to może do wyboru wykonawcy, szczególnie w budownictwie, który nie jest w stanie poprawnie zrealizować interdyscyplinarne zadanie konserwatorsko-budowlane.

Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie przystępując do remontu 100-letniego wiaduktu im. S. Markiewicza, korzystając z faktu, że wiadukt ten został wpisany pod nr 681 decyzją z dnia 1 lipca 1965 r. Miejskiego Konserwatora Zabytków w Warszawie do rejestru zabytków, wybrał wykonawcę w drodze **negocjacji bez ogłoszenia**. Było to możliwe ponieważ zgodnie z opinią Ministra Kultury z 11 lipca 2005 r. cyt. " *W tej sytuacji należy stwierdzić, że planowane przez Zarząd Dróg Miejskich prace konserwatorskie i konserwatorsko-budowlane przy wiadukcie drogowym im. Stanisława Markiewicza w ciągu ul. Karowej w Warszawie, stanowią usługi w zakresie kultury w rozumieniu art. 5 ust. 1 pkt. 11 ustawy z dnia 29 stycznia 2004 r. Prawo zamówień publicznych.* "

Wybór pośrednio dedykowanego wykonawcy umożliwił wytypowanie interdyscyplinarnych zespołów, które po weryfikacji zostały zaproszone do złożenia oferty cenowej. Działanie takie było konieczne, ponieważ nadrzędnym celem było przywrócenie historycznego wyglądu i rzetelna rekonstrukcja wiaduktu miejskiego o geometrii, konstrukcji i wystroju, które czynią z niego unikatowy zabytek sztuki inżynierskiej i architektury mostowej początku ubiegłego wieku. Obiekt ma wyjątkowe wartości zabytkowe, wynikające z nowatorskiego, jak na ówczesne czasy, wykonania ustroju niosącego z betonu zbrojonego i ozdobienia go oryginalnym historyzującym wystrojem architektonicznym, typowym dla architektury przełomu wieków oraz grupy wysokiej klasy rzeźb. Zespół rzeźbiarski jest jednym z nielicznych przykładów rzeźby monumentalnej powstałej w środowisku warszawskim w początkach XX w.

## 2.2. Opis wiaduktu im. S. Markiewicza

Wiadukt drogowy usytuowany jest w ciągu ulicy Karowej w Warszawie (rys. 3). Ustrój niosący tworzy dwuprzęsłowa, żelbetowa konstrukcja łukowa. Oba łuki mają jednakową rozpiętość, która w świetle podpór wynosi 2x22,70 m. W związku z położeniem wiaduktu w łuku poziomym podpora środkowa ma zmienną szerokość, wynoszącą po stronie elewacji zachodniej 3,76 m, natomiast po stronie elewacji wschodniej filar poszerza się do 14,98 m. Z poszerzeniem tym związane jest ukształtowanie we wnętrzu filara dodatkowego, zbieżnego w kierunku elewacji zachodniej, sklepienia o maksymalnej rozpiętości w świetle równej 7,0 m. Promień łuku poziomego wiaduktu wynosi ok. 45 m. Na całkowitą szerokość wiaduktu równą około 22,90 m składają się dwa chodniki o szerokości 2x4,82 m oraz jezdnia o szerokości około 11,20 m. Wiadukt stanowi południowo-zachodnią część ukształtowanego w formie pełnej ślimacznicy zjazdu, łączącego górny poziom ul. Karowej z poziomem dolnym na Powiślu. Jako budowla zachowana w oryginalnej formie i substancji ma szczególne znaczenie dla miasta, które utraciło większość zabytkowej architektury przez działania wojenne oraz w okresie powojennej - traktowanej ideologicznie - odbudowy.

Powstanie wiaduktu w ciągu ulicy Karowej wynikało z potrzeby przebudowy całej ulicy w celu utworzenia dogodnego połączenia obszarów miasta

położonych na skarpie z Powiślem. Do 1895 r. była to wąska uliczka o szerokości 3 m, ostro opadająca ku Wiśle. Od strony Krakowskiego Przedmieścia uliczka zamknięta była bramą wzniesioną w 1856 r. wg projektu Henryka Marconiego. Projekty poszerzenia Karowej i wybudowanie zjazdu o łagodnym spadku datują się na lata 90. XIX wieku. Jeden z nich, opublikowany w 1900 r., zawiera projekt „ślimakowego zjazdu” z dwuarkadowym wiaduktem. Ostateczny projekt konstrukcyjny opracował inż. K. Sommer dla firmy budowanej inż. Arnolda Bronikowskiego. Dekorację architektoniczną zaprojektował Stefan Szyller. Datę wykonania projektu określa się na rok 1902 [6].

### 2.3. Założenia konserwatorskie i przebieg remontu

Kompleksowy program naprawy wiaduktu<sup>4</sup> zakładał wierne odtworzenie jego funkcji i wystroju. Celem proponowanych działań było nie tylko powstrzymanie procesów niszczących substancję zabytkową, ale jej trwałe zabezpieczenie zarówno w aspekcie funkcjonalno-użytkowym, jak i architektonicznym. Przyjęto następujące cele:

**Układ komunikacyjny:** odtworzenie historycznej geometrii układu komunikacyjnego i dostosowanie go funkcjonalnie do obowiązujących warunków wykonania i eksploatacji miejskich obiektów drogowych. Docelowa organizacja ruchu musiała uwzględnić uwarunkowania historyczne geometrii trasy. Oznakowanie poziome, pionowe, ograniczenie prędkości i urządzenia zabezpieczające miałyby być podporządkowane zabytkowej funkcji obiektu znajdującego się w części Warszawy uznanej przez UNESCO za dziedzictwo kultury i wpisanej do światowego rejestru zabytków.

**Konstrukcja wiaduktu:** naprawa, konserwacja i wzmocnienie zabytkowej konstrukcji ustroju nośnego, polegające na powstrzymaniu procesów korozji chemicznej i biologicznej, naprawa konstrukcyjna i iniekcyjna spękań i ubytków, wzmocnienie łuków nadbudową z betonu zbrojonego, wykonanie systemu odwadniającego, naprawa i reprofilacja skarp, uporządkowanie „zazielenienia” oraz wymiana nawierzchni.

**Wystrój architektoniczny:** kompleksowa konserwacja grup rzeźbiarskich z zachowaniem substancji zabytkowej oraz rekonstrukcją elementów wystroju powierzchniowego (tynki, gzymsy, boniowania itp.) oraz konstrukcji balustrad, wykonana na podstawie zachowanych modeli. Odtworzenie zdemontowanych lub zniszczonych elementów wyposażenia, takich jak charakterystyczne obeliski, na których były zawieszane latarnie i żeliwne oprawy oświetleniowe. Kolorystykę zaprojektowano na podstawie zachowanych fragmentów wystroju.

<sup>4</sup> Dokumentację projektową Zarząd Dróg Miejskich w Warszawie zlecił PPBiR Most Katowice Sp. z o.o. Projekt remontu wiaduktu im. S. Markiewicza w ciągu ul Karowej w Warszawie wykonał inż. Mariusz Robak, a sprawdzającym był mgr inż. Maciej Błach. W roku 2008 generalny wykonawcy robót firma INTOP Tarnobrzeg Sp. z o.o. otrzymała nagrodę za dzieło mostowe roku.



Rys. 3. Wiadukt im. S. Markiewicza stan przed remontem i po remoncie (fot A. Marecki)

Fig. 3. The S. Markiewicz viaduct in Warsaw prior to conservation work and after (fot. A. Marecki)

Prace budowlane i konserwatorskie trwały 14 miesięcy. Wiadukt do ponownej eksploatacji oddano w czerwcu 2007 r. W czasie prac konserwatorsko-budowlanych zweryfikowano założenia konserwatorskie i zalecenia budowlane. Kierując się nadrzędnym celem tj. odtworzeniem historycznego wyglądu obiektu i uwzględniając jego rzeczywisty stan dokonano wielu zmian technologicznych i konserwatorskich.

Opracowano nowy system zabezpieczenia przed wilgocią zmodyfikowano wzmocnienie konstrukcji, uzupełniono wystrój architektoniczny, zastępując metalowe latarnie pierwotnymi obeliskami oraz zrekonstruowano źródło na północnej fasadzie podpory pośredniej. Na rysunku 3 przedstawiono widok zabytkowego obiektu przed i po remoncie.

*Publikacja powstała w ramach projektu „Innowacyjne środki i efektywne metody poprawy bezpieczeństwa i trwałości obiektów budowlanych i infrastruktury transportu w strategii zrównoważonego rozwoju” współfinansowanego w ramach Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego i budżetu państwa w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka (działanie 1.1.2) i jest bezpośrednim rezultatem ww. projektu.*

## Literatura

- [1] Ustawa z dnia 23 lipca 2003 r. o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami, Dz. U. 2003, Nr 162, poz. 1568 z późniejszymi zmianami
- [2] [http://ow\\_chelm.pttk.pl/index/odznaki/od206.html](http://ow_chelm.pttk.pl/index/odznaki/od206.html) [dostęp 25 marca 2014 r.].
- [3] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo Budowlane, Dz.U.1994 Nr 89 p0z.414 z późniejszymi zmianami
- [4] Krzemiński R., Marecki A., Terlikowski W.: Temat badawczy 5 „Rehabilitacja zabytkowych budynków mieszkalnych i użyteczności publicznej”, Raport naukowy z realizacji celów naukowo badawczych. ZBO PW W-wa marzec 2011 r.
- [5] Rozporządzenie Ministra Kultury i Dziedzictwa Narodowego z dnia 27 lipca 2011 r. w sprawie prowadzenia prac konserwatorskich, restauratorskich, robót budowlanych



nych, badań konserwatorskich, badań architektonicznych, i innych działań przy zabytku wpisanym do rejestru zabytków oraz badań archeologicznych, Dz. U. 2011.165.987

- [6] Marecki A.: Wiadukt im. Stanisława Markiewicza w ciągu ul. Karowej w Warszawie – stan przed remontem, *Drogownictwo*, nr 6, 2007, s. 205-210

## **FORMAL, ARCHITECTURAL AND CONSTRUCTION PROBLEMS ASSOCIATED WITH RENOVATION HISTORIC URBAN ROAD BRIDGES**

### **S u m m a r y**

Renovation a historic urban road bridges involves surrounding it with legal protection by including it into the register of historic monuments, declaring it a historic monument, creating a culture park or granting it protection within the local spatial development plan. All of the above leads to the structure undergoing obligatory supervision by the conservator of monuments and being governed by regulations associated with the protection of national heritage. It should be emphasized that renovation an urban road bridge entails integrating it into the road and transport network of the metropolitan area. This requires performing construction work in line with principles drawn out in the Monument Protection and Monument Care Acts, as well as regulations concerning the technical conditions of road structure construction and location. The project should also conform to European Standards. Renovation work requires attaching special care to factors that lie outside of engineering, unexpected uncovering of historical artefacts, which have been given special protection by the lawmakers. Therefore, renovation construction work should be preceded with an in-depth investigation of the historic structure. A rational exhibition and usage of the structure's most appealing characteristics, stemming from its historic heritage, requires including three main elements in the project and construction process: the structure itself, its historical value and its function. Achieving a balance between the conservator's requirements, as well as the current limit and usage states, requires reaching a rational consensus between all entities involved in the renovationalization process. This paper outlines the principles upon which such projects should be based, using the renovationalization of the S. Markiewicz viaduct in Warsaw as an example.

**Keywords:** bridging, monument preservation, road infrastructure

DOI:10.7862/rb.2014.101

*Przesłano do redakcji: 22.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Adam MROZIŃSKI<sup>1</sup>

## BADANIE EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ LABORATORYJNEJ INSTALACJI FOTOWOLTAICZNEJ

W artykule przedstawiono zagadnienie wykorzystania w Polsce i w Europie instalacji fotowoltaicznych (PV). Systemy PV będą miały w niedalekiej przyszłości znaczny udział w globalnej produkcji energii elektrycznej. Będzie to istotnie wpływało na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych oraz na poprawę stanu środowiska naturalnego. W pracy przedstawiono budowę laboratoryjnej instalacji PV zlokalizowanej na WIM UTP w Bydgoszczy. W instalacjach PV coraz większe znaczenie mają systemy zarządzania energią. Zastosowany na stanowisku badawczym system PowerRouter (system PV 3w1) maksymalnie optymalizuje wykorzystanie energii elektrycznej w instalacji. Do urządzenia można bezpośrednio podłączyć odbiorniki, sieć zewnętrzną, panele fotowoltaiczne oraz akumulatory. PowerRouter można podłączyć także do Internetu w celu zdalnej rejestracji mierzonych danych. Współczesne systemy monitorujące pozwalają wykryć źródło problemu i szybko naprawić usterkę. W artykule przedstawiono system Solar-Log™. System ten umożliwia monitorowanie aktualnej produkcji energii, prędkość wiatru, temperatury zewnętrznej otoczenia i modułów, napromieniowania słonecznego oraz nawet parametrów poszczególnych stringów modułów PV. System można podłączyć także do Internetu w celu generowania wykresów poszczególnych parametrów instalacji PV. Autor zaprezentował także budowę stanowiska badawczego do badań efektywności modułów PV. Stanowisko to jest przykładem próby rozwiązania problemu badań modułów w warunkach rzeczywistych. Oprócz badań charakterystyk modułów PV różnego typu na stanowisku możliwa jest również analiza wpływu zacieniania na efektywność badanego modułu.

**Słowa kluczowe:** odnawialne źródła energii, efektywność, fotowoltaika

### 1. Wprowadzenie

Rynek branży OZE (w tym dział fotowoltaiki) w Europie cały czas się rozwija. Biorąc np. pod uwagę zatrudnienie w branży odnawialnych źródeł energii w Unii Europejskiej (27 państw) w 2012 r. obejmowało ono około 1.220.000 bezpośrednich i pośrednich stanowisk pracy.

---

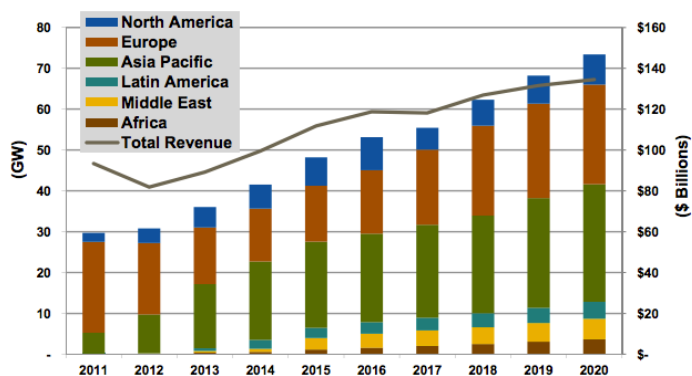
<sup>1</sup> Dr inż. Adam Mroziński, Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Wydział Inżynierii Mechanicznej, 85-789 Bydgoszcz, Al. Prof. S. Kaliskiego 7, tel.: 52 340 84 53, adamroz@utp.edu.pl, www.amrozinski.utp.edu.pl, www.oze.utp.edu.pl

Najwięcej pracowników w 2012 r. zatrudniano w sektorze energetyki wiatrowej (0,30 mln bezpośrednich i pośrednich stanowisk pracy), a następnie w branżach paliw z biomasy stałej (0,28 mln miejsc pracy), fotowoltaiki (0,25 mln miejsc pracy) i biopaliw (0,11 mln miejsc pracy) [5, 6, 8].

Wartość gospodarczą odnośnie wdrażania odnawialnych źródeł energii w 27 państwach członkowskich Unii Europejskiej w 2012 r. ocenia się na prawie 130 mld euro (lekki spadek ponieważ ocena szacunkowa dla 2011 r. to 141 mld euro). Najwyższe obroty w 2012 r. można przypisać kolejno energetyce wiatrowej (34,4 miliardów euro), fotowoltaice (30,8 mld euro) i paliwom z biomasy stałej (27,7 mld euro) [8].

W 2012 r. końcowe zużycie energii ze źródeł odnawialnych brutto znacznie wzrosło. Całkowity udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto w 2012 r. wyniósł 14,0% w porównaniu do 12,9% w 2011 roku [8].

Produkcję energii z odnawialnych źródeł energii w 2012 r. oszacowano na 763.5 TWh, w tym udział energii elektrycznej wynoszący 23.4%. W ciągu ostatnich 10 lat, energetyka fotowoltaiczna to jedna z najszybciej rozwijających się gałęzi gospodarki, ze średnim rocznym tempem wzrostu powyżej 35%. Dynamika wzrostu produkcji modułów fotowoltaicznych często przyrównywana jest do dynamiki wzrostu przemysłu mikro-elektronicznego w początkowym okresie jego rozwoju (Rys. 1).



Rys. 1. Wzrost rynku fotowoltaiki na świecie, na podstawie [6], [7], [8]

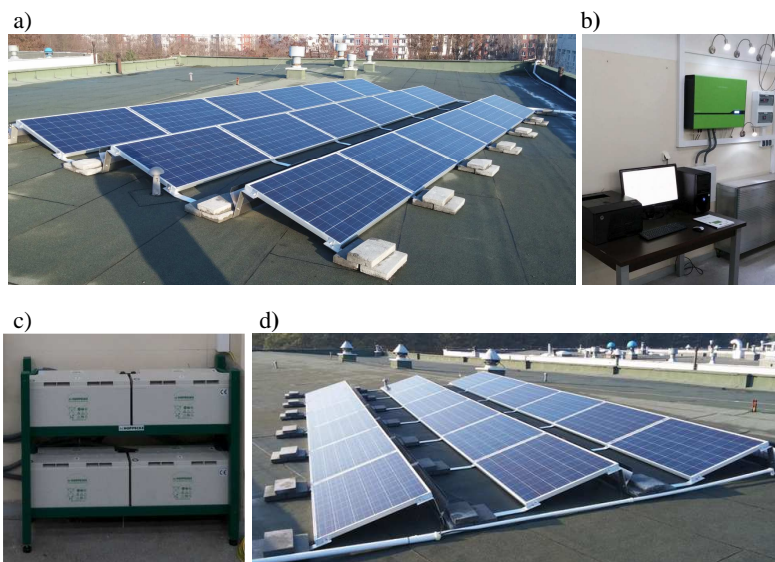
Fig. 1. Market growth of photovoltaic in the world, based on [6], [7], [8]

Branża PV jest najdynamiczniej rozwijającym się sektorem obok informatyki i biotechnologii. Nawet w 2006 roku, gdy wystąpił chwilowy niedobór krzemu, zainstalowano więcej systemów PV niż w latach poprzednich. Zakładając nawet konserwatywny wzrost rynku na poziomie 25% rocznie, w 2030 roku wartość przemysłu półprzewodnikowego związanego z sektorem PV przekroczy 175 bilionów Euro [4, 5, 6].

Rynek PV osiągnął już około 40 GW mocy zainstalowanej. Mimo tak znaczącego przyrostu energia elektryczna wytwarzana przez źródła fotowoltaiczne stanowi zaledwie niecały 1% światowej podaży energii. Według szacunków Międzynarodowej Agencji Energii, do roku 2050 energia elektryczna wytwarzana przez instalacje fotowoltaiczne mogłaby wynosić 11% w skali globalnej [1, 2, 8].

## 2. Laboratoryjna instalacja fotowoltaiczna na WIM UTP

Laboratoryjną instalację fotowoltaiczną, funkcjonującą na budynku Wydziału Inżynierii Mechanicznej UTP w Bydgoszczy przedstawiono na rysunku 2. W instalacji zastosowano polikrystaliczne moduły fotowoltaiczne o mocy całkowitej 3000 W. Zamocowano je na dachu budynku hali technologicznej WIM-UTP pod kątem 20 stopni.



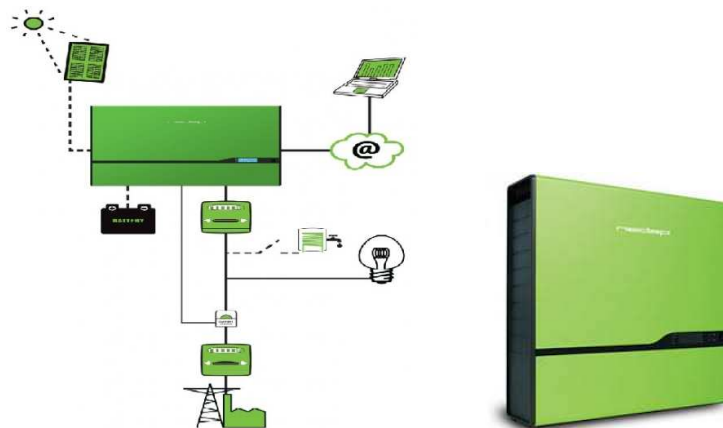
Rys. 2. Instalacja fotowoltaiczna na WIM UTP w Bydgoszczy: a, d- moduły PV, b- system pomiarowy, c- bank akumulatorów

Fig. 2. Photovoltaic installation on the "WIM UTP" in Bydgoszcz: a, d- PV modules, b- measurement system, c- battery bank

W instalacji wykorzystano inwerter hybrydowy PowerRouter firmy Nedap Energy Systems. Inwerter tego typu jest w pełni zintegrowanym system zarządzania energią elektryczną. Instalacje fotowoltaiczne zbudowane w oparciu o ten inwerter umożliwiają stworzenie własnej sieci dla zrównoważenia energii produkowanej przez ogniwa fotowoltaiczne i energii konsumowanej na potrzeby własne.

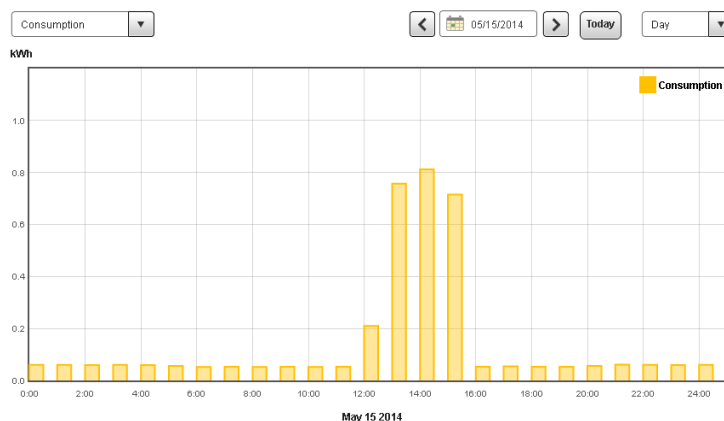
Uniwersalność urządzenia pozwala na podłączenie do niego w prosty sposób modułów fotowoltaicznych, odbiorników i banku akumulatorów. Automatyka inwertera hybrydowego pozwala na skonfigurowanie instalacji tak, aby wytworzona w ogniwach fotowoltaicznych energia była zużywana natychmiast, przechowywana w akumulatorach do późniejszego wykorzystania, a po naładowaniu akumulatorów i w przypadku braku odbioru energia może być oddawana do sieci. Ponadto inwerter można podłączyć do sieci Ethernet i dzięki portalowi internetowemu [mypowerrouter.com](http://mypowerrouter.com) (po zalogowaniu) można mieć wgląd na parametry pracy instalacji z dowolnego miejsca na Ziemi. Reasumując schemat działania zintegrowanego systemu fotowoltaicznego 3 w 1 wygląda w sposób następujący (rys. 3):

- a) wytworzona w modułach PV energia elektryczna jest dostarczana do PowerRouter'a,
- b) w razie potrzeby zasilania dowolnego odbiornika domowego, energia pobierana jest z PowerRouter'a,
- c) niewykorzystana energia elektryczna zostaje zgromadzona w systemie baterii akumulatorów,
- d) w przypadku zapotrzebowania na energię i braku słońca system wykorzystuje energię z baterii akumulatorów,
- e) w przypadku powstania nadwyżki energii, której nie można wykorzystać ani zakumulować oddaje się ją do sieci (jeśli system oczywiście jest podłączony do sieci),
- f) za pomocą portalu internetowego [www.mypowerrouter.com](http://www.mypowerrouter.com) w każdej chwili można monitorować i zarządzać produkcją i zużyciem energii (rys. 4).



Rys. 3. Działanie zintegrowanego systemu fotowoltaicznego 3 w 1 - PR30SB-BS/S24, na podstawie [9]

Fig. 3. Working of integrated photovoltaic system 3in1 - PR30SB-BS/S24, based on [9]



Rys. 4. Przykładowe wyniki pomiarów parametrów pracy instalacji via mypowerrouter.com

Fig. 4. Example results of parameters measurements of installation work via mypowerrouter.com

### 3. Monitoring parametrów instalacji fotowoltaicznej

Systemy monitoringu są obecnie nieodłącznym elementem instalacji fotowoltaicznych. Pomagają utrzymać maksymalną wydajność systemu oraz wskazywać ewentualne usterki już na początkowym etapie działania instalacji. Dzięki temu uniknąć przestojów w produkcji energii elektrycznej. Obecnie dla inwestora nie są istotne tylko sumaryczne dane energetyczne całego systemu, ale również dane chwilowe i bardziej szczegółowe - np. parametry stringów modułów PV.

Analizowana instalacja fotowoltaiczna została wyposażona w system monitoringu Solar-Log™. System ten umożliwia monitorowanie:

- aktualnej produkcji energii i prędkość wiatru,
- temperatury zewnętrznej otoczenia i temperatury modułów,
- napromieniowania słonecznego,
- zużytej energii spoza systemu z własnej produkcji,
- wzrostu wydajności skumulowanej oraz zaplanowanej,
- energii oddawanej przez instalacje po stronie AC inwertera,
- produkcji energii dla wybranego okresu,
- maks. wydajności i zaplanowanej produkcji w wybranym okresie,
- stosunku zaplanowanej produkcji do faktycznej,
- parametrów na zdalnym komputerze oraz urządzeniach mobilnych,
- monitorowanie stringów modułów PV.

Po zarejestrowaniu swojego urządzenia typu Solar-Log i podłączeniu go do Internetu można się zalogować na <http://home.solarlog-web.pl> do swojego systemu układu pomiarowego i mieć dostęp bieżących oraz wstecznych danych instalacji fotowoltaicznej. Przykład zarejestrowanych danych instalacji fotowoltaicznej zlokalizowanej na WIM -UTP w Bydgoszczy przedstawiono na rysunku 5.

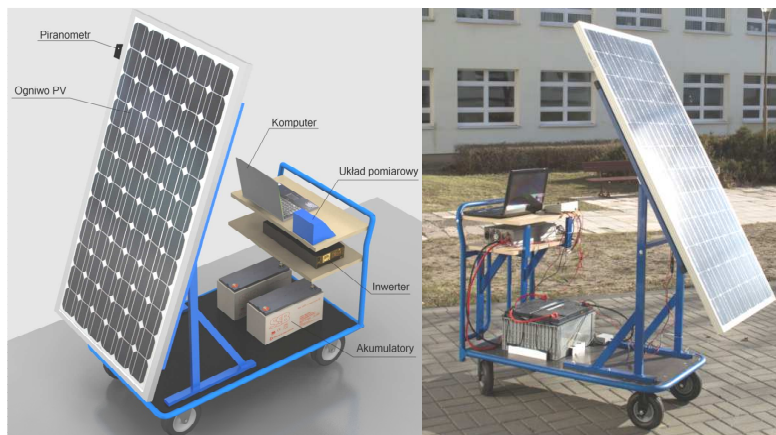


Rys. 5. Wykorzystany w instalacji Solar-Log300 oraz przykładowe wyniki pomiarów, na podstawie [10]

Fig. 5. Used in installation Solar-Log300 and example results of measurements, based on [10]

#### 4. Weryfikacja jakości modułów fotowoltaicznych

Na WIM UTP w Bydgoszczy funkcjonuje również stanowisko do badań modułów fotowoltaicznych (Rys. 6). W skład wyposażenia stanowiska wchodzi: badany moduł fotowoltaiczny, inwerter o mocy ciągłej 1,5kW z wbudowaną ładowarką sieciową, akumulatory żelowe 12V/100 Ah (2szt.), układ pomiarowy, obciążenie rezystancyjne do badania ogniwa oraz komputer PC.



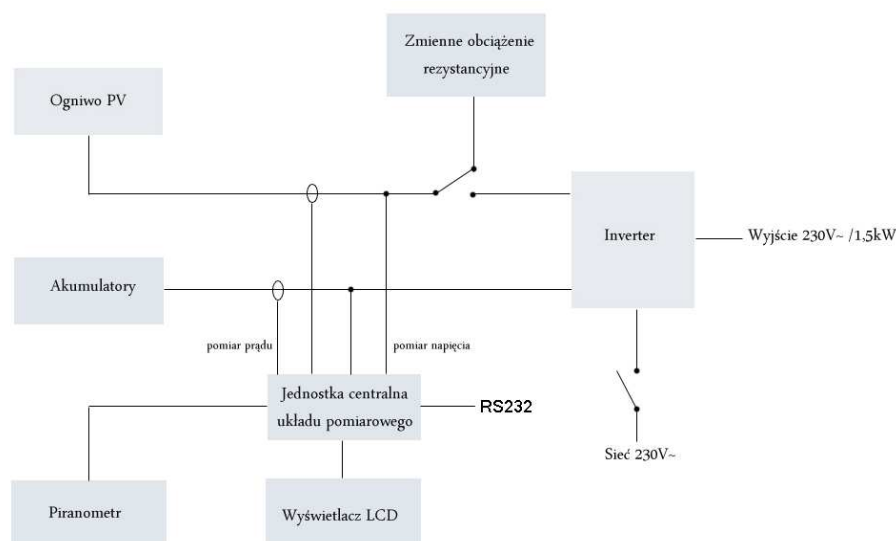
Rys. 6. Budowa stanowiska badawczego [4], [5]

Fig. 6. Test stand construction [4], [5]

Powyższe elementy tworzą na stanowisku instalację fotowoltaiczną typu off-grid z możliwością doładowywania akumulatorów z sieci energetycznej. Inwerter może pracować w dwóch trybach. W pierwszym moduł PV doładowuje akumulator i zasila jednocześnie przetwornicę. W drugim przypadku inwerter działa jak UPS czyli awaryjne źródło zasilania. Bezpośrednio do inwertera

można podłączyć odbiornik przy pomocy typowego gniazda wtykowego 230V~. Do instalacji podłączony jest system monitorujący parametry pracy. System ten został zaprojektowany i wykonany od podstaw. W jego skład wchodzi (Rys. 7):

- piranometr w którym w roli sensora zastosowana została fotodioda BPW34 ze względu na liniową charakterystykę irradycja-fotoprąd,
- woltomierze do pomiaru napięcia na ogniwie oraz akumulatorach,
- amperomierze do pomiaru prądu ogniwa i akumulatora.



Rys. 7. Schemat blokowy instalacji [4], [5]

Fig. 7. Block diagram of installation [4], [5]

Pomiar prądu akumulatora ze względu na znaczne jego wartości odbywa się pośrednio przy pomocy czujnika Halla. Wszystkie mierzone parametry pracy instalacji to:

- napięcie na ogniwie PV w zakresie 0-100 V (rozdzielczość 0,1 V, +/- 5%),
- prąd ogniwa PV w zakresie 0-10 A (rozdzielczość 0,01 A, +/- 5%),
- napięcie akumulatora w zakresie 0-100 V (rozdzielczość 0,1 V, +/- 5%)
- prądu akumulatora w zakresie do 100 A (-100 do -0,5 / +0,5 do +100, +/- 5%),
- moc pobierana z ogniwa PV oraz akumulatora,
- temperatura ogniwa PV (-55°C do +125°C, rozdzielczość 0,5°),
- energia promieniowania słonecznego w zakresie 0-2000 W/m<sup>2</sup> (rozdzielczość 2 W/m<sup>2</sup>, +/- 5%).

Wszystkie mierzone parametry są przetwarzane na postać cyfrową i wyświetlane na wyświetlaczu LCD. Dodatkowo układ umożliwia przesyłanie da-



nych do komputera PC. Dane te są automatycznie wstawiane do arkusza kalkulacyjnego Excel w celu ich późniejszej analizy i przygotowania wykresów. Jako że stanowisko ma służyć również do badania samych ogniw fotowoltaicznych zostało wyposażone w zmienne obciążenie rezystancyjne. Aby ograniczyć koszty wykonano obciążenie w dość niekonwencjonalny sposób. Zbudowane zostało z trzydziestu rezystorów o rezystancji  $0,3 \Omega$  w formie drabinki oraz trzydziestu tranzystorów MOSFET o rezystancji przewodzenia  $0,1 \Omega$ .

Konstrukcja taka umożliwia zmianę rezystancji w zakresie od  $0,4 \Omega$  do  $9,1 \Omega$ . Zmiana odbywa się za pomocą przycisków na panelu obok wyświetlacza LCD. Informacja o aktualnie ustawionym oporze jest również przesyłana do komputera. Zastosowane moce rezystorów pozwalają na wyznaczanie charakterystyk paneli o wartości prądu mocy maksymalnej  $I_{mp}$  do 6 A. Umożliwia to wyznaczanie charakterystyk prądowo-napięciowych przy różnych kątach pochylecia ogniwa i różnych wartościach promieniowania słonecznego.

Przykład wykresu charakterystyk dla badanego modułu fotowoltaicznego przedstawiono na rysunku 8.

Oprócz badań charakterystyk modułów możliwa jest również analiza wpływu zacieniania na efektywność badanego modułu.



Rys. 8. Przykład charakterystyki modułu fotowoltaicznego [4], [5]

Fig. 8. Example of photovoltaic module characteristic [4], [5]

## 5. Wnioski

Olbrzymi postęp w technologii modułów i systemów fotowoltaicznych, a także funkcjonujące w Europie systemy wsparcia, wskazują, że źródła fotowoltaiczne mogą mieć w niedalekiej przyszłości znaczny udział w globalnej produkcji energii elektrycznej, co miałyby istotny wpływ na ograniczenie emisji gazów cieplarnianych, a zatem na poprawę stanu środowiska naturalnego.

Dzięki zastosowanemu systemowi typu PowerRouter maksymalnie udało się zoptymalizować wykorzystanie energii elektrycznej. PowerRouter w zależności od sytuacji "decyduje" czy zużywać energię na bieżąco, oddawać ją do sieci czy też magazynować w akumulatorach. Do urządzenia można bezpośrednio podłączyć odbiorniki, sieć zewnętrzną, panele fotowoltaiczne oraz akumulatory. PowerRouter można podłączyć do Internetu, aby uzyskać podgląd na wszystkie parametry systemu (np. uzyski systemu fotowoltaicznego, pobór energii, wydajność, poziom naładowania akumulatorów). PowerRouter można zdalnie aktualizować w zakresie oprogramowania i funkcji. Można także dokonywać zmian podczas pracy całego systemu.

Dotychczasowa praca z układem monitorującym Solar-Log<sup>TM</sup> pozwoliła bardzo efektywnie zarządzać analizowaną instalacją fotowoltaiczną na WIM UTP w Bydgoszczy. Zamiast kilku systemów monitoringu, Solar-Log<sup>TM</sup> oferuje jedno rozwiązanie, niezależnie od marki stosowanych inwerterów. Współczesne systemy monitorujące pozwalają wykryć źródło problemu i szybko naprawić usterkę. Jest to możliwe dzięki ciągłej komunikacji pomiędzy np. Solar-Log<sup>TM</sup> i inwerterem (lub inwerterami dla dużych instalacji), podczas której są one badane pod kątem nieprawidłowości. O ewentualnych odchyleniach system powiadamia poprzez SMS lub e-mail. Takie rozwiązanie pozwala błyskawicznie wyeliminować problemy.

Zaproponowane mobilne stanowisko do badań efektywności modułów fotowoltaicznych jest przykładem próby rozwiązania problemu badań modułów w warunkach rzeczywistych. Realizowane badania umożliwiają porównywanie modułów oferowanych na rynku nie tylko z punktu widzenia ich mocy szczytowej podawanej na tabliczce znamionowej.

## Literatura

- [1] Pluta Z.: Słoneczne instalacje energetyczne. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
- [2] Waclawek M., Rodziewicz T.: Ogniwa słoneczne - wpływ środowiska naturalnego na ich pracę. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2011.
- [3] Szymański B.: Instalacje Fotowoltaiczne. Wydanie II. Wydawnictwo Geosystem Burek, Kotyza s.c., Kraków 2013.
- [4] Skibowski M., Mroziński A.: Badanie efektywności działania modułów fotowoltaicznych do wytwarzania odnawialnej energii elektrycznej. Zbiór rozpraw pod redakcją J.K. Garbacza: Diagnostowanie stanu technicznego środowiska, Metody badaw-

- cze - prognozy, Prace komisji ekologii i ochrony środowiska BTN, tom VI, Bydgoszcz 2012, str. 249-256.
- [5] Mroziński A., Skibowski M.: Badanie efektywności modułów fotowoltaicznych. Rozdział w monografii pt. V Eko-Euro-Energia Inżynieria Odnawialnych Źródeł Energii pod redakcją A. Mrozińskiego, Wydawnictwo Fundacji Rozwoju Mechatroniki, ISBN 978-83-932977-6-4, Bydgoszcz 2012, str. 88-107
- [6] Mroziński A.: Recykling ogniw fotowoltaicznych. Inżynieria i Aparatura Chemiczna, Nr 5/2010, Vol. 49 (41), str. 85-86
- [7] Lewandowski W.M.: Proekologiczne źródła energii odnawialnej, Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 2002.
- [8] Źródło: EurObserv'ER, www.eurobserv-er.org, 2014
- [9] Materiały techniczne systemu fotowoltaicznego 3w1 - PR30SB-BS/S24
- [10] Materiały techniczne układu monitorującego Solar-LogTM<sup>300</sup>

## RESEARCH OF ENERGY EFFICIENCY OF LABORATORY PHOTOVOLTAIC INSTALLATION

### Summary

In the paper problem of photovoltaic installations (PV) using in Poland and Europe were presented. PV systems will be have in near future considerable contribution in global electric energy production. It will be this influenced indeed onto limitation of greenhouses' gases emission and onto improvement of natural environment state. In the paper building of laboratory photovoltaic installation on the "WIM UTP" in Bydgoszcz. In PV installations have larger meaning systems of management energy more and more. Applied on the test stand PowerRouter system (system PV 3in1) optimizes utilization of electric energy in installation. To device it was been possible to directly connect receiver sets, external net, PV panels and batteries. PowerRouter it were been possible to connect to Internet also in aim of remote registration of measured dates. Present monitoring systems permit detections source of problem and repair fault quickly. In article system Solar-LogTM was introduced. System this makes possible monitoring of current production of energy, speed of wind, external temperatures of surroundings and modules, sunny irradiating as well as even individual string parameters of modules PV. The author also was presented test stand to investigations of working efficiency of photovoltaic modules. Test stand is example of test solution of investigations in real conditions. Beside investigations of characters of modules possible of different type on position PV is analysis of shading onto efficiency of studied module also.

**Keywords:** renewable energy source, efficiency, photovoltaic

DOI:10.7862/rb.2014.102

*Przesłano do redakcji: 21.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Michał MUSIAŁ<sup>1</sup>

## REWALORYZACYJNE MOŻLIWOŚCI ZWIĘKSZENIA KUBATURY MIESZKALNEJ ZABYTKOWEGO BUDYNKU MIESZKALNEGO

Celem niniejszego opracowania jest rozważenie możliwości rewaloryzacji przedwojennego domu mieszkalnego, zlokalizowanego w Przemyślu, z uwzględnieniem zachowania ciągłości form architektonicznych budynków znajdujących się w pobliżu oraz zrealizowanych w podobnym okresie.

W artykule nawiązano do kilku koncepcji rozbudowy budynków o różnym znaczeniu architektonicznym i historycznym, zlokalizowanych w Niemczech i Turcji. W zaprezentowanych przykładach przedstawiono różne podejścia do rozbudowywanych budynków zabytkowych, w których konserwatorzy zabytków uważają za słuszne jedynie poprawienie stanu technicznego budynku lub ich adaptację. Niektórzy uważają, że rozbudowa bądź modernizacja budynków zabytkowych to dobra okazję do poprawy niektórych elementów budynku. Przedstawiono trzy koncepcje rozbudowy opisywanego budynku, z których wybrano najstosowniejszą ze względów estetycznych, architektonicznych i funkcjonalnych.

Wybrana koncepcja rozbudowy zakłada wykonanie nadbudowy jednej kondygnacji oraz poddasza użytkowego, a także zmianę konstrukcji dachu z kopertowego na mansardowy.

Poniższe opracowanie opisuje zabudowę jednorodziną w dwóch starych, sąsiadujących ze sobą zabytkowych dzielnicach Przemyśla, jakimi są Podwinie i Winna Góra. Budynki mieszkalne znajdujące się na Winnej Górze zostały podzielone na cztery grupy; ze względu na bryłę oraz wykorzystane detale architektoniczne. W związku z mniejszą liczbą budynków mieszkalnych na Podwiniu, w stosunku do Winnej Góry z okresu XX-lecia międzywojennego oraz w związku z niewielkimi różnicami w zastosowanych detalach architektonicznych zostały one przedstawione w jednej grupie.

Zaprezentowany budynek zlokalizowany jest w Przemyślu, który posiada bogate tradycje związane z realizacją obiektów budowlanych, sięgające głęboko wstecz. Istotnym założeniem rewaloryzacyjnym budynku jest utrzymanie jego bryły w nawiązaniu do architektury obiektów sąsiednich.

**Słowa kluczowe:** budynek zabytkowy, przedwojenna zabudowa, rewaloryzacja obiektów budowlanych, architektoniczne dziedzictwo kultury.

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Michał MUSIAŁ, Politechnika Rzeszowska, 35-959 Rzeszów al. Powstańców Warszawy 12, tel. 178651005, email: mmusial@prz.edu.pl

## 1. Wstęp

Analizując stare, zabytkowe dzielnice miast, dostrzegamy budynki cenne z powodu ich wartości architektonicznych, historycznych oraz lokalizacyjnych. Często budynki te spełniają nadal swoje funkcje użytkowe, lecz z powodu upływającego czasu wymagają prac konserwacyjnych i modernizacyjnych. Przy okazji tych czynności budowlanych rozważa się potrzebę dostosowania obiektów do współczesnych potrzeb funkcjonalnych. Adaptacje i rozbudowy są właściwym uzupełnieniem podejmowanych prac modernizacyjnych. Również ważnym zadaniem jest dbałość o zachowanie form budynków, zważając na potrzebę przekazywania architektonicznych rozwiązań dla przyszłych pokoleń. Stąd też istotnym zagadnieniem jest zachowanie pierwotnego charakteru architektonicznego tych uwspółcześnianych budynków, zwłaszcza w aspekcie funkcjonalnym. Modernizacje budynków, szczególnie w miastach były wykonywane od wieków i często po rozbudowie traciły one swój pierwotny charakter. Przykładem mogą być kamienice wybudowane w okresie renesansu, a które w późniejszym czasie zostały przebudowane zgodnie z założeniami architektonicznymi kolejnych epoki. Istniejące na starówkach miast współczesne 4-5 kondygnacyjne kamienice były często wcześniej budynkami parterowymi i doświadczały wielokrotnie przebudowywania przez kolejne pokolenia swoich właścicieli.

Jedną z możliwości modernizacji obiektów zabytkowych jest zastosowanie w nowych częściach rozbudowywanego obiektu mniej okazałych zdobień elewacji, pozostawiając eksponowaną historyczną część budynku „...*aby łatwo rozróżnić to co jest stare od tego co nowe...*” [3]. Przykładem takiego rozwiązania jest rozbudowa zabytkowego budynku szpitala [3], tam projekt zakładał zastosowanie widocznego oddzielenia części starej poprzez dobór ciemniejszej barwy elewacji, w stosunku do nowej części oraz przez usytuowanie nowej części budynku za starą, dzięki czemu, pomimo zdecydowanie większej kubatury części dobudowanej, zachowana została hierarchia starego fragmentu względem nowego. Nieco odmienny pogląd jest prezentowany w pozycji [1], gdzie przedstawiono w pierwszej części odbudowę zabytkowego, średniowiecznego miasta Rothenburg w Niemczech, które w wyniku bombardowań w okresie II wojny światowej uległo zniszczeniu- nacisk położono głównie na dbałość o wierne odtworzenie średniowiecznego charakteru zabudowy miejskiej. Natomiast druga część jest poświęcona „...*badaniom nad poprawieniem estetyki zabytkowego miasta, które często są sprzeczne z podstawowymi zasadami rekonstrukcji...*” [1]. Autor podaje, że „...*wielu konserwatorów traktuje rekonstrukcję jako okazję do poprawy niektórych aspektów miast, w szczególności w celu usunięcia grzechów budowlanych z poprzednich dekad, gdzie rekonstrukcja pozwoli konserwatorom poprawić przeszłość...*” [1]. Należy pamiętać także, że niekiedy adaptacja lub modernizacja budynków zabytkowych jest ich jedynym ratunkiem przed zniszczeniem. Dotyczy to terenów mniej zamożnych, słabiej rozwiniętych

gospodarczo, lecz mających wielowiekową historię. Zagadnienia te są opisane w pozycji [4], w której podano, że „...*adaptacja i przebudowa zabytkowych budynków mieszkalnych, między innymi na potrzeby komercyjne może zapobiec ich zniszczeniu, a tym samym zatraceniu dziedzictwa historycznego...*”. Zwrócono również uwagę, że należy wybrać „...*najwłaściwsze ponowne wykorzystanie budynków...*”, aby prowadzona w nich działalność nie doprowadziła do zmiany charakteru dzielnic zabytkowych miast [4].

Wiele przykładów modernizacji obiektów zabytkowych można zaobserwować na przykładzie Twierdzy Przemysł, opisanych [5]. Ważna jest również modernizacja, adaptacja obiektów, które nie są objęte ochroną konserwatorską, a które w skutek zaniedbania i braku konserwacji są obecnie w stanie ruiny, przykładem mogą być niektóre obiekty pomocnicze Twierdzy Przemysł opisane [6],[7],[8].

## 2. Lokalizacja dzielnicy w Przemysłu

Budynek jest zlokalizowany przy ul. Adama Naruszewicza nr 4, w starej willowej dzielnicy Przemysłu, nazwanej Podwinie, usytuowanej obok dzielnicy Winna Góra, której nazwa pochodzi od istniejących dawniej winnic, znajdujących się na południowym stoku dużego wzgórza. Zarówno jedna, jak i druga dzielnica były przeznaczone pod zabudowę jednorodziną dla oficerów Wojska Polskiego.

Opisywana zabudowa Podwinia charakteryzuje się:

- mniejszą ilością zdobień elewacyjnych w stosunku do zabudowy Winnej Góry,
- attyki i wykusze i lukarny posiadają zdecydowanie skromniejsze wykończenie w stosunku do budynków Winnej Góry,
- większość budynków Podwinia posiada dachy pokryte blachą płaską i blachodachówką.

Zabudowę Podwinia w 2012 roku ilustrują fotografie (Il.1-6).



Il.1. Willa H. Jaskóły przy ul. Drużbackiej  
Fig.1. H.Jaskola's villa on Drozbacka street



Il.2. Kamienice przy ul. Drużbackiej  
Fig.2. Kamienice at The Drozbacka street



Il.3. Dom przy ul. Naruszewicza  
Fig.3. House at The Naruszewicz street



Il.4. Kamienica przy ul. Drużbackiej  
Fig.4. Kamienice at The Drozbacka street



Il.5. Dom przy ul. Drużbackiej  
Fig.5. House at The Druzbacka street



Il.6. Kamienica przy ul. Sarbiewskiego  
Fig.6. House at The Sarbiewski street

Ilustracje (Il.7-9) przedstawiają na mapach dzielnice: Podwinie i Winna Góra z roku 1940 i 1942, natomiast fotografia (Il.10) przedstawia widok ze staro-  
rego miasta na niezagospodarowaną jeszcze w 1910 roku Winną Górę i Podwinie.

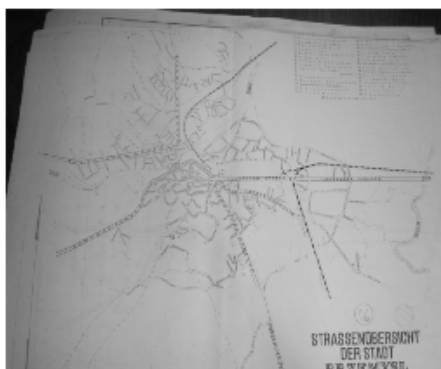




Il.7. Niemiecki plan Przemyśla z 1940r. Archiwum Państwowe w Przemyślu  
Fig.7. German city map of Przemyśl from 1940 The building of the National Archive in Przemyśl



Il.8. Niemiecki plan Przemyśla z 1940 r. Archiwum Państwowe w Przemyślu  
Fig.8. German city map of Przemyśl from 1940 The building of the National Archive in Przemyśl



Il.9. Niemiecki plan Przemyśla z 1942 r. Archiwum Państwowe w Przemyślu  
Fig.9. German city map of Przemyśl from 1940 The building of the National Archive in Przemyśl



Il.10. Widok z wieży katedralnej na Zasanie 1910 r. Archiwum Państwowe w Przemyślu  
Fig.10. Zasanie district seen from The Cathedral Tower The building of the National Archive in Przemyśl

Dzielnice zlokalizowane są bezpośrednio przy starych, poaustriackich zabytkowych koszarach powstałych w XIX wieku (Il.11) .



Il.11. Zabytkowe koszary wojskowe  
Fig.11. The scheduled barracks



W analizowanej zabudowie Winnej Góry i Podwinia zauważyć można różniące się od siebie grupy budynków w zakresie rozwiązań konstrukcyjnych i detali architektonicznych. Opisywana zabudowa mieszkalna Winnej Góry charakteryzuje się:

- większą ilością zdobień elewacyjnych w stosunku do zabudowy Podwinia, takich jak: pilastry oraz gzymsy między kondygnacyjne,
- attyki i wykusze i lukarny posiadają spiralne zdobienia charakterystyczne dla zabudowy Winnej Góry,
- przeważająca liczba budynków Winnej Góry posiada dachy pokryte dachówką ceramiczną.

Charakterystyczne budynki z tych grup przedstawiają ilustracje 12-15.



Il.12. Dom przy ul. Chrobrego  
Fig.12. House at the Chrobry street



Il.13. Dom przy ul. Tarnowskiego  
Fig.13. House at the Tarnowski street



Il.14. Dom przy ul. Szwoleżerskiej  
Fig.14. House at the Szwoleżerska street

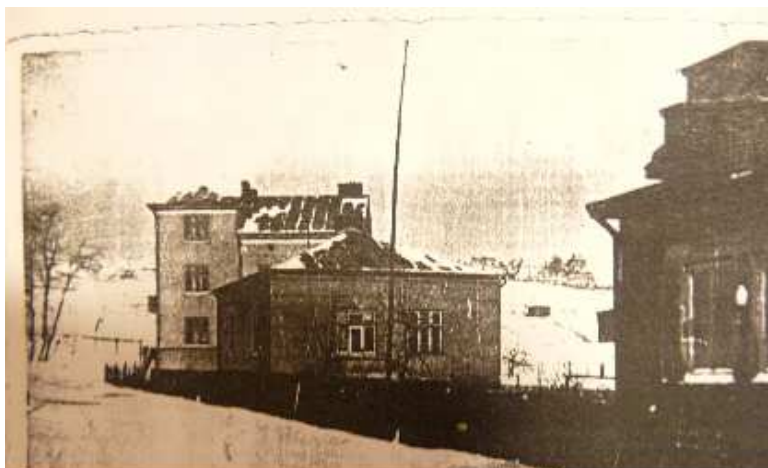


Il.15. Dom przy ul. Chrobrego  
Fig.15. House at the Chrobry street

### 3. Opis analizowanego budynku

Budynek wzniesiony w latach 30-tych XX wieku był domem wybudowanym na planie kwadratu o boku 11 metrów, z wysokim podpiwniczeniem i pod-

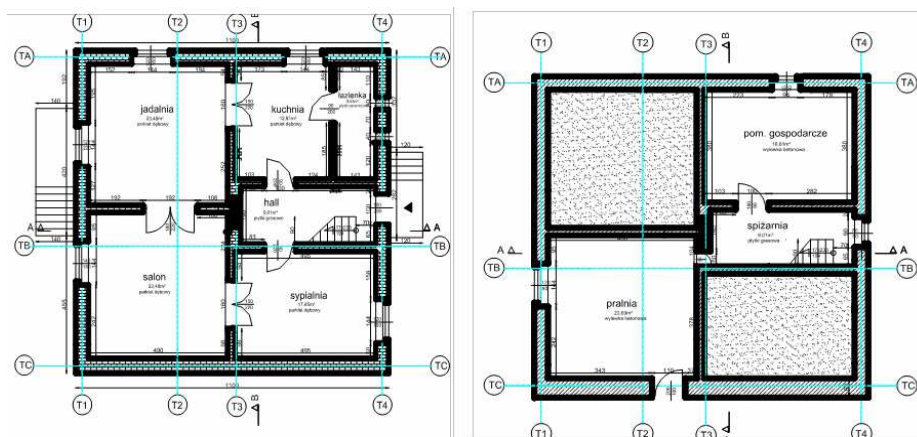
daszem nieużytkowym. Bryła budynku była prosta z dwoma gzymsami znajdującymi się pod linią dachu oraz na wysokości stropu między poddaszem, a parterem.



Il.16. Zdjęcie domu z lat 30-tych zbiory własne

Fig.16. The photography of a house, taken in 1930's Author's own sources

Część użytkowa budynku na parterze składała się z korytarza, kuchni, łazienki oraz trzech pokoi w układzie amfiladowym, z których jeden posiada wyjście na taras. W kondygnacji podziemnej ulokowana jest piwnica oraz pralnia, natomiast poddasze przeznaczone było na strych.



Il.17. Plan piwnic i parteru istniejącego domu przy ul. Naruszewicza

Fig.17. Schematics of the basement and the ground floor of a nexisting house at The Naruszewicz street

Podczas II wojny światowej w budynku mieściła się kwatera sztabu niemieckiego, natomiast w czerwcu 1941 roku dom został zbombardowany, co zostało uwiecznione na fotografii (Il.18).



Il.18. Zdjęcia domu z 1941 roku zbiory własne

Fig.18. The photograph of a house from 1941 Author's own sources



Il.19. Zdjęcia domu z lat 60 tych zbiory własne

Fig.19. The photograph of a house, taken in 1960's Author's own sources

Na początku lat 90 tych dobudowano do istniejącego domu, od strony wschodniej tzw. „dobudówkę”, co spowodowało utratę początkowego charakteru i bryły budynku.



Il.20. Zdjęcia domu od strony zachodniej  
Fig.20. Western elevation of the house



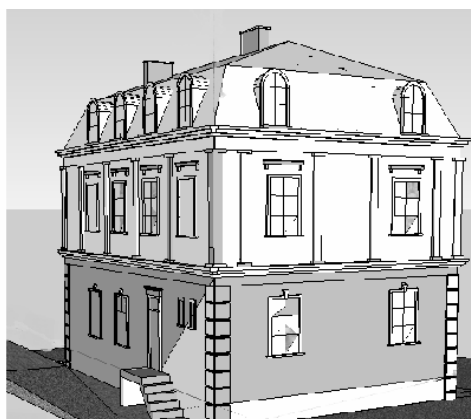
Il.21. Zdjęcia domu od strony południowej  
Fig.21. Southern elevation of the house

#### 4. Konceptcje rewitalizacji budynku

W ramach rozbudowy przeanalizowano trzy koncepcje modernizacyjne różniące się detalami architektonicznymi. Rodzaje zastosowanych zdobień elewacyjnych wzorowane były na zamieszczonych w [2]. Pierwsza koncepcja zakładała wykonanie dodatkowych dwóch kondygnacji użytkowych, z czego kondygnacja najwyższa zaproponowana została jako użytkowa przestrzeń poddaszowa o kształcie mansardowym. (Il.22-23).



Il.22. Elewacja południowo-zachodnia  
Fig.22. South-west elevation of the house



Il.23. Elewacja północno-zachodnia  
Fig.23. North-west elevation of the house

Druga koncepcja przewiduje umieszczenie środkowych wykuszy w mansardowej części poddaszowej od wschodniej i zachodniej strony budynku, który detalami architektonicznymi będzie nawiązywał do budynków z dzielnicy Winna Góra (Il.24-25).



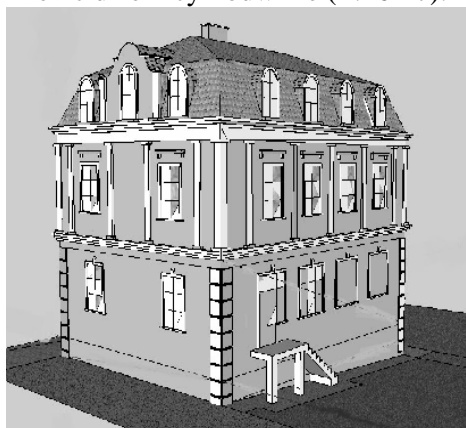


Il.24. Elewacja północno-zachodnia  
Fig.24. South-west elevation of the house

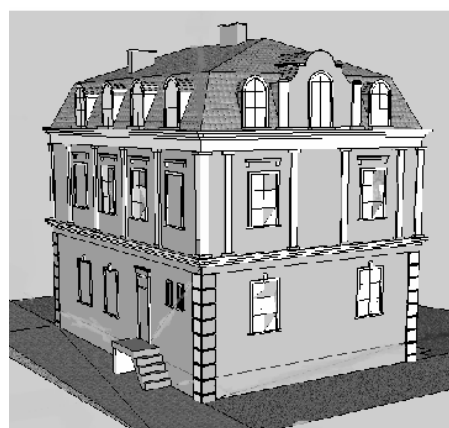


Il.25. Elewacja południowo-zachodnia  
Fig.25. North-west elevation of the house

W trzeciej koncepcji środkowe wykusze od wschodniej i zachodniej strony budynku otrzymały detale architektoniczne nawiązujące do zabytkowych kamienic dzielnicy Podwinie (Il.26-27).



Il.26. Elewacja południowo-zachodnia  
Fig.26. South-west elevation of the house



Il.27. Elewacja północno-zachodnia  
Fig.27. North-west elevation of the house

## 5. Podsumowanie

Projektowanie, realizacja i kształtowanie budynków jest to wieloetapowy proces, a ich modernizacja jest naturalną konsekwencją, wynikającą z potrzeb funkcjonalnych i technicznych.

Przedstawione w ramach niniejszego artykułu koncepcje modernizacji zabytkowego budynku wynikają z potrzeb powiększenia kubatury mieszkalnej. Modernizacja wpłynie na wygląd i gabaryty istniejącego budynku. Współczesne

potrzeby funkcjonalne powodują, że pomimo zatracania pierwotnego wyglądu budynków będzie architektonicznie wkomponowany w okoliczną zabudowę. Wiele sąsiednich budynków zostało rozbudowanych i powiększonych, uzyskując formę bardziej okazałą od stanu pierwotnego, co wpłynęło korzystnie na wygląd i estetykę całej dzielnicy.

Wydaje się, że trzecia koncepcja modernizacji budynku nawiązująca do otaczających budynków Podwinia, jest właściwym rozwiązaniem, uwzględniającym różnice między detalami architektonicznymi poszczególnych dzielnic, a zarazem poprawiającym komfort użytkowania obiektu przy zachowaniu architektonicznej ciągłości i spójności.

## Literatura

- [1] Joshua Hagen, *Rebuilding the Middle Ages after the Second World War: the cultural politics of reconstruction in Rothenburg ob der Tauber*. b.m.w. b.r.w.
- [2] Praca zbiorowa pod kierownictwem Lecha Lichołai *Budownictwo Ogólne. Tom 3 Elementy budynków. Podstawy projektowania.*, Warszawa 2010.
- [3] Mücahit Yildirim, Gizem Turan, *Sustainable development in historic areas: Adaptive re-use challenges in traditional houses in Sanliurfa, Turkey*. b.m.w. b.r.w.
- [4] Hulya Yuceer, Baaak Ipekoglu, *An architectural assessment method for new exterior additions to historic buildings*, b.m.w. b.r.w.
- [5] Bogusław Bobusia, Marek Gosztyła. Lech Lichołai *Plan Twierdzy Przemysł*, Przemysł 2010
- [6] Marek Gosztyła, Lech Lichołai *Techniki realizacyjne obiektów budowlanych Twierdzy Przemysł*, Zeszyt Naukowy Politechniki Rzeszowskiej Budownictwo i Inżynieria Środowiska nr 246, Rzeszów 2007
- [7] Marek Gosztyła, Lech Lichołai *Miejska infrastruktura wodociągowa Twierdzy Przemysł*, Zeszyt Naukowy Politechniki Rzeszowskiej Budownictwo i Inżynieria Środowiska nr 271, Rzeszów 2010
- [8] Marek Gosztyła, Lech Lichołai *Materiałowe rozwiązania budowlane stosowane w obiektach Twierdzy Przemysł* Wiadomości Konserwatorskie 22/2007, Warszawa 2007

## THE ASSESSMENT OF SCHEDULED BUILDING'S MODERNISATION POSSIBILITIES

### Summary

The purpose of this work is to analyse several concepts of modernisation of prewar building, located in the City of Przemysł. The analysis will consider the architecture of the building, as well as the architecture of its surrounding. This work describes several modernisation plans prepared for multiple buildings in Germany and Turkey. In case of those buildings, where only the technical reparation or functional adaptation has been found necessary, different approaches to the modernisation process has been presented.

Somme preservationists believe, that mentioned process is a great possibility too improve somme of the architectonic and functional characteristics of the object.

Three ideas of mentioned building's alteration has been introduced, and the most suitable one has been chosen to the further consideration. The chosen idea is based on overbuilding another storey and an attic, as well as on rebuilding the construction of the roof. In the another part of this work, the architectural analysis of detached houses located in two different districts of Przemysl has been conducted, analysed objects has been divided into proper groups.

An essential aspect of the modernisation of considered building is too shape the final object in such a way, to make its exterior architecturally coherent with its existing surrounding.

**Keywords:** scheduled building, prewar urban settlements, buildings' modernisation and alteration, architectural heritage

DOI:10.7862/rb.2014.103

*Przesłano do redakcji: 08.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Krzysztof NOWAK<sup>1</sup>

## WSPÓŁSPALANIE BIOMASY Z WĘGLEM W KOTŁACH ENERGETYCZNYCH

Jednym z głównych elementów polityki energetycznej Polski o coraz większym znaczeniu jest wzrost efektywności wykorzystania paliw i energii. Duże możliwości ograniczenia zużycia paliw kopalnych tkwią w systemach ciepłowniczych poczynając od wytwarzania, przesyłania i dystrybucji, a kończąc na odbiorcach racjonalizujących swoje zużycie ciepła. Zobowiązania przyjęte przez Polskę dotyczą również zwiększenia udziału paliw odnawialnych w bilansie energetycznym. Jednym z rozwiązań technologicznych wdrażania tych paliw jest współspalanie węgla i biomasy w kotłach energetycznych. Proces ten nie wymaga znaczących nakładów finansowych a dodatkowo charakteryzuje się pozytywnym efektem ekologicznym, energetycznym i ekonomicznym.

Celem niniejszej publikacji jest przedstawienie ogólnej charakterystyki paliw stałych i biomasy a także korzyści i wad wynikających z ich współspalania. Zaprezentowany został szczególnie ważny element, który pozwala określić efekt ekologiczny współspalania biomasy z węglem, a mianowicie wyniki badań wpływu dodatku biomasy do węgla kamiennego na emisję zanieczyszczeń gazowych zawartych w spalinach do atmosfery. Urządzenia wykorzystane do pomiarów stężeń zanieczyszczeń gazowych pozwalają na określenie ilości związków węgla, siarki i azotu oraz związków, których pomiary nie są określone żadnymi przepisami, m.in. związków chloru, wodoru, metanu, amoniaku oraz lotnych związków organicznych.

Niniejsza publikacja może poszerzyć wiedzę w zakresie procesów cieplnych w przypadku współspalania biomasy i węgla kamiennego oraz określić wpływ składu paliwa na emisję zanieczyszczeń gazowych w trakcie procesu spalania.

**Słowa kluczowe:** biomasa, węgiel kamienny, odnawialne źródła energii, współspalanie, stężenia zanieczyszczeń

### 1. Wstęp

Jednym z głównych elementów polityki energetycznej Polski jest wzrost efektywności wykorzystania paliw i energii. Wynika to m.in. z postępującego pogarszania się stanu środowiska oraz negatywnymi zmianami klimatycznymi.

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Krzysztof NOWAK, Politechnika Rzeszowska, al. Powstańców Warszawy 6, 35-959 Rzeszów, tel.: 17 865 12 63, krzynow@prz.edu.pl



W systemach ciepłowniczych, począwszy od wytwarzania przesyłania i dystrybucji a kończąc na odbiorcach racjonalizujących swoje zużycie ciepła, tkwią duże możliwości ograniczające zużycie paliw kopalnych. Zobowiązania przyjęte przez Polskę (m.in. pakiet energetyczno-klimatyczny „3x20”) dotyczą również zwiększenia udziału paliw odnawialnych w bilansie energetycznym. Efekty poprawy jakości powietrza będą wynikać z wykorzystania tych paliw, które w konsekwencji spowodują zmniejszenie emisji szkodliwych substancji do atmosfery powstających w wyniku spalania tradycyjnych nośników energii [8]. Jednym z rozwiązań technologicznych wykorzystywania tych paliw w procesie produkcji energii jest współspalanie węgla i biomasy w kotłach energetycznych.

Zwiększenie udziału energii odnawialnej w strukturze paliwowej, m.in. poprzez współspalanie, powoduje przede wszystkim obniżenie emisji gazów cieplarnianych. Zastosowanie biomasy w procesie współspalania charakteryzuje się również niskimi kosztami inwestycyjnymi przystosowania istniejących kotłów (np. w przypadku kotłów WR), ma duże znaczenie dla zwiększenia bezpieczeństwa dostaw energii i wspierania rozwoju technologicznego. Współspalanie paliw konwencjonalnych i biomasy ma również ogromne znaczenie w wymiarze społecznym, wpływa na wzrost zatrudnienia i rozwój regionalny.

Zgodnie z Dyrektywą Unijną nr 2009/28/WE [1] udział energii odnawialnej w całkowitym zużyciu energii do 2020 roku, powinien kształtować się na poziomie 20%. Osiągnięcie takich wskaźników możliwe będzie dzięki wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii (m.in. poprzez współspalanie) w procesach produkcji energii.

## 2. Charakterystyka węgla kamiennego i biomasy

Pod pojęciem węgla rozumie się paliwa stałe pochodzenia naturalnego lub otrzymane sztucznie, wykorzystywane m.in. jako źródło energii cieplnej do celów przemysłowych, technicznych, gospodarczych, itp.

W zależności od zawartości pierwiastka węgla w swoim składzie, paliwa stałe można podzielić na 6 podstawowych grup:

- drewno,
- torf,
- węgiel brunatny,
- węgiel kamienny,
- antracyt,
- grafit.

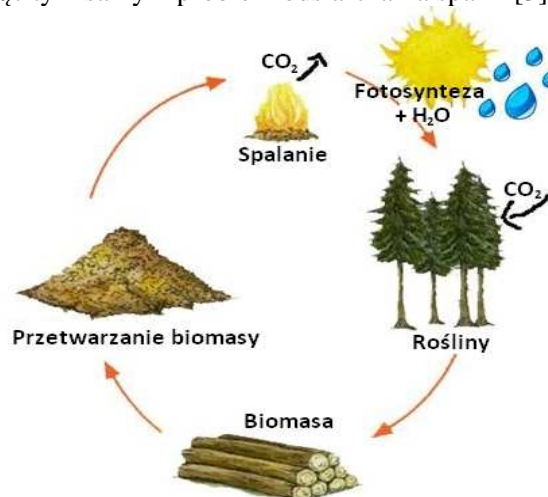
Popularnym paliwem stałym jest węgiel kamienny. Charakteryzuje się wysokim stopniem uwęglenia, a zatem wysoką zawartością pierwiastka węgla, niską zawartością wodoru, tlenu i wilgoci. Jego wartość opałowa waha się w granicach od 16,7 do około 30MJ/kg. Według raportu Państwowego Instytutu Geologicznego w Polsce zalega około 48 mln ton udokumentowanych geolo-

gicznych zasobów węgla kamiennego [2] Różne źródła szacują krajowe zasoby na 25 do 45 lat. Jest on popularnym paliwem w elektrowniach, elektrociepłowniach, hutach i fabrykach, ale jest również na szeroką skalę wykorzystywany jako paliwo do ogrzewania gospodarstw domowych. Mimo iż, węgiel kamienny jest jednym z najtańszych paliw energetycznych to podczas jego spalania do atmosfery emitowanych jest wiele szkodliwych substancji, m.in. tlenek siarki, tlenek azotu oraz ditlenek węgla powodujący efekt cieplarniany.

Biomasa to najstarsze i najszerzej współcześnie wykorzystywane odnawialne źródło energii. Stanowi trzecie co do wielkości na świecie naturalne źródło energii. Biomasa to cała istniejąca na Ziemi materia organiczna, wszystkie substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego ulegające biodegradacji.

Definicja tego paliwa jest szerokokorozumiana, według Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE biomasa to stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej oraz leśnej, a także przemysłu przetwarzającego ich produkty, a także części pozostałych odpadów, które ulegają biodegradacji [1].

Niewątpliwą zaletą spalania biomasy jest zerowy bilans emisji ditlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ), ponieważ tyle się go emituje do atmosfery, ile rośliny pobierają w procesie fotosyntezy (rys. 1). W przypadku wieloletnich roślin energetycznych (np. wierzby *Salix Virmiculis*), ilość pochłanianego  $\text{CO}_2$  może przewyższać ilość emitowanego dwutlenku węgla. Ze względu na znikomą ilość siarki w biomasie, zastępowanie nią węgla kamiennego wpływa również na obniżenie emisji tlenków siarki, rozwiązując tym samym problem odsiarczania spalin [3].



Rys. 1. Obieg ditlenku węgla w procesie spalania biomasy

Fig. 1. Carbon dioxide circulation in the combustion of biomass

Do celów energetycznych poszukiwane są następujące postacie biomasy [4]:

- drewno odpadowe w leśnictwie i przemyśle drzewnym oraz odpadowe opakowania drewniane,
- słoma – zbożowa, z roślin oleistych lub strączkowych oraz siano;
- plony z plantacji roślin energetycznych,
- odpady organiczne, gnojowica, osady ściekowe, osady ściekowe w przemyśle celulozowo-papierniczym, makulatura, odpady organiczne z cukrowni, roszarni lnu; gorzelni; browarów; itp.,
- biopaliwa płynne do celów transportowych, np. oleje roślinne, biodiesel, bioetanol z gorzelni i agorafinerii,
- biogaz z gnojowicy, osadów ściekowych i składowisk komunalnych.

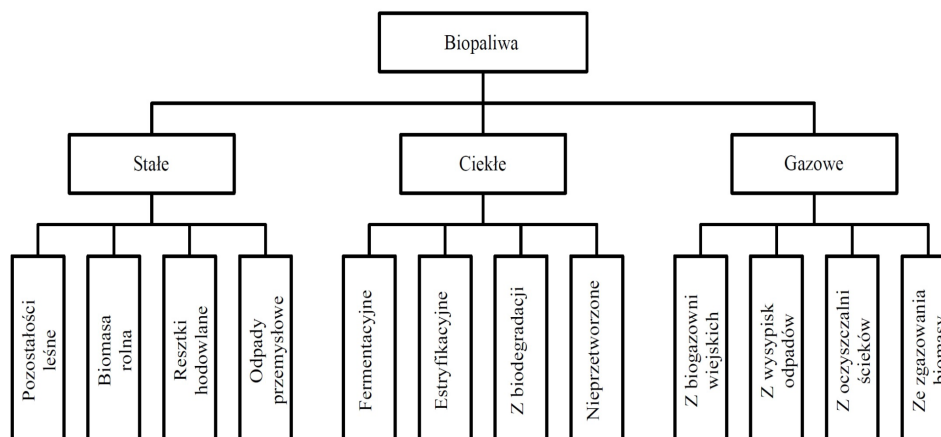
Pomimo korzystnych efektów ekologicznych, ekonomicznych i społecznych, stosowanie biomasy jako paliwa stwarza wiele problemów technicznych, z których najważniejsze to [4, 5, 6]:

- wysoka i w wielu przypadkach zmienna wilgotność powodująca trudności ze stabilizacją procesu spalania,
- niewielka gęstość biomasy, wpływająca na utrudnienia w transporcie, magazynowaniu i dozowaniu do paleniska ,a także przebieg i stabilność procesu spalania,
- wysoka zawartość części lotnych, powodująca szybki i trudny do kontroli przebieg procesu spalania,
- w porównaniu do konwencjonalnych paliw stosunkowo niskie ciepło spalania na jednostkę masy,
- skład chemiczny (obecność takich pierwiastków, jak tlen, azot, chlor) i często jego duża niejednorodność może prowadzić do emitowania w procesie spalania chlorowodoru, dioksyn i furanów.

W wyniku mechanicznego, termicznego lub chemicznego przetworzenia biomasy uzyskuje się biopaliwo, które w następnej kolejności może być wykorzystane w energetyce, komunikacji, rolnictwie, budownictwie i przemyśle. Przetworzona biomasa w biopaliwo nabywa wiele pozytywnych cech, takich jak [7]:

- zwiększenie koncentracji energii,
- ujednorodnienie,
- usunięcie odorów,
- zwiększenie udziałów pożądaných składników,
- pozbycie się składników szkodliwych lub balastowych.

Na rys. 2 przedstawiony został podział biopaliw ze względu na stan skupienia.



Rys. 2. Podział biopaliw ze względu na stan skupienia, na podstawie [7]

Fig. 2. Division of biofuels considering the physical state, based on [7]

Biopaliwo w wyniku konwersji zawartej w nim energii chemicznej można przetworzyć na energię cieplną, elektryczną lub mechaniczną.

### 3. Współspalanie węgla kamiennego i biomasy

Racjonalne wykorzystanie odnawialnych zasobów energii odnawialnej jest jednym z ważniejszych elementów zrównoważonego rozwoju Polski.

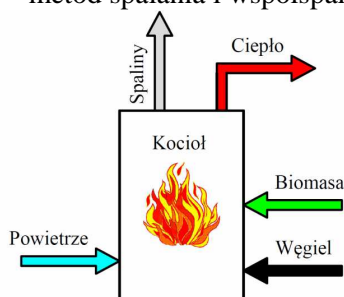
Stopień wykorzystania źródeł energii odnawialnej (w tym biomasy) jest uzależniony od wielkości zasobów oraz technologii przetwarzania.

Dużym zainteresowaniem wśród producentów energii cieplnej i elektrycznej cieszą się technologie umożliwiające współspalanie biomasy z węglem. Proces ten może się odbywać w już istniejących kotłach energetycznych. Rozwiązanie to wydaje się najszybszą drogą prowadzącą do wykorzystania biomasy w jednostkach wytwórczych o dużych mocach przy jednoczesnym zapewnieniu wysokiej sprawności konwersji energii chemicznej zawartej w spalonym paliwie [9].

Pod pojęciem współspalania paliw stałych i biomasy rozumie się zespół procesów polegających na spalaniu węgla z różnego rodzaju odpowiednio dobranymi biopaliwami stałymi lub produktami pochodzącymi z ich przetworstwa. Technologia współspalania łączy ze sobą wykorzystanie odnawialnych źródeł energii z użytkowaniem energii z paliw kopalnych. Proces współspalania może być realizowany w kilku wariantach technologicznych:

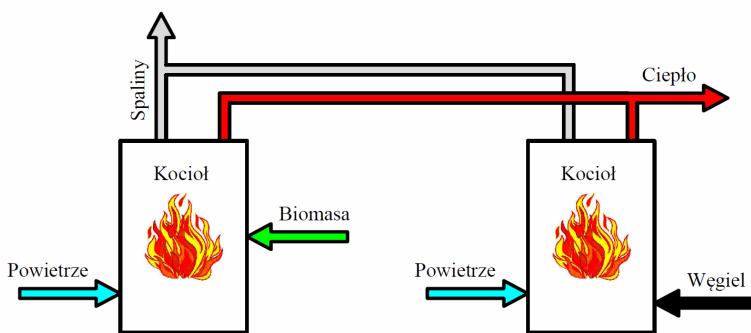
- współspalania w układzie bezpośrednim (rys. 3) – podczas procesu spalania doprowadzany jest strumień węgla i biomasy lub ich odpowiednia mieszanka,

- współspalania w układzie równoległym (rys. 4) – węgiel i biomasa spalane są w osobnych komorach spalania z zachowaniem indywidualnych wymogów odnośnie procesu spalania,
- współspalania pośredniego w przedpalenisku (rys. 5) – biomasa spalana jest w przedpalenisku, skąd wytworzone ciepło w postaci spalin doprowadzane jest do głównej komory spalania,
- współspalania pośredniego poprzedzonego zgazowaniem (rys. 6) – biomasa poddana jest procesowi zgazowania, otrzymany gaz zostaje doprowadzony i spalany w głównej komorze spalania,
- technologie mieszane współspalania (rys. 7) – jest to kombinacja różnych metod spalania i współspalania biomasy oraz węgla.



Rys. 3. Przykładowa technologia współspalania biomasy i węgla w układzie bezpośrednim

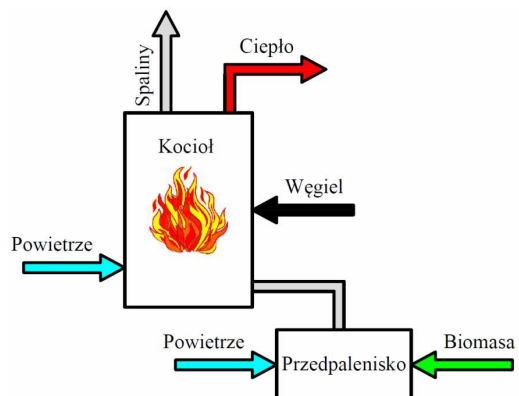
Rys. 3. Co-combustion technology biomass and coal on direct system



Rys. 4. Przykładowa technologia współspalania biomasy i węgla w układzie równoległym

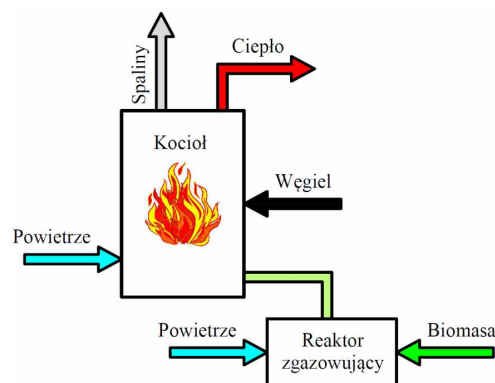
Fig. 4. Co-combustion technology biomass and coal on parallel system

Ze względu na stosunkowo niskie nakłady inwestycyjne oraz możliwość przystosowania istniejących kotłów, najpopularniejszymi metodami współspalania biomasy i węgla jest współspalanie w układzie bezpośrednim i równoległym.



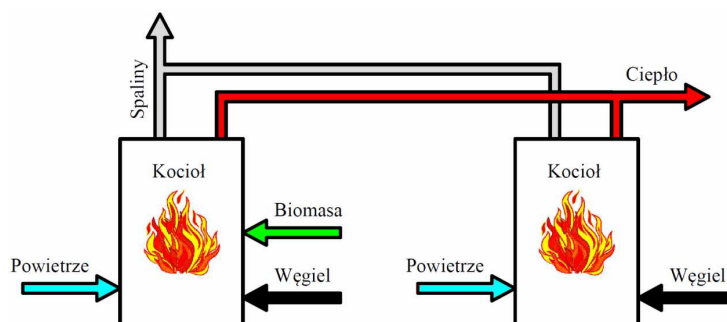
Rys. 5. Przykładowa technologia współspalania pośredniego biomasy i węgla w przedpalenisku

Fig. 5. Indirect co-combustion technology biomass and coal on dutch oven



Rys. 6. Przykładowa technologia pośredniego współspalania węgla i biomasy poprzedzonego zgazowaniem

Fig. 6. Indirect co-combustion technology coal and biomass preceded by gasification



Rys. 7. Przykładowa technologia mieszane spalania oraz współspalania biomasy i węgla

Fig. 7. Mixed combustion and co-combustion technology coal and biomass

#### 4. Badania procesów współspalania biomasy i węgla w istniejących kotłach energetycznych

Konstrukcja węglowych kotłów energetycznych to rezultat ponad stu lat badań i doświadczeń eksploatacyjnych spalania węgla [7]. Prowadzony w nich proces współspalania węgla i biomasy nie może odbywać się w sposób mimowolny, a musi uwzględniać wszelkie efekty techniczne (m.in.: przepalenia kotłów, zatarcia rusztów, korozję wymienników) jak i efekty ekologiczne i ekonomiczne. W związku z powyższym, badania procesów współspalania są bardzo ważne.

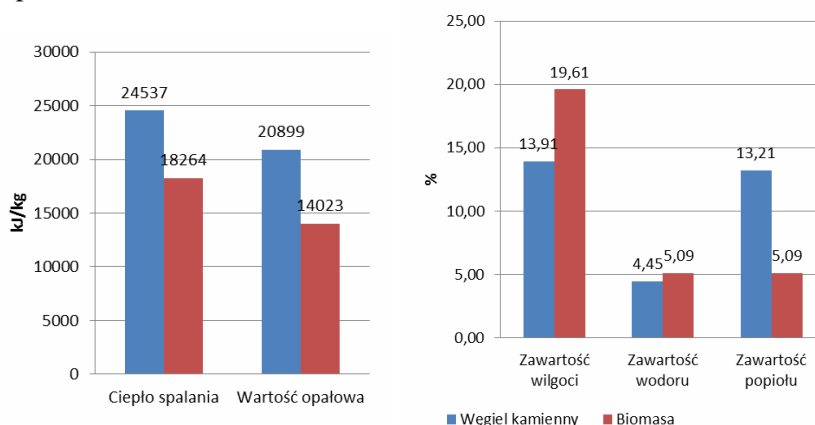
W niniejszej pracy zostały przedstawione przeprowadzone wstępne badania współspalania różnych mieszanek biomasy i węgla kamiennego w układzie bezpośrednim w kotle wodnym rusztowym WR-10. Spalaną biomasą były zrębki drzewne pochodzące z zakładów meblowych.

Kocioł pracował ze stałym obciążeniem cieplnym, wynoszącym 2 MW. Procesowi spalania poddano mieszankę 25%, 50% oraz 70% biomasy i węgla kamiennego. Sprawność kotła została wyznaczona metodą bezpośrednią. Badania podstawowych parametrów węgla kamiennego i biomasy wykonano według norm za pomocą kalorymetru Parr 6300.

Stężenia zanieczyszczeń w gazach spalinowych przeprowadzono zgodnie z normami przy użyciu nowoczesnego wieloparametrowego analizatora gazów Gasmat DX-4000 oraz analizatora lotnych związków organicznych J.U.M OVF-3000.

Celem badań było określenie wpływu spalanej mieszanki paliw w kotle węglowym na zmianę sprawności, parametrów pracy kotła oraz efekty środowiskowe. Przebadano następujące parametry:

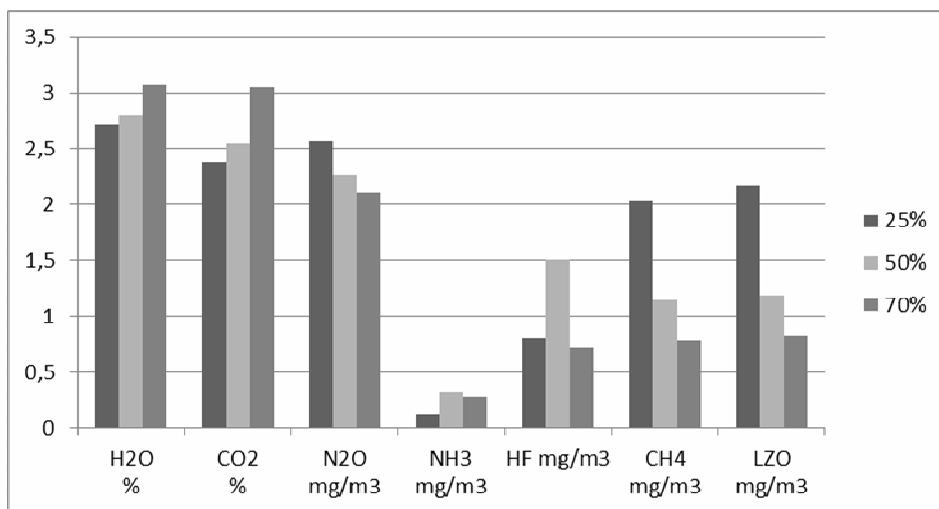
- podstawowe parametry paliw,
- stężenia zanieczyszczeń gazowych,
- moc kotła,
- sprawność kotła.



Rys. 8. Podstawowe parametry węgla kamiennego i biomasy

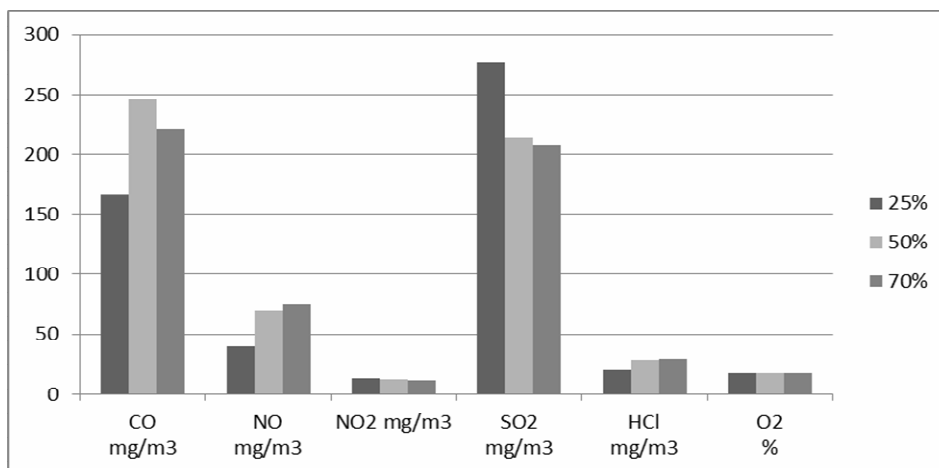
Fig. 8. Basic parameters of coal and biomass

Na podstawie powyższych wykresów (rys. 8) można zauważyć, iż ciepło spalania biomasy jest niższe o około 25%, a wartość opałowa o ponad 30% w porównaniu do węgla kamiennego. Wynika to m. in. ze znacznie wyższej zawartości wilgoci w biomasy. Zawartości wodoru w obu paliwach są zbliżone. Węgiel charakteryzuje się dużo wyższą zawartością popiołu, tj. 2,5 krotnie wyższą niż w przypadku biomasy.



Rys. 9. Wielkości stężeń zanieczyszczeń z procesów spalania 25%, 50% i 70% mieszanki biomasy i węgla kamiennego

Fig. 9. Concentration levels of pollutants from combustion of 25%, 50% and 70% blends of biomass and coal



Rys. 10. Wielkości stężeń zanieczyszczeń z procesów spalania 25%, 50% i 70% mieszanki biomasy i węgla kamiennego

Fig. 10. Concentration levels of pollutants from combustion of 25%, 50% and 70% blends of biomass and coal

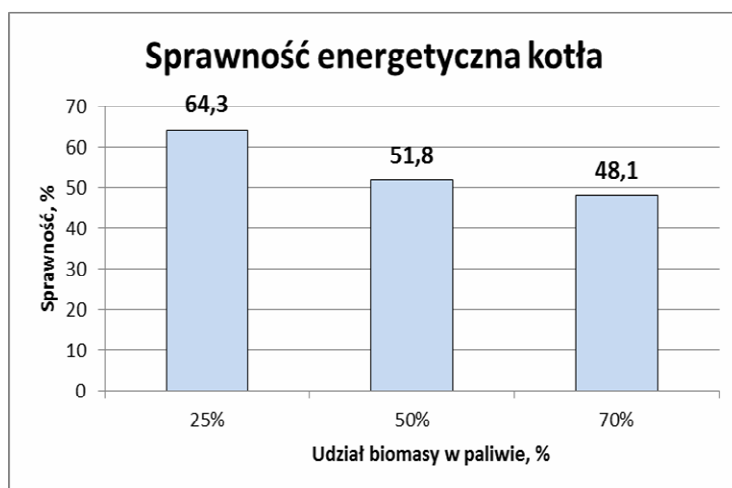


Na powyższych wykresach (rys. 9, rys. 10) przedstawione zostały wstępne wyniki badań otrzymane w procesie współspalania 25%, 50% i 70% mieszanki biomasy oraz węgla kamiennego. Charakter zmian zachowany jest dla większości analizowanych zanieczyszczeń. Wraz ze wzrostem udziału biomasy w całkowitej masie spalanego paliwa, maleje stężenie podtlenku azotu ( $N_2O$ ), ditlenku azotu ( $NO_2$ ), metanu ( $CH_4$ ), lotnych związków organicznych (LZO), ditlenku siarki ( $SO_2$ ) oraz tlenu ( $O_2$ ). Pozostałe stężenia zanieczyszczeń rosną lub charakter ich jest zmienny.

Niewątpliwą zaletą współspalania biomasy jest znaczna redukcja szkodliwych zanieczyszczeń, takich jak: ditlenek siarki, podtlenek azotu i ditlenek azotu co można zauważyć na wykresach (rys. 9, rys. 10). Wraz ze zwiększaniem udziału biomasy w spalanej paliwie wielkości stężeń tych związków maleją.

Na wykresie (rys. 9), można zaobserwować wzrost stężeń ditlenku węgla ( $CO_2$ ) wraz ze zwiększającym się udziałem biomasy. W rzeczywistości jednak wielkości emitowana do atmosfery jest w ogólnym bilansie zerowa, gdyż biomasa uwalnia do atmosfery równoważną ilość jaką była w stanie przyswoić w procesie fotosyntezy.

Wraz ze wzrostem udziału biomasy w mieszance spalanego paliwa oprócz pozytywnych aspektów środowiskowych, można zaobserwować negatywny efekt technologiczny, tj. spadek parametrów pracy kotła co wpływa na jego sprawność (rys. 11). W przypadku 25% biomasy w spalanej mieszance sprawność energetyczna kotła wynosi około 64%. Zwiększenie udziału biomasy do 70% skutkuje spadkiem sprawności do około 48%.



Rys. 11. Sprawność kotła WR-10, podczas spalania 25%, 50% i 70% mieszanki biomasy i węgla kamiennego

Fig. 11. Efficiency of the WR-10 boiler, during combustion of 25%, 50% and 70% of a mixture of coal and biomass

## 5. Wnioski

W odniesieniu do ustaw oraz zobowiązań przyjętych przez Polskę celem jest podjęcie badań mających na celu ocenę wpływu stosowania biomasy jako dodatku do paliw kopalnych.

Na podstawie informacji zawartych w literaturze oraz własnych badań i analiz, podczas wyboru mieszanki należy rozważyć dwa aspekty, środowiskowy i sprawnościowy. Wraz ze wzrostem biomasy w mieszance zmniejsza się stężenie gazów cieplarnianych, niektórych związków azotu, siarki i węglodorów co jednak negatywnie odbija się na sprawność kotła.

Podjęte badania i analizy mogą być pomocne w określeniu optymalnej wartości biomasy w paliwie, przy której sprawność wytwarzania ciepła będzie najlepsza, a stężenia zanieczyszczeń najniższe.

## Literatura

- [1] Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych zmieniająca
- [2] Gawlik L, Węgiel kamienny energetyczny - perspektywy rozwoju w świetle priorytetów środowiskowych, IGSMiE PAN — Wydawnictwo, Kraków 2011
- [3] Kubica K., Spalanie biomasy i jej współspalanie z węglem – techniki, korzyści i bariery
- [4] Głodek E., Spalanie i współspalanie biomasy – poradnik, Opole 2010
- [5] Werther J., Saenger M., Hartge E.-U., Ogada T., Siagi Z., Combustion of agricultural residues, Progress in Energy and Combustion Science, 26, 2000
- [6] Balatinecz J.J., The potential of densification in biomass utilisation, w: Cote WA, editor: Biomass utilization, London, Plenum Press, pp.1 81-189, 1983
- [7] Lewandowski Witold M., Ryms M., Biopaliwa – proekologiczne źródła odnawialne, Wydawnictwo WNT, 2013
- [8] Proszak-Miąsik D., Nowak K., Rabczak S., Wykorzystanie energii słonecznej jako jednego z czynników poprawiających jakość powietrza, Journal of Civil Engineering, Environment and Architecture, JCEEA, t. XXX, z. 60, Rzeszów 2013
- [9] Ściążko M., Zuwała J., Pronobis M., Zalety i wady współspalania biomasy w kotłach energetycznych na tle doświadczeń eksploatacyjnych pierwszego roku współspalania biomasy na skalę przemysłową, Oficyna Wydawnicza Energia, 2006

## CO-COMBUSTION BIOMASS AND CARBON IN ENERGETIC BOILERS

### Summary

One of the main elements of the Polish energy policy is to increase the fuel efficiency and power. Great potential for reducing consumption of fossil fuels stuck in heating systems ranging from generation, transmission and distribution and ending with the the recipients rationalize their consumption of heat. Obligations assumed by Poland also apply to increase the share of renewable fuels in the energy balance. One of the technological solutions implementation of these fossil fuels is co-combustion coal and biomass in power boilers. This process does not require significant financial investment and further characterized by the positive effect of ecological, energy and economic.

The purpose of this publication is to present the general characteristics of solid fuels and biomass as well as the advantages and disadvantages arising from their co-combustion. Presented a particularly important element, which allows to determine the effect of ecological co-firing of biomass with coal, namely the results of the effect of addition of biomass to coal on the emission of gaseous pollutants to the atmosphere. Device used to measure the concentrations of gaseous pollutants allow determining the amount of carbon, sulfur and nitrogen compounds, which measurement is not defined any rules, including chlorine compounds, hydrogen, methane, ammonia and volatile organic compounds. This publication may expand the knowledge of thermal processes in the case of co-combustion biomass and coal and determine the impact of fuel composition on the emission of gaseous pollutants during the combustion process.

**Keywords:** biomass, coal, renewable energy, co-combustion, pollutant concentrations

DOI:10.7862/rb.2014.104

*Przesłano do redakcji: 26.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Katarzyna NOWAK – DZIESZKO<sup>1</sup>  
Małgorzata ROJEWSKA – WARCHAŁ<sup>2</sup>  
Jacek DĘBOWSKI<sup>3</sup>

## MOSTKI TERMICZNE W BUDYNKACH WIELKOPŁYTOWYCH PRZED I PO DOCIEPLENIU

Powszechnie wiadomo, że zabiegi termomodernizacyjne istniejących budynków prowadzą do redukcji zużycia energii na cele ogrzewania. W ostatnich kilkunastu latach tymże zabiegom poddano tysiące budynków wielorodzinnych wzniesionych w technologii wielkiej płyty w latach 60 – tych i 70 – tych XX wieku. Dominującym kryterium podczas tzw. szeroko rozumianej termomodernizacji budynków systemowych, jest poprawa charakterystyki energetycznej ścian, w ramach której podejmowane są jedynie działania dociepleniowe ścian zewnętrznych. Zwykle dociepleni nie poddaje się stropów nad najwyższą kondygnacją oraz nad piwnicą i przede wszystkim systemów naturalnej wentylacji. W ramach zabiegów dociepleniowych ścian zewnętrznych pomijana jest zwykle kompleksowa analiza cieplna obudowy budynku z uwzględnieniem tak istotnego w bilansie energetycznym wpływu mostków cieplnych, szczególnie tych występujących w miejscach połączeń systemowych, które są jednym z głównych problemów w tego typu budynkach. Złącza systemowe są niewątpliwymi punktami konstrukcji, tzw. mostkami termicznymi, w których nie można założyć jednowymiarowego przepływu ciepła. Niestety skomplikowanego wielowymiarowego przepływu ciepła w miejscach mostków cieplnych nie daje się opisać prostymi metodami analitycznymi, dlatego też konieczne jest stosowanie metod obliczeniowych bazujących na MES (Metodzie Elementów Skończonych). W artykule przedstawiono analizę trzech wybranych mostków cieplnych w wielorodzinnym budynku systemowym W70. Analiza została przeprowadzona przy użyciu programu AnTherm i pozwoliła na wyznaczenie tzw. liniowych współczynników przenikania ciepła oraz temperatury krytycznej powierzchni, poniżej której zachodzi ryzyko powstania pleśni na powierzchni wewnętrznej przegrody.

**Słowa kluczowe:** budynek wielkopłytowy, system W70, mostki cieplne, złącza systemowe, AnTherm.

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: mgr inż. Katarzyna Nowak – Dzieszko, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31–155 Kraków, tel. 12 628 23 17, knowakdzieszko@o2.pl

<sup>2</sup> mgr inż. Małgorzata Rojewska – Warchał, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31–155 Kraków, tel. 12 628 21 32, m\_rojewska@wp.pl

<sup>3</sup> dr inż. Jacek Dębowski, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31–155 Kraków, tel. 12 628 23 17, jdebowski@pk.edu.pl. Artykuł przygotowano w ramach prac L-1/116/DS/2013

## 1. Mostki cieplne w modernizowanych budynkach

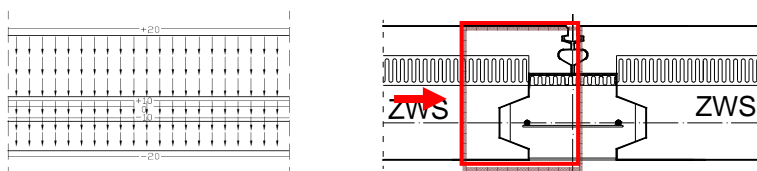
Z ogólnych, powszechnie wszystkim znanych, założeń w projektowaniu izolacyjności przegród budowlanych przyjmowane jest najczęściej tylko kryterium grubości izolacji termicznej dobieranej tak, aby spełnione były wymagania WT [1] co do wartości współczynnika przenikania ciepła  $U$ , od 1 stycznia 2014 roku wartość  $U$  dla ściany zewnętrznej nie powinna przekraczać  $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Mało tego wymagane wartości współczynnika przenikania ciepła będą ulegały kolejnym zmianom:  $0,23$  od 1 stycznia 2017 r.,  $0,20$  od 1 stycznia 2021 r. Nie jest to do końca właściwa interpretacja, gdyż zgodnie z zasadami fizyki budowlanej o izolacyjności przegrody nie decyduje wartość współczynnika  $U$  lecz tzw. gęstość strumienia cieplnego. Ponadto najczęściej rozważana jest tylko płaska przegroda jednorodna lub warstwowa złożona z materiałów jednorodnych o stałej grubości, w której przepływ ciepła (strumień) jest jednowymiarowy i wtedy jego gęstość określa się wzorem:

$$q = U(t_i - t_e) \quad (1)$$

gdzie:

- $q$  – gęstość strumienia cieplnego [ $\text{W/m}^2$ ],
- $U$  – współczynnik przenikania ciepła [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ],
- $t_i$  – obliczeniowa temperatura wewnętrzna [K],
- $t_e$  – obliczeniowa temperatura zewnętrzna [K].

W tak określonym sposobie przepływu ciepła przez przegrodę, izotermy są równoległe, natomiast linie gęstości strumienia cieplnego prostopadłe do powierzchni przegrody (Rys.1).



Rys. 1. Rozkład temperatur oraz gęstości strumienia cieplnego w przegrodzie jednorodnej oraz miejsce w elemencie wielkopłytyowym, w którym ten rozkład może zostać uwzględniony

Fig. 1. Temperature distribution and air flow rate in the homogenous component and the prefabricated element where this specific distribution can be noticeable.

W rzeczywistych przegrodach budowlanych, a szczególnie w budynkach systemowych, występują liczne przypadki odbiegające od schematu przegrody jednorodnej. W wyniku zmian geometrii wymuszonych konstrukcyjnie lub materiałowo, w przegrodzie może występować dwu lub trójwymiarowy przepływ ciepła, a wszelkie tego typu odstępstwa prowadzą do odchylenia izoterm i linii gęstości strumienia cieplnego w stosunku do nakreślonego powyżej układu.

Prowadzi to również do znacznych zaburzeń rozkładu temperatur w i na powierzchniach przegród.

Niestety takiego rodzaju przepływu nie daje się opisać prostymi metodami analitycznymi, dlatego też konieczne jest stosowanie metod obliczeniowych bazujących na MES (Metodzie Elementów Skończonych).

## 2. Ryzyko powstania pleśni

W miejscach występowania mostków termicznych, temperatura powierzchni wewnętrznej przegrody jest dużo niższa od temperatury przegrody co powoduje zwiększone ryzyko pojawienia się pleśnienia w tych niewralgicznych punktach konstrukcji.

Ryzyko powstania pleśni na powierzchni przegrody ocenia się na podstawie PN-EN 13788 [3] w oparciu o wartość bezwymiarowego współczynnika temperaturowego  $f_{Rsi}$ , (wzór 2) będącego funkcją temperatury wewnętrznej, zewnętrznej oraz temperatury powierzchni przegrody  $\theta_{si}$ , która zależy od mikroklimatu wewnątrz pomieszczenia.

$$f_{Rsi} = \frac{\theta_{si} - \theta_e}{\theta_i - \theta_e} \quad (2)$$

gdzie:

- $\theta_{si}$  – temperatura wewnętrznej powierzchni przegrody zewnętrznej, °C,
- $\theta_i$  – temperatura środowiska wewnętrznego, °C,
- $\theta_e$  – temperatura środowiska zewnętrznego, °C.

Ponadto na podstawie minimalnej dopuszczalnej temperatury powierzchni  $\theta_{si, min}$ , poniżej której wilgotność względna na powierzchni przekroczy wartość 80% określa się minimalny czynnik temperaturowy  $f_{Rsimin}$  dla poszczególnych miesięcy w roku, a krytycznym miesiącem jest ten, w którym wymagana wartość  $f_{Rsimin}$  jest największa.

Im większa jest wartość współczynnika temperaturowego  $f_{Rsi}$ , tym wyższa jest wartość temperatury  $\theta_{si}$ , a ryzyko kondensacji powierzchniowej mniejsze. Wymaganie dotyczące zabezpieczenia przed powstaniem pleśni jest spełnione jeśli wartość współczynnika  $f_{Rsi}$  jest większa od jego minimalnej wartości  $f_{Rsimin}$  podanej w przepisach budowlanych lub normie narodowej. Według WT [1], dopuszcza się przyjmowanie minimalnej wartości  $f_{Rsi}$  równej 0,72.

### 3. Analiza wybranych mostków systemowych

Głównym celem analizy mostka termicznego jest wyznaczenie rozkładu temperatur w analizowanym złączu oraz minimalnej temperatury powierzchni wewnętrznej  $\theta_{si, \min}$ . Po przyjęciu warunków brzegowych, na podstawie minimalnej temperatury w analizowanym węźle, wyznaczany jest czynnik  $f_{Rsi}$ . Kolejny etap to wyznaczenie dodatkowych strat ciepła, występujących w miejscu mostków cieplnych, określanych za pomocą liniowego współczynnika przenikania ciepła  $\Psi$  [W/mK]. Określa on wartość dodatkowego strumienia cieplnego wywołanego przez mostek, w odniesieniu do strumienia cieplnego płynącego w polu jednowymiarowym. Na podstawie wzoru (3) możemy wyznaczyć współczynnik strat ciepła w wyniku przenikania przez obudowę budynku. Pierwsza część równania opisuje jednowymiarowy przepływ ciepła przez pole powierzchni  $A$  przegrody w współczynniku przenikania ciepła  $U$ . Druga część równania opisuje dodatkowe straty ciepła przez mostek o współczynniku przenikania ciepła  $\Psi$  i długości  $l$ .

$$H_{tr} = \sum_i A_i \cdot U_i + \sum_i l_i \cdot \psi_i \quad [W/K] \quad (3)$$

gdzie:

$A_i$  – pole powierzchni  $i$ -tej przegrody [ $m^2$ ]

$U_i$  – współczynnik przenikania ciepła  $i$ -tej przegrody [ $W/m^2K$ ]

$l_i$  – długość  $i$ -tego liniowego mostka cieplnego [ $m$ ]

$\psi_i$  – liniowy współczynnik przenikania ciepła mostka cieplnego [ $W/mK$ ]

Wartości współczynników  $\Psi$  mogą być przyjmowane na podstawie normy PN-EN ISO 14683 [4], jednakże są one mało precyzyjne i nie wyczerpują wszystkich rozwiązań konstrukcyjno-materiałowych, przede wszystkim typowych tylko dla konstrukcji prefabrykowanych złączy systemowych, dlatego uzasadnione jest wykorzystanie metod numerycznych przy analizie tego typu złączy.

Poniżej przedstawiono wyniki analizy dwóch złączy systemowych budynku w systemie W70, które będą częścią tworzonego przez autorów katalogu mostków systemowych.

#### 1. Połączenie pionowe ścian szczytowych.

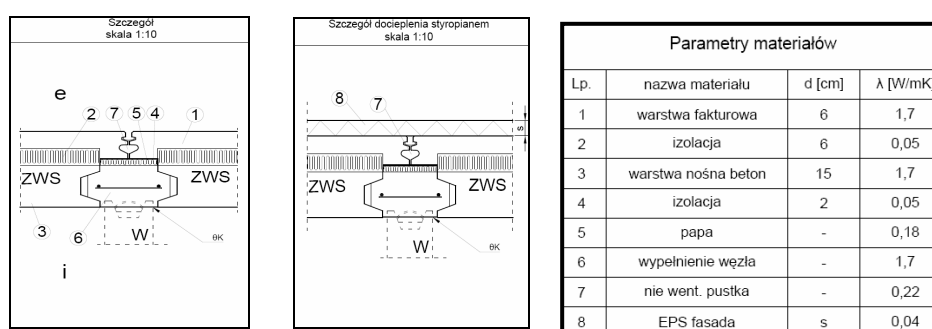
#### 2. Płyta balkonowa.

W obu przypadkach obliczenia przeprowadzono dla czterech wariantów: ściana zewnętrzna bez docieplenia, ściana zewnętrzna ocieplona odpowiednio 5cm, 10cm, 15cm styropianu.

Analizę parametrów ciepłno wilgotnościowych wybranych mostków termicznych przeprowadzono za pomocą programu AnTherm. Do obliczeń, jako  $\theta_e$  przyjęto, zgodnie z PN-EN ISO 13788 [3] minimalną średnią miesięczną tem-

peraturę termometru suchego z klimatycznych danych statystycznych dla stacji meteorologicznej Kraków-Balice, wynoszącą  $-2,6^{\circ}\text{C}$ . Natomiast jako  $\theta_i$  przyjęto wg WT [1] wartość  $20^{\circ}\text{C}$ . Dodatkowo w przytaczanych przykładach zamieszczono maksymalną wartość wilgotności względnej powietrza wewnętrznego  $\varphi_{\max}$ , przy której, dla powyższych warunków temperaturowych, nie zajdzie ryzyko powstania pleśni.

### 3.1. Złącze nr 1 – Połączenie pionowe ścian szczytowych (ze ścianą zewnętrzną)



Rys. 2. Detal złącza systemowego przed dociepleniem i po dociepleniu, parametry materiałów złącza.

Fig. 2. System joint connection detail before and after insulation, parameters of materials.

Tabela 1. Wyniki obliczeń

Table 1. Calculation results

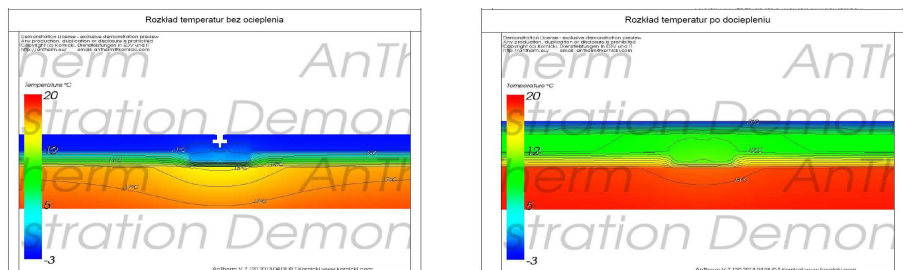
Parametry w zależności od grubości docieplenia				
$\lambda$ [W/mK]	0,04			
s [cm]	0	5	10	15
U [W/m <sup>2</sup> K]	0,669	0,364	0,25	0,191
$\Psi_e$ [W/mK]	0,169	0,042	0,019	0,012
$\theta_K$ [°C]	17,15	18,62	19,08	19,31
f.rsi	0,87	0,94	0,96	0,97
$\varphi_{\max}$ [%]	83,64	91,78	94,4	95,8

Z przeprowadzonych analiz złącza nr 1 wynika, że:

1. Wartość współczynnika przenikania ciepła uległa znacznej poprawie, docieplenie ściany pięcioma centymetrami styropianu zmniejszyło wartość U z  $0,67 \text{ W/m}^2\text{K}$  do  $0,36 \text{ W/m}^2\text{K}$ , kolejne 5 cm obniżyło wartość do  $0,25 \text{ W/m}^2\text{K}$ . Wartość ta spełnia wymogi Warunków Technicznych obowiązujących od 1 stycznia 2014. Docieplenie ściany 15 cm izolacji zmniejsz-



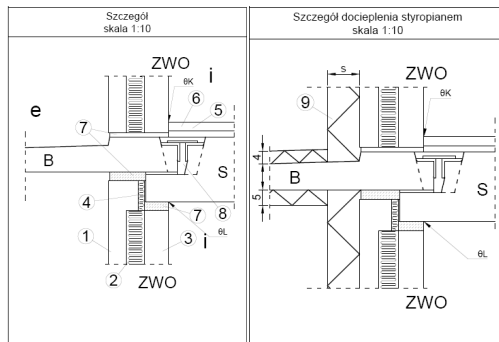
- szyłoby wartość  $U$  aż do  $0,19 \text{ W/m}^2\text{K}$  (wartość obowiązująca od 1 stycznia 2021 roku).
2. Wartość liniowego współczynnika  $\Psi_e$ , po dociepleniu przegrody 10 cm styropianu zmalała prawie dziesięciokrotnie z  $0,17$  do  $0,019$ . Dalsze zwiększanie grubości docieplenia powoduje dalsze obniżanie wartości  $\Psi$ , jednakże już nie tak znaczące.
  3. Temperatura powierzchni wewnętrznej wpływająca na ewentualne ryzyko rozwoju pleśni wzrosła z  $17,2^\circ\text{C}$  do  $18,6^\circ\text{C}$  i kolejno aż do wartości  $19,3^\circ\text{C}$ . Czynniki temperaturowy w przypadku tego złącza we wszystkich przypadkach jest większy niż dopuszczalna wartość  $0,72$ .



Rys. 3. Rozkład temperatury w mostku przed i po dociepleniu

Fig. 3. Temperature distribution in the thermal bridge before and after insulation

### 3.2. Złącze nr 2 – Płyta balkonowa



Rys. 4. Detal złącza systemowego przed i po dociepleniu

Fig. 4. System joint connection detail before and after insulation

Tabela 2. Parametry materiałowe

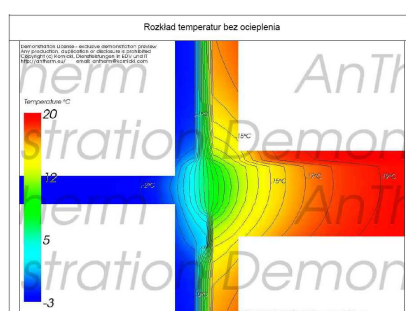
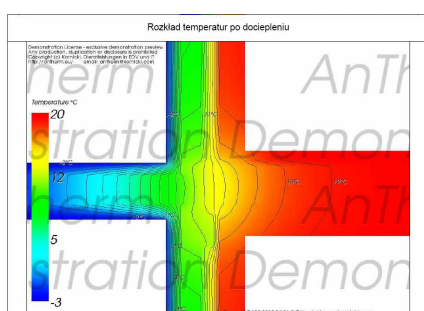
Table 2. Material parameters

Parametry materiałów			
Lp.	nazwa materiału	d [cm]	$\lambda$ [W/mK]
1	warstwa fakturowa	6	1,7
2	izolacja	6	0,05
3	warstwa nośna beton	8	1,7
4	izolacja	2	0,05
5	piłsnia	2	0,07
6	zaprawa cem.	3	1
7	zaprawa cem.	-	1
8	wypełnienie węzła	-	1,7
9	EPS fasada	s	0,04

Tabela 3. Wyniki obliczeń

Table 3. Calculation results

Parametry w zależności od grubości docieplenia				
$\lambda$ [W/mK]	0,04			
s [cm]	0	5	10	15
U [W/m <sup>2</sup> K]	0,689	0,37	0,253	0,192
$\Psi_e$ [W/mK]	0,764	0,282	0,253	0,101
$\Psi_i$ [W/mK]	0,95	0,382	0,321	0,291
$\theta_K$ [°C]	14,42	17,47	18	18,28
$\theta_L$ [°C]	14,5	17,54	18,05	18,34
f.rsi	0,75	0,89	0,91	0,92
$\phi_{max}$ [%]	70,3	85,4	88,3	89,9



Rys. 5. Rozkład temperatury w mostku przed i po dociepleniu

Fig. 5. Temperature distribution in the thermal bridge before and after insulation

Z przeprowadzonych analiz złącza nr 2 wynika, że:

1. Wartość liniowego współczynnika  $\Psi_e$ , po dociepleniu przegrody 5 cm styropianu zmalała trzykrotnie z 0,76 do 0,28. Dalsze zwiększanie grubości docieplenia powoduje dalsze obniżanie wartości  $\Psi$ , jednakże już nie tak znaczące.
2. Temperatura powierzchni wewnętrznej wpływająca na ewentualne ryzyko rozwoju pleśni wzrosła znacznie z 14,5°C do 17,5°C i kolejno aż do wartości 18,3°C. Czynniki temperaturowy w przypadku tego złącza we wszystkich przypadkach jest większy niż dopuszczalna wartość 0,72.

#### 4. Ocena wpływu mostków na straty ciepła

W celu oceny wpływu analizowanego mostka na straty ciepła dokonano również analizy strat ciepła przez prostokątny element o wymiarach 2 m x 10 m, wzdłuż którego przebiega mostek o długości 10 m. Wyniki analiz zestawiono w tabelach 4 oraz 5.

Tabela 4 i 5. Wyniki obliczeń dla złącza 1 i złącza 2

Table 4 and 5. Calculation results for joint 1 and joint 2

Charakterystyczne parametry	Grubość warstwy docieplenia [cm]			
	0	5	10	15
Pole powierzchni elementu [m <sup>2</sup> ]	20			
Długość analizowanego mostka [m]	10			
Straty ciepła przez element U·A [W/K]	13,4 (89%)	7,2 (95%)	5 (96%)	3,8 (97%)
Straty ciepła wywołane występowaniem mostków cieplnych $\Psi_i \cdot l_i$ [W/K]	1,7 (11%)	0,4 (5%)	0,2 (4%)	0,1 (3%)
Całkowity współczynnik strat ciepła analizowanego elementu $H_{tr}$ [W/K]	15,1 (100%)	7,6 (100%)	5,2 (100%)	3,9 (100%)

Charakterystyczne parametry	Grubość warstwy docieplenia [cm]			
	0	5	10	15
Pole powierzchni elementu [m <sup>2</sup> ]	20			
Długość analizowanego mostka [m]	10			
Straty ciepła przez element U·A [W/K]	14,0 (65%)	7,4 (73%)	5 (67%)	3,8 (79%)
Straty ciepła wywołane występowaniem mostków cieplnych $\Psi_i \cdot l_i$ [W/K]	7,4 (35%)	2,8 (27%)	2,5 (33%)	1,0 (21%)
Całkowity współczynnik strat ciepła analizowanego elementu $H_{tr}$ [W/K]	21,4 (100%)	10,2 (100%)	7,5 (100%)	4,8 (100%)

Zastosowanie docieplenia elementu znacznie zredukowało straty ciepła w analizowanym elemencie – już w przypadku 5cm izolacji straty ciepła zmniejszyły się o połowę. Zastosowanie 15 cm izolacji to redukcja strat aż o około 75%. Udział strat wywołanych występowaniem mostka jest większy

w przypadku płyty balkonowej i wynosi aż 35% całkowitych strat przez przenikanie, w przypadku złącza to tylko 11%. Procentowy wpływ mostka jest bardziej zredukowany po dociepleniu złącza numer 1 gdyż zastosowanie docieplenia „zamyka” mostek i praktycznie go eliminuje. Zwiększanie grubości docieplenia tylko nieznacznie poprawia wyniki. W przypadku płyty balkonowej procentowy udział w stratach przez przenikanie utrzymuje się na podobnym poziomie przy zwiększaniu grubości docieplenia.

## 5. Wnioski

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń i analiz można sformułować następujące wnioski:

1. Kompleksowa ocena cieplno-wilgotnościowa obudowy budynków wielkopłytowych powinna dotyczyć nie tylko systemowych elementów ale również złączy między płytami.
2. W przypadku tak skomplikowanych rozwiązań złączy jak w przypadku budynków wielkopłytowych, do analizy mostków cieplnych niezbędne jest stosowanie programów komputerowych opartych na metodzie elementów skończonych.
3. Stworzenie katalogu mostków cieplnych dla budynków systemowych ułatwiłoby sporządzanie bilansu energetycznego budynków oraz analizę indywidualnych złączy.
4. Należy jednak zauważyć, wszystkie analizy prowadzone były przy założeniu poprawnie wykonanego złącza, w rzeczywistości niestety właściwe poprawne wykonanie nie jest zawsze spotykane – należy zatem rozważyć i błędne warianty wykonania (np. niepełne wypełnienie szczeliny przydylatacyjnej izolacją).

## Literatura

- [1] Warunki techniczne jakimi powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.
- [2] PN-EN ISO 6946. Komponenty budowlane i elementy budynku. Opór cieplny i współczynnik przenikania ciepła. Metoda obliczania.
- [3] PN-EN ISO 13788. Ciepłno-wilgotnościowe właściwości komponentów budowlanych i elementów budynku. Temperatura powierzchni wewnętrznej dla uniknięcia krytycznej wilgotności powierzchni i kondensacji międzywarstwowej – Metody obliczania
- [4] PN-EN ISO 14683. Mostki cieplne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne.

## **THERMAL BRIDGES IN LARGE PANEL BUILDING BEFORE AND AFTER THERMAL MODERNIZATION**

### **S u m m a r y**

It's commonly known that thermal modernization of existing buildings leads to reduction of heating energy demand. In the last couple of years, thousands of multi-family large panel buildings, built in sixties and seventies of twentieth century, have been modernized. The dominant criterion in the process of thermal modernization is to improve the energy performance of those buildings, in which the most common are insulation of building envelope combined with replacement of windows. In the designing of external insulation the complex energy analysis including so important system joints is usually neglected. One of the main problems in these kind of building is presence of joints between prefabricated panels. Those are the weak points of the construction, thermal bridges where significant heat losses are noticeable. Unfortunately one dimensional heat flow in those places cannot be assumed that is why using of MES programs is necessary to describe three dimensional heat flow. In the article the analysis of thermal bridges in the connection joints, between prefabricated elements of W70 system building, have been presented. Analysis conducted in AnTherm program allowed for determining the linear thermal transmittances and critical temperature below which, the risk of mold growth would appear.

**Keywords:** large panel buildings, W70 system, thermal bridges, system joints, AnTherm

DOI:10.7862/rb.2014.105

*Przesłano do redakcji: 22.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Sebastian PATER<sup>1</sup>  
Krzysztof NEUPAUER<sup>2</sup>  
Barbara LARWA<sup>3</sup>

## EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA KOLEKTORÓW SŁONECZNYCH WYKORZYSTUJĄCYCH WODĘ, JAKO PŁYN SOLARNY

W Polsce najczęściej stosowanym płynem solarnym w instalacjach grzewczych z kolektorami słonecznymi są 35-50% wodne roztwory glikolu propylenowego lub etylowego. Takie mieszaniny wraz z dodatkami uszlachetniającymi skutecznie zabezpieczają instalację solarną przed skutkami zamarznięcia czynnika roboczego przy niskich temperaturach zewnętrznych panujących w okresie zimowym. Roztwory te, w porównaniu do wody, charakteryzują się wyższą lepkością i niższą wartością ciepła właściwego w zakresie typowych temperatur pracy cieczy roboczej w obiegu solarnym, mają wyższą cenę w przeliczeniu na jednostkową objętość oraz mogą powodować zatrucia w wyniku przypadkowego spożycia. W instalacjach solarnych pracujących również w okresie zimowym możliwe jest wykorzystanie samej wody, bez dodatku glikoli, ale konieczne jest wtedy wyposażenie układu regulacji automatycznej sterującego instalacją w funkcję ochrony przeciwzamrożeniowej. Celem niniejszej pracy jest omówienie funkcji przeciwzamrożeniowej w instalacji solarnej z kolektorami próżniowo-rurowymi, w której wykorzystano wodę, jako płyn solarny. Poddano szczegółowej analizie okres czasu, w którym ta funkcja była stosowana. Kolektory słoneczne pracujące w warunkach rzeczywistych dla przygotowania ciepłej wody użytkowej i wspomagania centralnego ogrzewania w obiekcie mieszkalno-usługowym, są częścią multiwalentnej instalacji hybrydowej, gdzie do wytwarzania ciepła dodatkowo zastosowano trzy różne urządzenia grzewcze. Określono również efektywność energetyczną kolektorów słonecznych.

**Słowa kluczowe:** kolektory próżniowo-rurowe, sprawność kolektora, ochrona przeciwzamrożeniowa, system sterowania, odnawialne źródła energii

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Sebastian Pater, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel.: 12-628-2721, e-mail: sebpater@chemia.pk.edu.pl

<sup>2</sup> Krzysztof Neupauer, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, tel.: 12-628-2721, e-mail: kneupauer@chemia.pk.edu.pl

<sup>3</sup> Barbara Larwa, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: bl@indy.chemia.pk.edu.pl

## 1. Wprowadzenie

Istotnym elementem każdej solarnej instalacji grzewczej jest czynnik obiegowy, którego podstawową funkcją jest odbieranie ciepła wytworzonego przez kolektor słoneczny, a następnie przekazywanie go do odbiornika ciepła, np. zasobnika ciepłej wody użytkowej (c.w.u.). W strefie klimatycznej umiarkowanej, w której leży Polska, najczęściej stosowanymi płynami solarnymi są 35-50% wodne roztwory glikolu propylenowego lub etylowego.

Podstawową zaletą takich mieszanin jest skuteczne zabezpieczenie instalacji solarnych przed skutkami zakrzepnięcia czynnika roboczego przy niskich temperaturach zewnętrznych w okresie zimowym. Temperatura krzepnięcia dla wodnych roztworów glikolu etylenowego wynosi od ok.  $-20^{\circ}\text{C}$  do ok.  $-37^{\circ}\text{C}$ , a dla glikolu propylenowego od ok.  $-17^{\circ}\text{C}$  do ok.  $-35^{\circ}\text{C}$  [1]. Roztwory te zawierają także dodatki uszlachetniające np. inhibitory korozji.

Wodne roztwory glikoli w porównaniu z wodą:

- charakteryzują się od 2 do 5 razy większą lepkością dynamiczną oraz niższą wartością ciepła właściwego, w zakresie typowych temperatur pracy cieczy roboczej w obiegu solarnym,
- mają kilkukrotnie wyższą cenę,
- mogą powodować zatrucie w wyniku przypadkowego spożycia,
- ulegają degradacji termicznej do związków o smolistej konsystencji, które mogą osadzać się na wewnętrznych powierzchniach rurociągów, czy wymienników ciepła [5].

W instalacjach solarnych użytkowanych całorocznie możliwe jest wykorzystanie dejonizowanej wody, bez dodatku glikoli, jako czynnika obiegowego. Należy jednak wyposażyć takie instalacje w system sterowania z funkcją ochrony przeciwzamrożeniowej.

Stosowanie wody, jako płynu solarnego jest korzystne w instalacjach:

- o małej sumarycznej długości rurociągów,
- w których większa część rurociągów prowadzona jest wewnątrz pomieszczeń ogrzewanych, a rurociągi prowadzone na zewnątrz obiektu budowlanego są dobrze zaizolowane,
- wyposażonych w kolektory słoneczne o niskim współczynniku strat ciepła do otoczenia np. dla kolektorów próżniowo-rurowych.

## 2. Materiały i metody

Obiektem przeprowadzonych badań była działająca od września 2011 roku instalacja solarne, pracująca w warunkach rzeczywistych. Służyła ona dla przygotowania c.w.u. i wspomagania centralnego ogrzewania w budynku mieszkalno-usługowym o powierzchni użytkowej wynoszącej około  $460\text{ m}^2$  na obrzeżach Krakowa. Jest ona częścią multiwalentnej instalacji hybrydowej, gdzie po

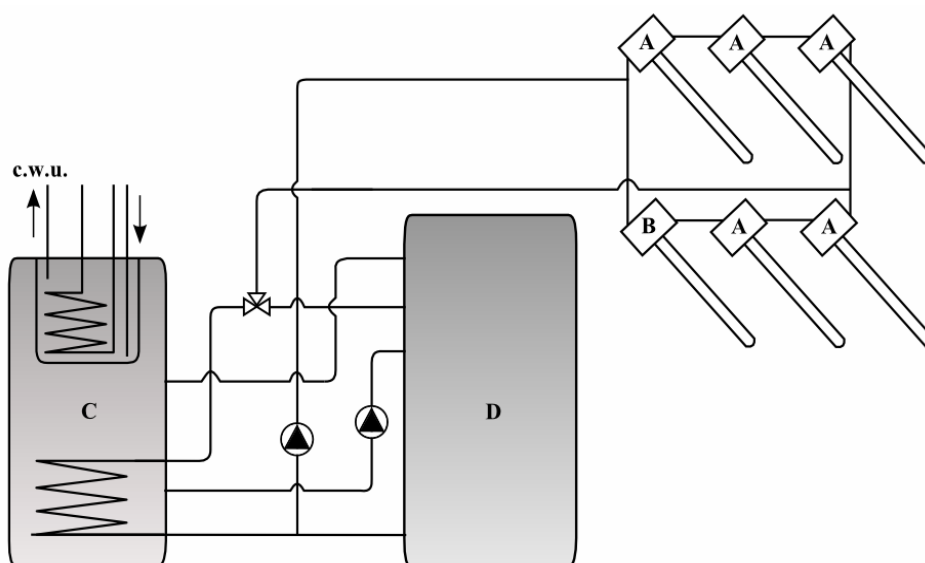
stronie wytwarzania ciepła zastosowano dodatkowo trzy różne urządzenia grzewcze: pompę ciepła typu solanka-woda, kocioł na biomasę oraz kocioł kondensacyjny gazowy. Więcej informacji na jej temat można znaleźć w [6].

W omawianej instalacji solarnej zastosowano jeden 12-rurowy i pięć 20-rurowych kolektorów próżniowo-rurowych typu „Heat-Pipe” o łącznej powierzchni apertury wynoszącej 10,55 m<sup>2</sup>. Są one połączone szeregowo-równoległe (po trzy kolektory na każdy szereg) co przedstawiono na rysunku 1. Kolektory zostały zamontowane równoległe do połaci dachu budynku skierowanej w stronę południową i o nachyleniu wynoszącym 40°. Podstawowe dane techniczne dotyczące użytych kolektorów słonecznych zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Dane techniczne zastosowanych kolektorów słonecznych

Table 1. Technical data of applied solar collectors

Rodzaj kolektora	Powierzchnia apertury [m <sup>2</sup> ]	Objętość czynnika solarnego w głowicy kolektora [l]	Sprawność optyczna [-]	Współczynniki strat ciepła [W/(m <sup>2</sup> ·K)]	
				a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>
20-rurowy	1,87	1,26	0,62	1,38	0,0184
12-rurowy	1,20	0,67			



Rys. 1. Schemat instalacji solarnej: A – kolektor 20-rurowy, B – kolektor 12-rurowy, C – zasobnik typu „KOMBI”, D – zasobnik buforowy

Fig. 1. The scheme of solar system: A – 20- tubes collector, B – 12- tubes collector, C – „KOMBI” type storage, D – buffer tank



Główną funkcją kolektorów słonecznych w instalacji jest dostarczanie ciepła dla c.w.u., która jest podgrzewana do zadanej temperatury w zasobniku typu „KOMBI” (inne nazwy: zbiornik w zbiorniku, zasobnik kombinowany). Całkowita pojemność zasobnika typu „KOMBI” wynosi 800 l, przy czym 200 l przypada na zasobnik wewnętrzny. Ciepło produkowane przez kolektory słoneczne kierowane jest do dolnej węzownicy zasobnika typu „KOMBI” o powierzchni wymiany ciepła  $2,4 \text{ m}^2$ . Podgrzana woda w objętości bufora na skutek konwekcji swobodnej przemieszcza się do górnej części zasobnika. Tam oddaje ciepło przez ścianki zasobnika wewnętrznego do c.w.u. W instalacji istnieje również możliwość podgrzania c.w.u. przez ciepło wytworzone w kotle kondensacyjnym gazowym. W takim sposobie podgrzewania c.w.u. bierze udział dodatkowa węzownica zamontowana w zasobniku wewnętrznym, co zostało przedstawione na rysunku 1.

Jeżeli w zasobniku typu „KOMBI” zostanie osiągnięta zadana temperatura c.w.u. poprzez odpowiednie przełączenie zaworu trójdrogowego nadmiarowe ciepło wytworzone przez kolektory słoneczne jest kierowane do zbiornika buforowego o pojemności 1 000 l (D na rysunku 1). Przekazywanie ciepła zachodzi bez użycia wymiennika ciepła, ponieważ w obiegu solarnym jak i zbiorniku buforowym znajduje się ta sama ciecz – woda dejonizowana. Jeżeli kolektory słoneczne nie pracują (np. na skutek niekorzystnych warunków pogodowych), a temperatura wody w zbiorniku buforowym jest wyższa od temperatury c.w.u. ciepło pomiędzy zbiornikami może być przekazywane przez dodatkowy obieg łączący objętości zbiorników C i D.

Płynem pośredniczącym w przekazywaniu ciepła z kolektorów słonecznych do zbiorników jest woda dejonizowana, dlatego w systemie sterowania pracą instalacji aktywowano funkcję ochrony przeciwzamrożeniowej. Instalacja wyposażona jest w zasilacz awaryjny, inaczej zwany zasilaczem UPS (ang. **Uninterruptible Power Supply**). W przypadku przerwy lub zakłóceń dostaw energii elektrycznej (co w lokalizacji rozpatrywanej instalacji zdarza się często, szczególnie w okresie zimowym) podtrzymuje napięcie w instalacji nawet do kilkudziesięciu godzin, umożliwiając ciągłe działanie ochrony przeciwzamrożeniowej i systemu sterowania.

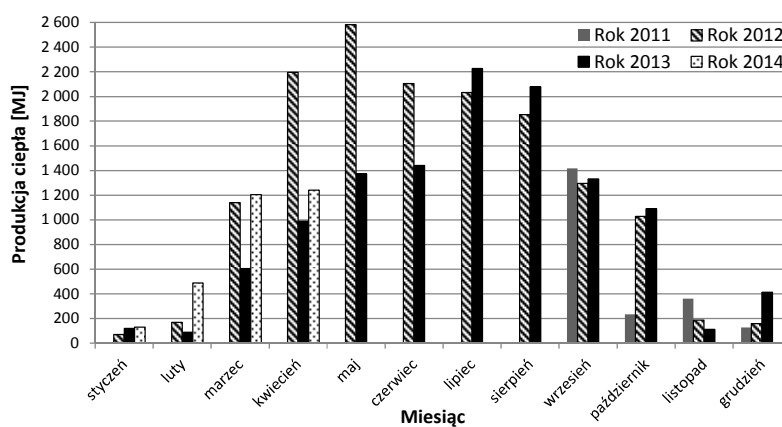
Pracą kolektorów słonecznych, jaki i pozostałych urządzeń instalacji jest nadzorowana przez system sterowania DigiENERGY, o którym szczegółowe informacje można znaleźć w [4,6].

### 3. Wyniki i dyskusja

Wyniki pracy kolektorów słonecznych analizowano od początku września 2011 roku do końca kwietnia 2014 roku. Sumarycznie kolektory w tym czasie wytworzyły 31,9 GJ ciepła, z czego 14,8 GJ ciepła w 2012 roku, a 11,9 GJ w 2013 roku. Dla tych dwóch lat różnica w miesięcznej produkcji ciepła szczególnie jest widoczna od marca do czerwca, a dla pozostałych miesięcy jest zbli-

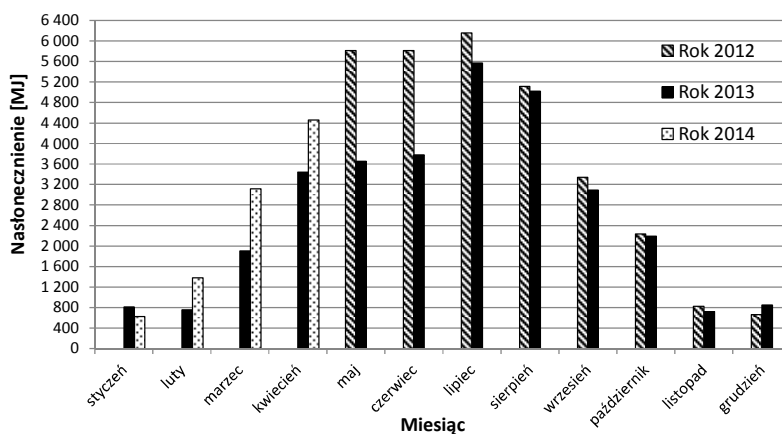
żona (rys. 2). W miesiącach od listopada do lutego ilość ciepła wytwarzana przez kolektory osiągała maksymalną wartość 500 MJ.

Od początku maja 2012 roku do końca kwietnia 2014 roku prowadzono pomiary nasłonecznienia przy użyciu pyranometru Kipp & Zonen CM21. Na rysunku 3 zestawiono miesięczne nasłonecznienie przeliczone na powierzchnię czynną kolektorów (10,55 m<sup>2</sup>). Największe miesięczne nasłonecznienie wynoszące 6,1 GJ odnotowano w lipcu 2012 roku, a najniższe 0,6 GJ w styczniu 2014 roku. Od maja do grudnia 2012 roku sumarycznie nasłonecznienie było o 20% wyższe, niż w takim samym okresie czasu 2013 roku.



Rys. 2. Miesięczna produkcja ciepła przez kolektory słoneczne

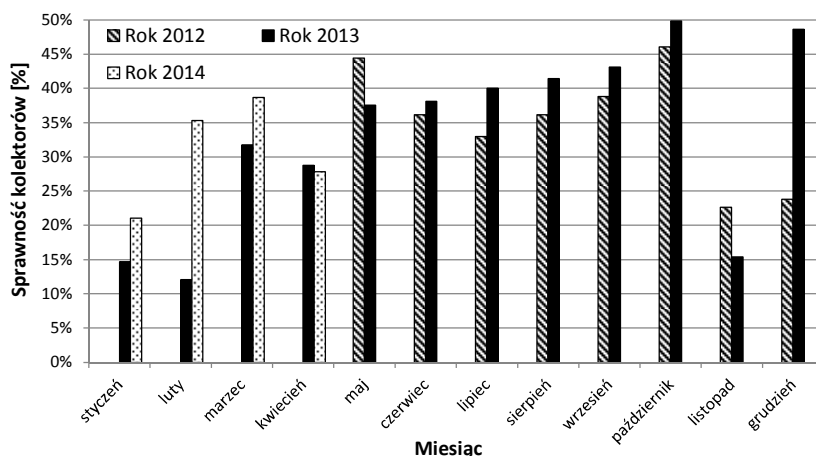
Fig. 2. Monthly production of heat by solar collectors



Rys. 3. Miesięczne nasłonecznienie w przeliczeniu na powierzchnię czynną kolektorów

Fig. 3. Monthly insolation calculated on the active surface of solar

Od maja do października miesięczna sprawność kolektorów (rys. 4) zawierała się w przedziale od 36% do 50%, natomiast dla pozostałych miesięcy była niższa (z wyjątkiem marca 2014 i grudnia 2013). Roczna sprawność kolektorów słonecznych w roku 2013 wyniosła 37,4%.

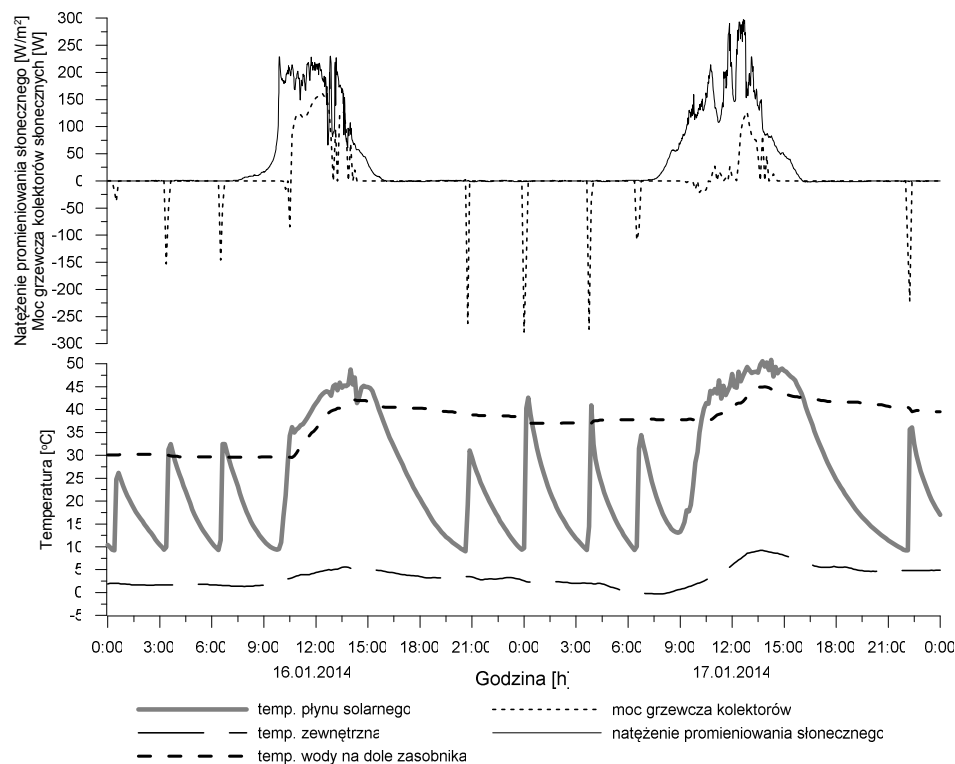


Rys. 4. Miesięczna sprawność kolektorów słonecznych

Fig. 4. Monthly efficiency of solar collectors

Od początku września 2012 do końca kwietnia 2013 roku (sezon grzewczy 2012/13) oraz od początku września 2013 do końca kwietnia 2014 roku (sezon grzewczy 2013/14), ze względu na zastosowany w instalacji płyn solarny i panujące temperatury zewnętrzne w systemie sterowania aktywowano funkcję ochrony przeciwzamrożeniowej. Polegała ona na krótkotrwałym załączeniu pompy obiegowej obiegu solarnego w sytuacji, gdy mierzona temperatura wody w głowicy zbiorczej kolektora słonecznego, osiągała wartość poniżej zadanej ( $10,5^{\circ}\text{C}$  w sezonie grzewczym 2012/13 i  $9,5^{\circ}\text{C}$  w sezonie grzewczym 2013/14). Ciepło wykorzystywane do utrzymywania odpowiedniej temperatury w kolektorze pobierano ze zbiornika buforowego do momentu, gdy temperatura wody mierzona w głowicy zbiorczej kolektora wynosiła  $25^{\circ}\text{C}$  (rys. 5). Odnotowane wyższe temperatury płynu solarnego są wynikiem bezwładności cieplnej kolektora. Natomiast ujemna moc grzewcza kolektorów słonecznych jest rezultatem działania opisanej ochrony przeciwzamrożeniowej.

Funkcja ochrony przeciwzamrożeniowej w dniach 16-17 stycznia 2014 roku, przy temperaturze zewnętrznej wynoszącej około  $3^{\circ}\text{C}$ , sumarycznie była aktywowana 8 razy, średnio co 3 godziny i zużyła 11,7 MJ ciepła (rys. 5). Jeżeli w ciągu dnia było odpowiednie natężenie promieniowania słonecznego kolektory słoneczne wytwarzały ciepło i oddawały je do zasobnika typu „KOMBI”.



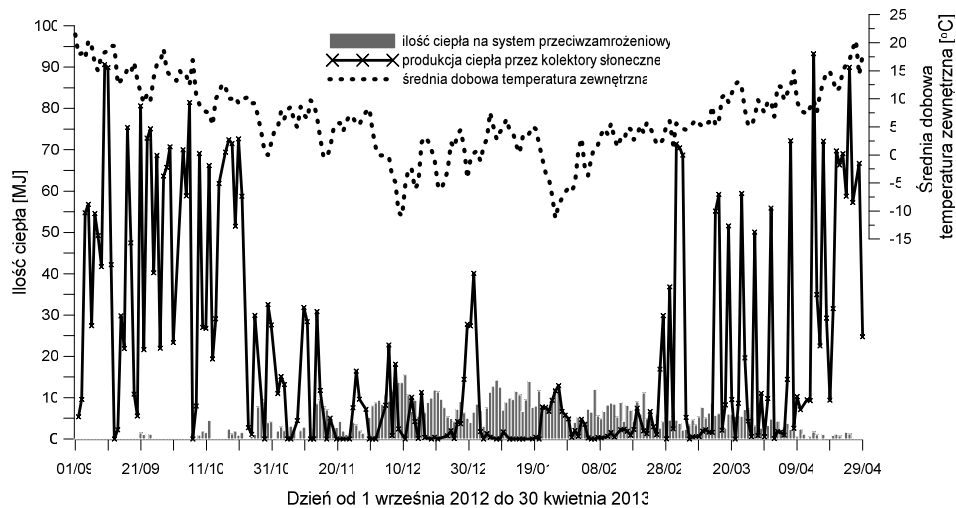
Rys. 5. Wybrane parametry pracy kolektorów słonecznych 16 i 17 stycznia 2014 roku

Fig. 5. Selected parameters of solar collectors 16 and 17 January 2014

Zarówno w sezonie grzewczym 2012/13, jak i 2013/14 dobowe zużycie ciepła przez system przeciwwamrozeniowy wynosiło maksymalnie 17 MJ (rys. 6 i 7). Od początku września do połowy listopada w obu analizowanych sezonach, gdy średnia dobowa temperatura zewnętrzna wynosiła ponad  $5^{\circ}\text{C}$ , obserwowano niskie zużycia ciepła przez system lub jego brak. W sezonie grzewczym 2012/13 jednocześnie z wysokim zużyciem ciepła przez system przeciwwamrozeniowy kolektory słoneczne wytwarzały nieznaczny ilość ciepła (szczególnie w miesiącach od grudnia do lutego).

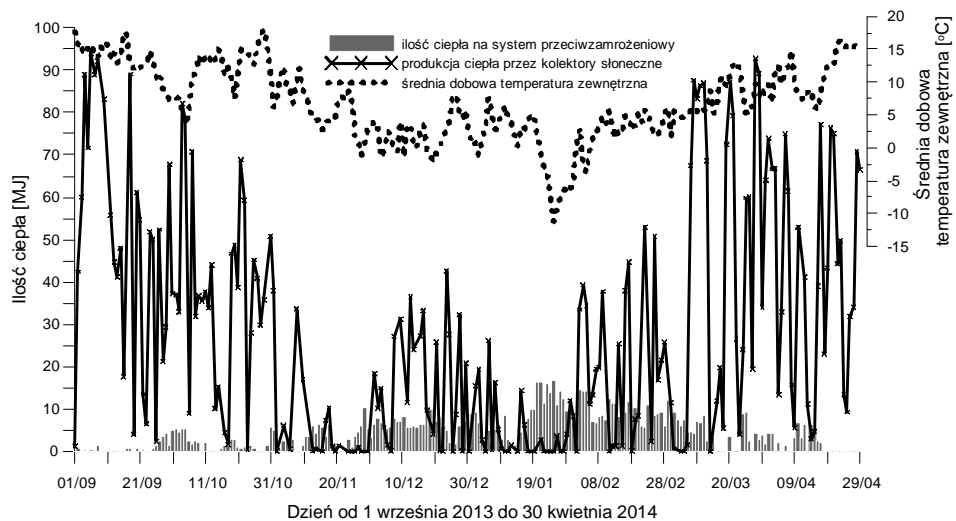
Ilość ciepła zużytego na działanie systemu przeciwwamrozeniowego oraz ilość dni, w których on funkcjonował w obu sezonach grzewczych była podobna i wynosiła odpowiednio 1,1 GJ i 187 dni (tab. 2). Zakładając równe udziały kolektorów słonecznych w stratach ciepła uzyskuje się ok. 104 MJ ciepła traconego na działanie systemu ochrony instalacji w przeliczeniu na jednostkową powierzchnię apertury kolektorów. W sezonie 2013/14 ilość wytworzonego ciepła przez kolektory była o 34% większa w stosunku do sezonu 2012/13. Największą ilość ciepła na pracę systemu przeciwwamrozeniowego zużyto w grudniu i styczniu sezonu 2012/13, a najmniejszą we wrześniu sezonu 2012/13.

W sezonie grzewczym 2012/13 system ochrony przeciwzamrożeniowej zużył około 24% ciepła wytworzonego przez kolektory słoneczne. Natomiast w sezonie grzewczym 2012/13 udział ten wynosił 18%.



Rys. 6. Zużycie ciepła przez system przeciwzamrożeniowy w sezonie grzewczy 2012/13

Fig. 6. The heat consumption by the antifreeze system in the heating season 2012/13



Rys. 7. Zużycie ciepła przez system przeciwzamrożeniowy w sezonie grzewczy 2013/14

Fig. 7. The heat consumption by the antifreeze system in the heating season 2013/14

Tabela 2. Zestawienie danych z pracy systemu przeciwwzrosteniowego instalacji solarnej

Table 2. The summary data of antifreeze system of solar installation

Miesiąc	Ilość zużytego ciepła na funkcjonowanie ochrony przeciwwzrosteniowej [MJ]		Produkcja ciepła przez kolektory [MJ]		Ilość dni pracy ochrony przeciwwzrosteniowej [dni]	
	2012/13	2013/14	2012/13	2013/14	2012/13	2013/14
Wrzesień	1,0	19,2	1 296,2	1 331,4	3	14
Październik	53,2	58,6	1 030,0	1 091,8	16	22
Listopad	88,2	95,5	187,6	110,9	24	25
Grudzień	275,7	188,1	158,2	413,1	31	30
Styczeń	272,6	261,2	119,5	130,9	31	31
Luty	175,0	270,1	91,0	488,7	28	28
Marzec	153,3	137,0	604,4	1 205,4	31	24
Kwiecień	45,7	50,5	990,5	1 242,0	22	13
<b>Suma</b>	<b>1 064,7</b>	<b>1 080,2</b>	<b>4 477,4</b>	<b>6 014,2</b>	<b>186</b>	<b>187</b>

#### 4. Podsumowanie

Ilość ciepła przekazywana w okresie zimowym ze zbiornika buforowego do płynu solarnego w stosunku do ilości ciepła, którą kolektory słoneczne wyprodukowały była niewielka i w sezonie grzewczym 2012/13 wynosiła 24%, a w sezonie 2013/14 była równa 18%. Mniejsze zużycie ciepła na funkcjonowanie systemu przeciwwzrosteniowego, przy jednocześnie większej produkcji ciepła przez kolektory słoneczne w sezonie grzewczym 2013/14 w stosunku do sezonu 2012/13 uzyskano dzięki:

- obniżeniu temperatury załączania pompy obiegowej instalacji solarnej do 9,5°C,
- większemu o 2,5 GJ nasłonecznieniu w przeliczeniu na powierzchnię apertury kolektorów.

Zmierzona wartość nasłonecznienia w 2013 roku, wynosząca 3 013 MJ/m<sup>2</sup>, była mniejsza o ponad 700 MJ od średniej wartości rocznego nasłonecznienia obliczonego na podstawie danych z lat 1884-2010 dla Krakowa [3].

Rzeczywista sprawność kolektorów słonecznych w omawianej instalacji w 2013 roku wyniosła około 37%, co jest rezultatem nieco lepszym niż sprawność tego typu urządzeń badana w długim okresie czasu [2]. Z energetycznego punktu widzenia praca instalacji solarnej wykorzystującej wodę w grudniu, styczniu i lutym może być nieopłacalna. Jednakże wyłączenie instalacji nie jest zalecane ze względu na kwestie praktyczne oraz nieprzewidywalne warunki atmosferyczne, co potwierdza grudzień roku 2013 i 2014 (tabela 2).

Przeprowadzone badania potwierdziły, że stosowanie wody, jako czynnika obiegowego w instalacjach solarnych w warunkach polskich, jest uzasadnione pod względem praktycznym i energetycznym. Wiąże się jednak z użyciem odpowiedniego sterownika, lub systemu sterowania pracy takiej instalacji. W czasie prowadzonych badań instalacja pracowała bezawaryjnie.

## Literatura

- [1] ASHARE: Fundamentals: 2001 Ashrae Handbook: Inch-Pound Edition, Amer Society of Heating, 2001.
- [2] Ayompe L. M., Duffy A.: Thermal performance analysis of a solar water heating system with heat pipe evacuated tube collector using data from a field trial, *Solar Energy*, 90, 2013, 17–28.
- [3] Matuszko D.: Long-term variability in solar radiation in Krakow based on measurements of sunshine duration, *Int. J. Climatol.*, 34, 2014, 228–234.
- [4] Neupauer K. i in.: Sterownik nowego typu dla instalacji hybrydowych z odnawialnymi źródłami energii, *Inż. Ap. Chem.*, 49, 3, 2010, 87–88.
- [5] Pater S.: Woda jako płyn solarny w cieczowych kolektorach słonecznych, Wybrane problemy naukowo-badawcze budownictwa i inżynierii środowiska, Politechnika Warszawska Wydział Budownictwa Mechaniki i Petrochemii, Płock, 2013.
- [6] Pater S., Magiera J.: Energetic and Ecological Balancing Hybrid Heating System with Renewable Energy Sources, *Czasopismo Techniczne*, 5, 1-M, 2012, 175–184.

## ENERGY EFFICIENCY OF SOLAR COLLECTORS USING WATER, AS SOLAR LIQUID

### Summary

The Polish most commonly used solar fluid in heating systems with solar collectors are 35-50% solutions of propylene glycol or ethanol and water. Such mixtures with special additives effectively protect the solar system from freezing of working medium at low temperatures prevailing in winter time. These solutions, compared with water, are characterized by a higher viscosity and lower specific heat values in the range of typical operating temperatures of working fluid in the solar circuit, have a higher price based on the volume of the solution and may cause poisoning by accidental ingestion. The usage of water in solar systems during winter season is also possible without the addition of glycols, but it is necessary to equipped frost protection function in the control system of installation.

The purpose of this paper is to discuss the principles of operation of the frost protection in the solar system with vacuum-tube collectors, which uses water as the solar fluid and subjecting a detailed analysis of the time period in which the system functioned. This installation, operating in real conditions for the preparation of domestic hot water and auxiliary heating in residential and service building is part of a multivalent hybrid installation where heat is generating additionally by three different heating devices. Also thanks fitted pyranometer in the installation is possible to specified energy efficiency of solar collectors.

**Keywords:** vacuum-tube collectors, collector efficiency, frost protection, control system, renewable energy sources

DOI:10.7862/rb.2014.106

*Przesłano do redakcji: 25.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

**Janusz PEŁCZYŃSKI<sup>1</sup>**  
**Bartłomiej TOMKOWICZ<sup>2</sup>**

## **ZAGADNIENIA ETAPU WSTĘPNEGO ZMIANY SPOSOBU UŻYTKOWANIA STRYCHÓW W STREFIE ŚRÓDMIEJSKIEJ NA CELE MIESZKALNE NA PRZYKŁADZIE WYBRANYCH KAMIENIC W RZESZOWIE**

Jednym z popularnych sposobów pozyskiwania nowych powierzchni użytkowych w centrach miast jest adaptacja strychów kamienic. Zainteresowanie wzbudza możliwość wytworzenia mieszkań o niepowtarzalnym, indywidualnym charakterze przy stosunkowo niskich nakładach finansowych. Jak się jednak okazuje proces pozyskania i przekształcenia strychu okazać się może długotrwały, a przede wszystkim złożony. Już sam etap wstępny, poprzedzający właściwą adaptację wymaga wielu działań rozpoznawczych i formalnych. Zagadnienie omówiono na tle trzech przykładów adaptacji czterokondygnacyjnych kamienic w Rzeszowie, różniących się pod względem wymagań konserwatorskich: kamienicy przy ul. Kraszewskiego 1 leżąca w strefie ochrony konserwatorskiej, kamienicy przy pl. Śreniawitów 2 wpisaną do ewidencji zabytków i kamienicy przy ul. Grodzisko 3 wpisaną do rejestru zabytków. W artykule przedstawiono krótki opis i rysunki inwentaryzacyjne wybranych kamienic. Przedstawione zostały zagadnienia formalno-prawne etapu wstępnego zmiany sposobu użytkowania strychów na cele mieszkalne. Omówiono uwarunkowania prawne w zakresie trybu postępowania, formy i zakresu uzyskania zgody właścicieli na adaptację strychu. Podjęto kwestię zakresu niezbędnych prac inwentaryzacyjnych oraz koniecznych ekspertyz technicznych; rzetelna ocena i diagnoza stanu istniejącej struktury zarówno konstrukcyjnej jak i instalacyjnej ma zasadniczy wpływ na przyjęcie właściwego kierunku postępowania i przewidywanych rozwiązań - zarówno pod względem formalnym jak i projektowym. Przedstawiono kwestie związane ze sformułowaniem wniosku o wydanie decyzji o warunkach zabudowy oraz zwrócono uwagę na istotne aspekty zapisów decyzji. Odniesiono się do kwestii ustalenia wymagań konserwatorskich na wstępnym etapie inwestycji.

**Słowa kluczowe:** adaptacja, proces inwestycyjny, wymagania formalno-prawne

---

<sup>1</sup> Adres do korespondencji: Janusz Pełczyński, Politechnika Rzeszowska, tel.: 17 865 1691, jpe@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Bartłomiej Tomkowicz, Politechnika Rzeszowska, tel.: 17 865 1042, barttomk@prz.edu.pl



## 1. Wprowadzenie

Adaptacja strychów istniejących budynków na cele mieszkaniowe jest wciąż wykorzystywanym sposobem pozyskiwania nowych powierzchni użytkowych w obszarach istniejącej zabudowy. Zwłaszcza w centrach miast, gdzie możliwości lokalizacji nowych inwestycji są znacząco ograniczone a koszt ich prowadzenia jest wysoki, adaptacja istniejących powierzchni strychów, wydaje się być szczególnie atrakcyjna. Działanie takie jest korzystne również pod względem architektonicznym i urbanistycznym, ponieważ często umożliwia poprawę techniczną i wizualną budynków oraz rozwinięcie istniejącego programu funkcjonalnego, co z reguły podnosi wartość danego obszaru miejskiego.

Pomimo wrażenia względnej prostoty, adaptacja strychów kamienic nie jest jednak zadaniem łatwym. Pod wieloma względami - zarówno od strony formalno-prawnej, projektowej jak i wykonawczej adaptacja strychu jest zadaniem bardziej złożonym i specyficznym niż przeciętna budowa. Etap wstępny, poprzedzający właściwą adaptację, wymaga wielu działań rozpoznawczych i formalnych, których przeprowadzenie jest niezbędne dla określenia uwarunkowań i możliwości przeprowadzenia adaptacji.

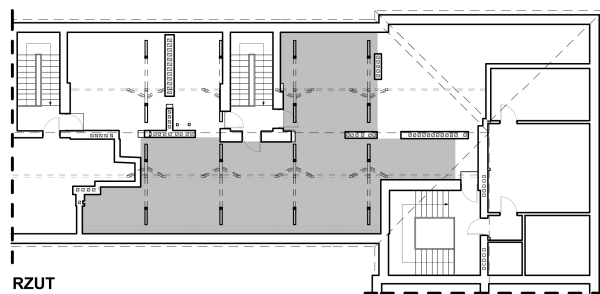
## 2. Charakterystyka wybranych kamienic

Do zilustrowania problematyki adaptacji wybrano trzy przykłady czterokondygnacyjnych kamienic w Rzeszowie, różniących się pod względem wymagań konserwatorskich: kamienicę przy ul. Kraszewskiego 1 leżącą w strefie ochrony konserwatorskiej, kamienicę przy pl. Śreniawitów 2 wpisaną do ewidencji zabytków i kamienicę przy ul. Grodzisko 3 wpisaną do rejestru zabytków. Poniżej przedstawiony został krótki opis tych budynków.

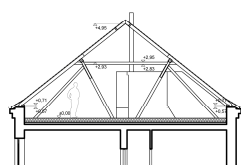
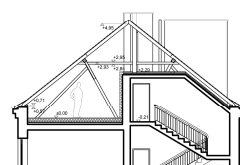
### 2.1. Kamienica przy ul. Kraszewskiego 1

Przedmiotowy wielorodzinny budynek mieszkalny, został wybudowany w latach 50-tych XX wieku. Budynek posiada trzy kondygnacje mieszkalne oraz podpiwniczenie. Dach wysoki, dwuspadowy o konstrukcji drewnianej i kącie nachylenia połaci  $38^\circ$  przekrywa poddasze będące czwartą kondygnacją nadziemną. Konstrukcję budynku stanowią ściany nośne murowane z cegły pełnej w układzie podłużnym i poprzecznym oparte na ławach żelbetowych. Stropy wykonano jako gęstożebrowe prefabrykowane DMS z rozstawem belek stropowych 65 cm. Ścianki kolankowe poddasza mają wysokość ok. 60 cm, zaś wzniesienie kalenicy wynosi 5,15 m ponad poziom podłogi strychu.

Budynek znajduje się w strefie konserwatorskiej dotyczącej ochrony układu urbanistycznego i adaptacja strychu budynku nie podlega uzgodnieniu z Konserwatorem zabytków.

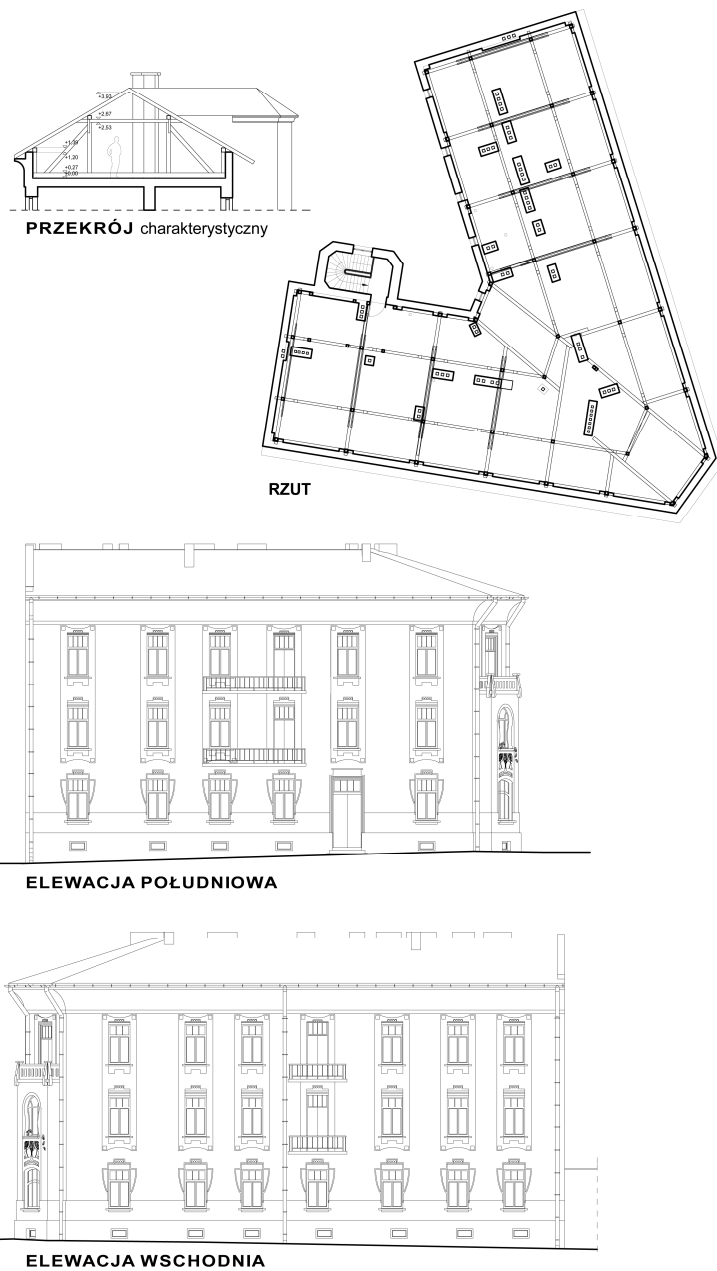
**RZUT**

kolorem szarym zaznaczono powierzchnię przeznaczoną do adaptacji

**PRZEKRÓJ** charakterystyczny**PRZEKRÓJ** przez klatkę schodową**ELEWACJA PÓŁNOCNA** (frontowa)**ELEWACJA POŁUDNIOWA** (od podwórza)

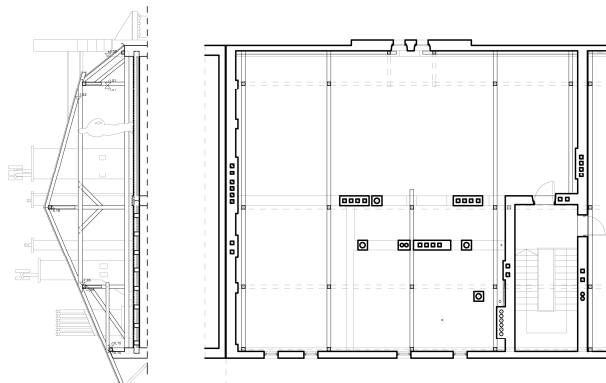
Rys. 1. Kamienica przy ul. Kraszewskiego 1, stan przed adaptacją - rzut i przekroje strychu, elewacje frontowa i od podwórza

Fig. 1. The building at 1 Kraszewskiego Street, state before conversion - floor plan and cross-sections of the loft, front and back elevation

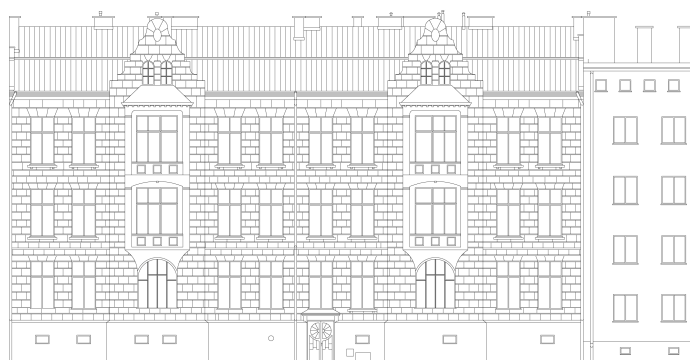


Rys. 2. Kamienica przy pl. Śreniawitów 2, stan przed adaptacją - rzut i przekrój strychu, elewacje południowa i wschodnia

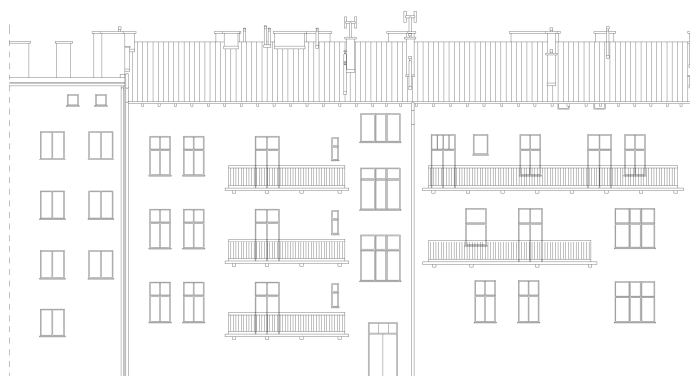
Fig. 2. The building at 2 Śreniawitów Square, state before conversion - floor plan and cross-section of the loft, south and east elevation



RZUT I PRZEKRÓJ CZĘŚCI PRZEZNACZONEJ DO ADAPTACJI



ELEWACJA PÓŁNOCNA (frontowa)



ELEWACJA POŁUDNIOWA (od podwórza)

Rys. 3. Kamienica przy ul. Grodzisko 3, stan przed adaptacją - rzut i przekrój strychu, elewacje północna i południowa

Fig. 3. The building at 3 Grodzisko Street, state before conversion - floor plan and cross-section of the loft, front and back elevation

## **2.2. Kamienica przy pl. Śreniawitów 2**

Kamienica zlokalizowana w bezpośrednim sąsiedztwie zamku Lubomirskich, zaprojektowana została w stylu secesyjnym, w duchu secesji geometrycznej z motywami floralnymi. Wzniesiona została w latach 1909 - 1910 jako budynek narożny oparty na rzucie litery V. Jest budynkiem wysokim, eksponowanym i dominującym nad najbliższym otoczeniem, o trzech mieszkalnych kondygnacjach nadziemnych, podpiwniczonym. Dach poddasza stanowiącego czwartą kondygnację jest dwuspadowy, wysoki, konstrukcja więźby dachowej płatwiowo-kleszczowa ze ściankami kolankowymi. Konstrukcję budynku oparto na ścianach nośnych w układzie podłużnym murowanych z cegły. Nad piwnicą zastosowano strop Kleina, nad parterem i pierwszym piętrzem strop żelbetowy, nad drugim piętrzem strop drewniany.

Budynek jest wpisany do ewidencji zabytków, posiada bogaty wystrój elewacyjny z oryginalnymi elementami wykończenia m.in. ryzalitami, obramieniami otworów okiennych i drzwiowych, gzymsem koronującym elewacje, zewnętrzną stolarką drzwiową z secesyjną metaloplastyką, elementami sztukatorskimi we wnętrzach.

## **2.3. Kamienica przy ul. Grodzisko 3**

Okazała kamienica wzniesiona została w 1925 r. jako użytkowo-mieszkalna, podpiwniczona, o trzech kondygnacjach mieszkalnych i czwartą kondygnacją strychową. W rzucie jest budynkiem na planie prostokąta z jedną przelotową klatką schodową, z fasadą posiadającą bogatą kreację architektoniczną. Charakterystycznymi elementami elewacji frontowej są dwa ryzality z loggiami w przestrzeni 2 i 3 kondygnacji z ozdobnym zwieńczeniem, a także boniowania i gzymсы nad 1 i 3-cią kondygnacją. Elewacja południowa (od podwórza) jest uboga w detale, jej wartość architektoniczna jest znikoma. Budynek został przekryty dachem asymetrycznym o konstrukcji drewnianej płatwiowo-kleszczowej. Konstrukcja budynku oparta jest na ścianach nośnych w układzie podłużnym murowanych z cegły. Zasadnicze stropy międzykondygnacyjne są drewniane, klatkę schodową wykonano z żelbetu.

Kamienica jest wpisana do rejestru zabytków – wpis do rejestru zabytków nr rej. A-934 z dnia 17.12.1975 r.

## **3. Zagadnienia formalno-prawne etapu wstępnego zmiany sposobu użytkowania strychów na cele mieszkalne**

### **3.1. Forma i zakres zgody właściciela na adaptację**

Jednym z pierwszych kroków po podjęciu decyzji o przystąpieniu do adaptacji jest uzyskanie zgody właścicieli budynku na przekształcenie strychu na cele mieszkalne. Do rzadkości należą sytuacje, gdy kamienica posiada jednego

właściciela. Z reguły mamy do czynienia ze wspólnotami mieszkaniowymi, gdzie decyzje podejmowane są w drodze uchwały właścicieli lokali. Sposób podjęcia uchwały zależy od wielkości nieruchomości. W przypadku nieruchomości o liczbie lokali większej niż siedem zgoda na adaptację (jako czynność przekraczająca zakres zwykłego zarządu) wymaga uchwały właścicieli podjętej większością głosów liczoną według wielkości ich udziałów w nieruchomości [1]. Jeżeli liczba lokali nie jest większa niż siedem, do zarządu nieruchomością wspólną mają zastosowanie przepisy Kodeksu cywilnego i Kodeksu postępowania cywilnego o współwłasności. Zgodnie z nimi wymagana jest zgoda wszystkich współwłaścicieli lub w przypadku braku zgody wszystkich właścicieli możliwe jest rozstrzygnięcie sądu na wniosek co najmniej połowy właścicieli.

Obowiązujący w Polsce stan prawny nie pozwala na zakup powierzchni strychowej przeznaczonej do adaptacji, gdyż nie stanowi ona lokalu w rozumieniu ustawy [1]. Możliwe jest natomiast nabycie prawa do wykonania nadbudowy, przebudowy i zmiany sposobu użytkowania nieruchomości wspólnej oraz do zakupu lokalu powstałego w wyniku wymienionych działań. W praktyce podejmowana jest w tym zakresie notarialnie potwierdzona uchwała wspólnoty, w której określa się zasadnicze prawa i obowiązki stron.

Ważnym elementem uchwały jest udzielenie przez właścicieli zgody na rozbudowę wewnętrznych instalacji budynku oraz jeżeli jest to możliwe zgoda na lokalizację miejsc postojowych na terenie działki. Zgoda w sprawie rozbudowy instalacji będzie mieć raczej charakter ogólny, umożliwiający podejmowanie inwestycji instalacyjnej w częściach wspólnych budynku. Ze względu na potrzeby prawidłowego rozwiązania układu funkcjonalnego projektowanych lokali, zgoda na rozbudowę instalacji w obszarze części wspólnych budynku może się okazać niewystarczająca i konieczne będzie uzyskanie zgody właścicieli konkretnych lokali na poprowadzenie instalacji przez ich mieszkania. Ostateczny dostęp do mediów uwarunkowany jest również zgodą ich dysponentów, od których wymagane jest uzyskanie oświadczenia o zapewnieniu dostawy i odbioru mediów. Na tym etapie może się okazać, że istniejąca infrastruktura jest niewystarczająca i wymaga oprócz rozbudowy samej instalacji także przebudowy przyłączy. Przykładem takiej sytuacji jest budynek przy ul. Kraszewskiego, gdzie wielkość istniejącego przyłącza wodociągowego wskazywała na konieczność jego rozbudowy w celu zasilenia nowych lokali. Ostatecznie okazało się, że nie jest to konieczne, ale można to było stwierdzić dopiero po zinventaryzowaniu całości istniejących w budynku przyborów i punktów poboru wody.

Praktycznym zapisem uchwały, ułatwiającym całość dalszego postępowania, jest udzielenie inwestorowi pełnomocnictwa do występowania o wszelkie potrzebne zgody i decyzje organów administracyjnych, bądź dostawców mediów w zakresie adaptacji strychu, przede wszystkim o pozwolenie na budowę i zmianę sposobu użytkowania oraz zaświadczenia o samodzielności lokalu. Bardzo praktyczne będzie też udzielenie przez wspólnotę zgody dla zarządcy

nieruchomości do podjęcia czynności przekraczających zakres zwykłego zarządu - ustanowienia odrębnej własności powstałego lokalu i rozporządzenie tym lokalem, czyli zawarcia aktu notarialnego sprzedaży go na rzecz inwestora po zakończeniu inwestycji, wraz ze zmianą wysokości udziałów w nieruchomości.

### **3.2. Kwerenda archiwalna, inwentaryzacja, ekspertyzy techniczne**

Na początku całego procesu niezbędne jest odbycie wizji lokalnej z udziałem projektanta w celu dokonania weryfikacji przydatności poddasza oraz zidentyfikowania uwarunkowań formalnych i technicznych jego adaptacji. Warto też pozyskać materiały archiwalne dotyczące przebudowywanej kamienicy, o ile takowe istnieją. Źródłem informacji mogą być zasoby zarządcy nieruchomości, jej właścicieli lub konserwatora zabytków. Konserwator zobowiązany jest właścicielowi lub posiadaczowi zabytku nieruchomego do nieodpłatnego udostępnienia do wglądu i wykonania niezbędnych odpisów posiadaną przez siebie dokumentację tego zabytku [3]. W przypadku budynków wpisanych do rejestru, osoba zamierzająca realizować roboty budowlane lub choćby tylko planująca zmianę sposobu korzystania z tego zabytku, musi niezależnie od uzyskania innych dokumentów otrzymać na takie działania pozwolenie wojewódzkiego konserwatora zabytków. Wojewódzki konserwator zabytków może uzależnić wydanie pozwolenia od przeprowadzenia na koszt wnioskodawcy niezbędnych badań konserwatorskich, architektonicznych lub archeologicznych. W związku z tym warto już na wstępie inwestycji poznać istniejącą u konserwatora dokumentację oraz ewentualne potrzeby jej uzupełnienia.

Niezależnie od wymagań konserwatora, dla celów projektowych konieczne jest przeprowadzenie lub zweryfikowanie istniejącej inwentaryzacji strychu. Zakres inwentaryzacji musi obejmować układ przestrzenny strychu, konstrukcję stropu i więźby dachowej oraz rozmieszczenie instalacji. Powinien też obejmować niższe kondygnacje wraz z klatką schodową. Rzetelna ocena i diagnoza stanu istniejącej struktury zarówno konstrukcyjnej, jak i instalacyjnej ma zasadniczy wpływ na przyjęcie właściwych rozwiązań projektowych; późniejsze zmiany na etapie realizacji mogą wymagać sporządzania opracowań projektowych zamiennych oraz uzyskiwania kolejnych zgód od właścicieli nieruchomości. Inwentaryzacja budynku może wykazać potrzebę wykonania przebudowy klatki schodowej lub wejścia do budynku w celu spełnienia obecnych wymagań pożarowych i ewakuacyjnych. W przypadku jakichkolwiek różnic w rozwiązaniu tych elementów w stosunku do obecnych wymagań w grę wchodzi tylko dwa rozwiązania: przebudowa tych elementów w celu dostosowania do obecnych przepisów lub spełnienie wymagań warunków technicznych w inny sposób na podstawie ekspertyzy technicznej rzeczoznawcy budowlanego oraz rzeczoznawcy do spraw zabezpieczeń przeciwpożarowych. W ekspertyzie przedstawia się rozwiązania zamienne, które mają zapewnić bezpieczeństwo pożarowe w zakresie ewakuacji ludzi lub odporności pożarowej przegród budowlanych.

nych. Ekspertyza musi zostać uzgodniona przez Wojewódzkiego Komendanta Państwowej Straży Pożarnej. Rozwiązania zamiennie dopuszczone ekspertyzą mogą pozwolić na realizację inwestycji bez konieczności, nieproporcjonalnej do zasadniczego celu inwestycji, przebudowy budynku.

Formalnie wymaganym i praktycznie niezbędnym elementem przyszłego projektu przebudowy, nadbudowy i zmiany sposobu użytkowania istniejącego obiektu jest ekspertyza konstrukcyjna określająca stan konstrukcji budynku oraz jej przydatność do adaptacji. O ile przeniesienie dodatkowych obciążeń budynku na grunt nie jest zazwyczaj problemem, to nośność stropu nad ostatnią kondygnacją bywa niewystarczająca i wymaga podjęcia odpowiednich działań projektowych. Podobnie więźba dachowa z reguły wymaga przebudowy i dostosowania do obecnych wymagań. We wszystkich omawianych kamienicach zarówno strop nad ostatnią kondygnacją jak i więźba dachowa wymagały wzmocnienia lub zaprojektowania nowych konstrukcji.

W przypadku zauważenia objawów biologicznego porażenia elementów struktury budowlanej strychu należy także zasięgnąć opinii mykologa. W kamienicy przy ul. Grodzisko 3 ekspertyza mykologiczno-konstrukcyjna wykazała zły stan niemal wszystkich elementów nośnych więźby porażonej przez owady i grzyby (spuszczel, kołatek, wroślak rzędowy) wymuszając wymianę więźby dachowej.

### 3.3. Decyzja o warunkach zabudowy

Podstawowym dokumentem regulującym możliwość adaptacji pod względem formalno-administracyjnym jest miejscowy plan zagospodarowania przestrzennego albo w przypadku jego braku decyzja o warunkach zabudowy. Wobec powszechnego braku planów najczęściej konieczne jest uzyskanie decyzji o warunkach zabudowy.

Z uwagi na istniejącą funkcję budynku oraz względnie ograniczony zakres inwestycji z reguły nie ma przeszkód do wydania decyzji zezwalającej na zmianę sposobu użytkowania strychu. Zmiana sposobu użytkowania może nastąpić poprzez przebudowę, tj. wykonanie robót budowlanych, w wyniku których następuje przekształcenie obiektu bez zmiany jego charakterystycznych parametrów takich, jak: kubatura, powierzchnia, zabudowy, wysokość, długość, szerokość bądź liczba kondygnacji [2]. Jeżeli jednak nie ma przeszkód natury konserwatorskiej czy architektonicznej, możliwości uzyskania atrakcyjnej przestrzeni poddasza znacznie zwiększają się przy podniesieniu dachu i jego przebudowie. Dlatego, również w celu uniknięcia trudności interpretacyjnych przy wydawaniu pozwolenia na budowę co do formalnego zakresu inwestycji określonego w decyzji o warunkach zabudowy, korzystne jest objęcie przedmiotem wniosku o warunki zabudowy możliwie szerokiego katalogu prac budowlanych w tym nadbudowy czy nawet rozbudowy. W zasadzie w tytule decyzji najlepiej jest wymienić szczegółowo możliwość zmiany geometrii, wysokości ścianek



kolankowych i kąta nachylenia dachu, wprowadzenia lukarn, okien dachowych, balkonu, loggii, tarasu oraz wyodrębnienia kolejnej kondygnacji budynku.

Wymogiem formalnym określonym w decyzji o warunkach zabudowy jest zapewnienie odpowiedniej liczby miejsc postojowych dla projektowanych mieszkań. Dla zmiany sposobu użytkowania strychu na cele mieszkalne w Rzeszowie w strefie śródmiejskiej przyjmowany jest zazwyczaj się współczynnik 1,0 miejsca na lokal. Zorganizowanie nowych stanowisk postojowych nie jest łatwe zwłaszcza w gęstej tkance śródmiejskiej. Warunki techniczne nakładają szereg ograniczeń w postaci obowiązku zachowania odległości miejsc postojowych od okien pomieszczeń przeznaczonych na pobyt ludzi, granic działki budowlanej, czy placów zabaw dla dzieci [4]. Przepisy nie dopuszczają zbliżenia miejsc postojowych do granicy działki nawet wówczas, gdy po jej drugiej stronie również znajduje się parking. Dlatego wymaganie dotyczące koniecznej liczby miejsc postojowych może być krytyczne dla realizacji inwestycji. Najlepsza pod tym względem okazała się sytuacja w przypadku budynku przy ul. Grodzisko 3 - układ zabudowy i przestronne podwórze pozwoliły na wydzielenie dodatkowych miejsc postojowych. W przypadku braku takiej możliwości zachodzi konieczność rozważenia budowy nowych miejsc postojowych na działkach sąsiednich lub wydzierżawienie istniejących w sąsiedztwie prywatnych lub ogólnodostępnych miejsc postojowych. Możliwość taką musi przewidywać decyzja o warunkach zabudowy o czym trzeba pamiętać na etapie jej wydawania. W przypadku budynku przy Śreniawitów 2, gdzie istniejący układ zabudowy i gabaryt działki uniemożliwiały zaprojektowanie na jej powierzchni choćby jednego nowego miejsca postojowego, możliwość zapewnienia miejsc postojowych poza działką stało się warunkiem realizacji inwestycji.

Dbalność o przewidzenie w decyzji o warunkach zabudowy możliwości zastosowania nawet potencjalnie potrzebnych rozwiązań jest o tyle istotna, że w postępowaniu administracyjnym wydawania decyzji dwu a nawet trzykrotnie zawiadamia się właścicieli budynku i wszystkich właścicieli nieruchomości sąsiednich, choćby ich interes prawny w sposób oczywisty był żaden. Przy dużej liczbie stron postępowania cała procedura trwa wiele miesięcy, a możliwe trudności w prawidłowym zawiadomieniu stron przy nieuregulowanych sytuacjach majątkowych nieruchomości, mogą sprawić że wydanie decyzji będzie trwać nawet lata. Wobec takich okoliczności raz uzyskana decyzja posiada szczególną wartość i potrzeba jej zmiany nie wzbudza entuzjazmu.

### **3.4. Wymagania konserwatorskie**

W strefie śródmiejskiej znaczna część obiektów i obszarów objęta jest ochroną konserwatorską. W przypadku chronionych budynków decyzja o warunkach zabudowy musi zostać uzgodniona przez właściwego wojewódzkiego konserwatora zabytków. W ogólnym ujęciu zadaniem organu ochrony zabytków jest zadbanie żeby zamierzenie inwestycyjne nie spowodowało uszczerbku

dla chronionych wartości zabytku. Warto przy tym zaznaczyć, iż wartości te nie są zawsze jednakowe. W przypadku, gdy planowana jest przebudowa budynku indywidualnie wpisanego do rejestru lub ewidencji, kompetencje organu konserwatorskiego są bardzo szerokie i dotyczą w zasadzie substancji całego obiektu. Natomiast, jeżeli zamierzenie dotyczy obiektu położonego w ramach chronionego układu urbanistycznego, wojewódzki konserwator zabytków musi jedynie odnieść się do kwestii związanych z chronionym układem urbanistycznym. W sposób naturalny im bardziej wartościowy obiekt, tym wymagania konserwatorskie mogą mieć szerszy zakres. Jak pokazuje praktyka znaczenie przy ustalaniu wytycznych konserwatorskich ma przede wszystkim specyfika obiektu i jego indywidualny charakter. Choć formalnie można by było się spodziewać, że zakres wymagań konserwatorskich związanych z budynkami znajdującymi się w ewidencji powinien być mniejszy niż tych ujętych w rejestrze, w praktyce oczekiwania jakie sformułował urząd ochrony zabytków wobec kamienicy przy pl. Śreniawitów (budynek ewidencyjny) okazały się bardziej złożone niż w przypadku budynku przy ul. Grodzisko 3 znajdującego się w rejestrze zabytków. Przy pl. Śreniawitów konserwator rozważał m.in. wymóg wybudowania całkiem nowej klatki schodowej. Powodem wystosowania takiego warunku było dążenie do zachowania historycznej klatki schodowej wraz ze sztukaterią na zwieńczeniu istniejących schodów wachlarzowych. Ostatecznie, w toku ustaleń z projektantem, konserwator zgodził się na transfer wartościowego zdobienia umożliwiając tym samym adaptację strychu bez wymogu realizacji zabiegów podważających możliwość realizacji inwestycji. Indywidualny charakter problematyki obrazuje także zakres wymagań wystosowany dla zabytku rejestrowego przy ul. Grodzisko 3, w którym konserwator nakazał jedynie zachować układ elewacji frontowej, ale dopuszczając wstawienie okien połaciowych, oraz wyremontować więźbę. Postulat przebudowy dachu w części południowej nie wzbudził natomiast zastrzeżeń, co okazało się zupełnie wystarczającym dla prawidłowego i w pełni optymalnego ukształtowania funkcji na etapie projektu adaptacji.

Dlatego jeszcze przed wydaniem decyzji o warunkach zabudowy właściwym jest podjęcie kontaktu z urzędem ochrony zabytków w kwestii wymagań konserwatorskich w stosunku do obiektu. Może to odbyć się w trybie art. 27 ustawy o ochronie zabytków [3] w formie pisemnych zaleceń konserwatorskich. Pominięcie na tym etapie rozmów z konserwatorem może skutkować znacznymi ograniczeniami inwestycji w decyzji o warunkach zabudowy wynikającymi z braku pewności organu konserwatorskiego co do zamiarów inwestora.

#### **4. Podsumowanie**

Problematyka etapu wstępnego zmiany sposobu użytkowania strychu na cele mieszkalne jest złożona i wielowątkowa, zwłaszcza w strefie śródmiejskiej. Skuteczne przeprowadzenie adaptacji strychu wymaga dobrej znajomości za-

gadnień technicznych, projektowych, prawnych i administracyjnych. Konieczne jest podjęcie kompleksowej analizy konkretnego przypadku już w fazie wstępnej, najlepiej przy udziale doświadczonego architekta. W całym procesie inwestycyjnym występuje bowiem szereg czynników, które mają istotny wpływ na możliwość i sposób prowadzenia adaptacji a których prawidłowe rozpoznanie będzie miało znaczący wpływ na całą inwestycję.

### Literatura

- [1] Ustawa z dnia 24 czerwca 1994 r. o własności lokali.
- [2] Ustawa z dnia 7 lipca 1994 r. Prawo budowlane
- [3] Ustawa z dnia 23 lipca 2003 r. o ochronie zabytków i opiece nad zabytkami
- [4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie.

## ISSUES OF PRELIMINARY PHASE THE LOFT CONVERSION IN DOWNTOWN BY EXAMPLES OF SELECTED TENEMENTS IN RZESZÓW

### Summary

One of the popular ways of acquiring new usable space in city centers is an adaptation loft buildings. Interest is the ability to produce flats with a unique, individual character at relatively low cost. As it turns out the process of acquiring and converting the loft can be long, especially complex. Already the preliminary stage, before conversion itself, requires a lot of reconnaissance and formal actions.

The issue is discussed on the background of the three examples of adaptations four-storey townhouses in Rzeszów, which differ in terms of the requirements conservation of monuments: tenement at 1 Kraszewski Street lying in the zone of conservation protection , tenement at 2 Śreniawitów Square entered in the records of monuments and tenement at 3 Grodzisko Street entered in the register of monuments . The article presents a brief description and inventory drawings of selected buildings.

Shown the issues of formal and legal steps of preliminary stage of the loft conversion, juridical aspects of course of action, form and scope of the consent of the owners to adapt the attic. Raise an issue of needed inventory and the necessary technical expertise; Presents issues related to the formulation of an application for a zoning permit, and highlights the important aspects of the provisions of the decision. Reference was made to the issue of determining preservationist requirements at the initial stage of an investment.

**Keywords:** adaptation, investment process, formal and legal requirements

DOI:10.7862/rb.2014.107

*Przesłano do redakcji: 24.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 18.12.2014 r.*

Marta PISAREK<sup>1</sup>  
Marta GARGAŁA<sup>2</sup>

## ROŚLINY ENERGETYCZNE JAKO KREATORZY KRAJOBRAZU

W warunkach klimatycznych Polski istnieje realna szansa włączenia do systemu energetycznego różnych gatunków roślin, które obecnie mają niewielkie znaczenie w kreowaniu krajobrazu. Wzrost powierzchni ich upraw może być przyczyną zmiany wizerunku obszarów wiejskich. Dlatego też w pracy dokonano analizy znaczenia plantacji energetycznych jako wartości dodanej wykorzystywanej w architekturze krajobrazu i turystyce. Rośliny energetyczne przyczynią się do zwiększenia atrakcyjności krajobrazowej poprzez bezpośrednie zaspokojenie potrzeb człowieka w zakresie piękna estetyki i harmonii, bowiem wnoszą w przestrzeń pozytywny akcent kolorystyczny. Rośliny tj. rzepak ozimy, topinambur, róża bezkolcowa dzięki jednolitej strukturze kompozycji tworzą duże płyty kolorystyczne, które dają niezamierzony efekt przekazu artystycznego. Ponadto uprawa roślin energetycznych na dużych powierzchniach umożliwia wykorzystanie ich w turystyce poprzez tworzenie różnego typu labiryntów. Za atrakcyjne uważane są przede wszystkim labirynty wykonane z roślin jednorocznych: kukurydza zwyczajna, konopie siewne, bowiem corocznie umożliwiają one tworzenie nowych schematów ścieżek. Niektóre gatunki, jak rdest Sachalińskiego mogą przyczynić się do trwałego zaburzenia składu florystycznych zbiorowisk łąkowych i pól uprawnych, podobnie jak to miało miejsce w przypadku introdukcji barszczu Sosnowskiego na terenie Bieszczad. Wpływ na wizerunek przestrzeni mogą mieć nie tylko rośliny energetyczne uprawiane wielkopowierzchniowo, ale również gatunki o mniejszym znaczeniu ekonomicznym, często wykorzystywane do tworzenia ogrodów tematycznych.

**Słowa kluczowe:** przestrzeń krajobrazowa, barwa, atrakcja turystyczna, bioróżnorodność

### 1. Wstęp

Przebieg terenów wiejskich jest szczególnie wrażliwa na kształtowanie, ma, bowiem swój dobrze określony rodowód i silnie zdefiniowane własne, oryginalne cechy i właściwości, ukształtowane w harmonijnym ciągu zdarzeń na

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Marta Pisarek, Uniwersytet Rzeszowski, ul. Ćwiklińskiej 1A, 35-601 Rzeszów, 178721635, mpisarek@univ.rzeszow.pl

<sup>2</sup> Marta Gargała, Uniwersytet Rzeszowski, ul. Ćwiklińskiej 1A, 35-601 Rzeszów, 178721659, mgargala@univ.rzeszow.pl

przestrzeni wielu wieków. Jest przestrzenią pozbawioną cech kosmopolitycznych, charakterystycznych dla miasta, ułatwiających w konsekwencji pewną dowolność działań [17, 23]. Najbardziej wyrazistą cechą krajobrazu rolniczego jest stosunkowo duży udział powierzchniowy, a często wręcz przestrzenna dominacja, agroekosystemów. W Wielkopolsce, na Pomorzu, Mazowszu, Dolnym Śląsku spotyka się wielkoobszarowe gospodarstwa wysoko produktywnego rolnictwa konwencjonalnego, a na pozostałym terenie małoobszarowe gospodarstwa o mozaikowym układzie pól. Nie mniej jednak o walorach estetycznych krajobrazu rolniczego w znacznej mierze decyduje przyjęty system produkcji roślinnej, a tym samym dobór gatunków w płodozmianie [16]. Obecnie obserwuje się dominację płodozmianów uproszczonych oraz wzrost powierzchni ugorów i odłogów, przez co mamy do czynienia z trudnym do urozmaicenia, smętnym i monotonnym krajobrazem rolniczym [11, 15]. Jest to tym bardziej ważne zagadnienie, ponieważ zachwiany przez wydarzenia historyczne proces kształtowania wzorców przestrzennych owocuje społeczną obojętnością dla spraw estetyki krajobrazu i akceptacją działań zmierzających do jego degradacji. Skutkuje to pogorszeniem jakości przestrzeni wiejskiej [4], mimo wciąż podnoszonych postulatów jej poprawy [22].

W związku z dążeniem do wielofunkcyjnego rozwoju obszarów wiejskich oraz realizacją założeń Dyrektywy UE 2009/28/EC w najbliższych latach planowany jest wzrost areалу upraw roślin z przeznaczeniem na cele energetyczne [24]. Dlatego też w niniejszej pracy dokonano próby ustalenia następstw przenikania tych upraw do przestrzeni rolniczej oraz ukazanie alternatywnych sposobów wykorzystania plantacji energetycznych.

## 2. Produkcja „zielonej energii” na obszarach wiejskich

Odnawialne źródła energii są źródłami lokalnymi, związanymi przede wszystkim z obszarami wiejskimi [7]. Produkcja energii odnawialnej wiąże się i ma wpływ na zmiany w krajobrazie otwartym poprzez wprowadzanie nowych elementów technicznych [8, 29] (tab. 1).

W literaturze tematu można spotkać liczne wyniki badań dotyczących oddziaływania instalacji wytwarzających energię z OZE na elementy środowiska przyrodniczego [2], rekreacyjnego [3] i fizjonomię krajobrazu [1, 9, 25, 26, 27]. Funkcjonowanie niektórych „zielonych inwestycji” nie jest możliwe bez udziału roślin uprawnych. Analizy dowodzą, że pod rolnictwo energetyczne bez większego uszczerbku w gospodarce żywnościowej można przeznaczyć 1,5-1,7 mil ha (10% areálu krajowego). Z tej wielkości na 1 mln ha należałoby uprawiać rośliny z przeznaczeniem do produkcji biopaliw, a pozostałe 500-700 tys. ha mogłoby zostać zagospodarowane na uprawy dla potrzeb energetyki cieplnej i elektrycznej. Z celowych upraw energetycznych można wytwarzać:

- bele, zrębki, pelety i brykiety (surowiec, np.: wierzba energetyczna, ślazo-wiec pensylwański, róża bezkolcowa, rdest sachalińskiego, miskant olbrzy-

Tabela 1. Koncesjonowane źródła energii w Polsce w 2011 roku

Table. 1. Licensed sources of energy in Poland in 2011

Rodzaj źródła OZE	Liczba instalacji w 2011r. (szt.)	Struktura wytworzonej energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii w 2012r.	
		Ilość [MWh]	%
Elektrownie na biogaz	157	528 099,178	3,79
Elektrownie na biomasę	19	1 097 718,577	7,88
Elektrownie wytwarzające e. e. z promieniowania słonecznego	4	1 136,802	0,01
Elektrownie wiatrowe	472	4 524 473,670	32,46
Elektrownie wodne	741	2 031 544,902	14,58
Współspalanie	44	5 754 955,293	41,29
<b>Łącznie</b>	<b>1437</b>	<b>13 937 928,422</b>	<b>100</b>

Źródło: opracowanie własne na podstawie [14]

Source: own elaboration based: [14]

- mi, słonecznik bulwiasty);
- alkohole (surowiec, np.: ziemniak jadalny, burak cukrowy, kukurydza zwyczajna) jako dodatki do benzyn silników gaźnikowych;
- olej rzepakowy (surowiec: rzepak) jako paliwo do silników wysokoprężnych;
- biogaz (surowiec, np.: kukurydza zwyczajna, miskant olbrzymi, sorgo cukrowe) [24].

Rośliny energetyczne pochodzące z upraw celowych charakteryzują się dużym przyrostem rocznym, wysoką wartością opałową, znaczną odpornością na choroby i szkodniki oraz stosunkowo niewielkimi wymaganiami glebowymi. Ich uprawa jest najlepszym sposobem wykorzystania i rekultywacji terenów zdegradowanych rolniczo. Niezwykle istotną sprawą jest również możliwość mechanizacji prac agrotechnicznych związanych z zakładaniem plantacji oraz zbiorem plonu. Plantacje mogą być średnio użytkowane przez 15-20 lat [21]. Nie mniej jednak założenie i prowadzenie plantacji energetycznej stanowi inwestycję o określonych kosztach, która zwrócić się może tylko w przypadku dostatecznie dużego arealu [30].

### 3. Krajobraz pisany barwą

Roślinność ma wpływ na estetykę krajobrazu i bezpośrednio oddziałuje na strefę sensoryczną człowieka [6]. Wzrost zainteresowania roślinami energetycznymi przyczyni się do pojawienia się w przestrzeni krajobrazowej zwar tych, jednolitych pod względem struktur i kolorystyki powierzchni. Jak wynika z danych zawartych w tabeli 2 w ciągu sezonu wegetacyjnego wycinki krajobrazu przybierać będą ubarwienia: od jasno zielonego wczesną wiosną, poprzez ciemno zielone w pełni lata, po jasno brązowe jesienią. Ujednoliconą kolorystyką zostanie rozproszona domieszką żółtego, białego i różowego koloru w okresie kwitnienia tych roślin, podobnie jak to miało miejsce w krajobrazach tradycyjnych z łąkami zbóż, w których barwny akcent wprowadzały chwasty polne [10]. Ponadto niektóre rośliny energetyczne zalicza się do gatunków wieloletnich, co ma znaczenie w powstawaniu efektów wizualnych również w okresie zimowym.

Uprawy energetyczne kształtują przestrzeń nie tylko kolorystyką i chromatyką. Ich zróżnicowana wysokość urozmaica teren, co ma szczególne pozytywne znaczenie w krajobrazie nizinym. Jednak zaniechanie użytkowania wieloletnich plantacji roślin energetycznych może być przyczyną powstawania krajobrazów negatywnych. Niektóre gatunki, tj. rdest Sachalińskiego mogą niekontrolowanie przeniknąć do innych biocenoz i jako rośliny inwazyjne zniekształcić trwale pierwotny skład gatunkowych, a tym samym typowy widok dla tych siedlisk. Podobne zjawisko miało miejsce w przeszłości na terenie Bieszczad i było związane z introdukcją barszczu Sosnowskiego na cele paszowe [20].

Energetyczne rośliny powinny zostać uwzględnione w katalogu Rolniczych Upraw Krajobrazowych, którego podstawę opracowali pracownicy i studenci Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Według założeń RUK rośliny należy wprowadzać w krajobraz nie tylko zgodne z zaleceniami produkcyjnymi, ale również w oparciu o wcześniej ustalony plan kompozycyjny [5]. Dzięki nasadzeniom realizowanym zgodnie z założeniami RUK-u krajobraz otwarty uzyskuje harmonijny widok, pozytywnie oddziałujący na lokalnych mieszkańców oraz użytkowników ruchu drogowego, kolejowego i turystów pieszych. Jak donosi Malinowska [19] obserwator w trakcie poruszania się po terenie rejestruje szereg kolejnych obrazów w określonych odstępach czasu, związanych ściśle z fizjonomią pokonywanej przestrzeni, odczuwając różne napięcia emocjonalne związane z estetyką oglądanego środowiska.

Tabela 2. Kolorystyka plantacji pól uprawnych

Table 2. Colour plantation crop fields

Nazwa polska	Trwałość plan-tacji	Organ nadają- cy kolor	Kolorystyka w sezonie wegetacyjnym									
			II	III	IV	V	VI	VII	VII	IX	X	
Burak cukrowy	J	liść	-			jasna zieleń		zieleń				
Kukurydza cu-krowa	J	liść	-			jasna zieleń	zieleń		brąz			
Miskant olbrzymi	W	liść	jasny brąz	jasna zieleń			zieleń			jasny brąz		
Rdest sachalin-skiego	W	liść, kwiat	jasny brąz	zieleń			zieleń			jasny brąz		
Róża bezkolcowa	W	liść	brąz	jasna zieleń	zieleń	różowy		zieleń	brąz			
						biały						
Rzepak ozimy	J	kwiat, owoc	jasna zieleń			żółty	zieleń			-		
Ślazier pen-sylwański	W	liść, kwiat, łodyga	-	jasna zieleń				zieleń	brąz			
							biały					
Topinambur	W	liść, kwiat	-	jasna zieleń			zieleń		żółty			
Wierzba wiciowa	W	liść, łodyga	brąz	jasna zieleń			zieleń			brąz		
Ziemniak jadalny	J	liść, kwiat	-	jasna zieleń	biel, róż			brąz	-			
					zieleń							

Objaśnienia: J – jeden rok, W – wieloletnia; Explanation: J – one year, W – perennial

Źródło: opracowanie własne na podstawie [18]

Source: own elaboration based [18]

#### 4. Edukacyjne i turystyczne zastosowanie roślin energetycznych

W IHAR w Radzikowie prowadzone są doświadczenia związane z poszukiwaniem nowych roślin przydatnych w energetyce [28] (tab. 3).



Tabela 3. Potencjalne gatunki roślin stosowane OZE

Table 3. Potential plant species used for RSE

Nazwa		charakterystyka
polska	łacińska	
byliny, dwuliścienne		
roznik przerośnięty (sylfia)	<i>Silphium perfoliatum</i>	rodzina: astrowate; wysokość: 2,5-3 m; liście: duże, ząbkowane, trójkątne; kwitnienie: VII-IX; kolor kwiatu: żółty
lianka (licznik siewny, rydz)	<i>Camelina sativa</i>	rodzina: kapustowate; wysokość: 0,8- 1,5 m; liście: całobrzegie, skrętoległe; kwitnienie: V-X; kolor kwiatu: żółty
ślaz okółkowy (malwa pastewna)	<i>Malva verticillata</i>	rodzina: ślazowe; wysokość: 0,4-1 m; liście: długoogonkowe, karbowane; kwitnienie: VII-IX; kolor kwiatu: bladoróżowy
ślazówka turyngska	<i>Lavatera thuringiaca</i>	rodzina: ślazowe; wysokość: 0,5-1,3 m; liście: najwyższe są jajowate; kwitnienie: VI-VII; kolor kwiatu: jasno różowe
byliny jednoliścienne (trawy)		
perz wydłużony zbitokępkowy	<i>Agropyron elongatum</i>	rodzina: wiechlinowate; wysokość: do 2 m; liście: ciemnozielone lub szarozielone, dzięki woskowemu nalotowi; kwitnienie: VI-VII; kolor kwiatu: jasno zielony
stokłosa bezostna	<i>Bromus inermis</i>	rodzina: wiechlinowate; wysokość: do 1,4 m; liście: równowąskie, zwykle fioletowo zabarwione.; kwitnienie: VI-VII; kolor kwiatu: jasno zielony
sorgo miniaturowe	<i>Sorghum minima</i>	rodzina: wiechlinowate; wysokość: 0,5- 4 m; liście: bardzo długie, zwykle fioletowo zabarwione.; kwitnienie: VIII- IX; kolor kwiatu: jasno zielony, brązowy
kostrzewa trzciniowa (forma pastewna)	<i>Festuca arundinacea</i>	rodzina: wiechlinowate; wysokość: do 1,2 m; liście: liczne, duże, ciemnozielone, lancetowate liście, wyraźnie unerwione z białym nerwem środkowym, kwitnienie: VI-VII; kolor kwiatu: jasno zielony
mozga trzciniowata	<i>Phalaris arundinacea</i>	rodzina: wiechlinowate; wysokość: do 1,3 m; liście: sztywne, szorstkie, szarozielonego koloru; kwitnienie: VI-VII; kolor kwiatu: brunatnoczerwony

Tabela 3. Potencjalne gatunki roślin stosowane OZE (cd.)

Table 3. Potential plant species used for RSE (cont.)

proso różgowe	<i>Panicum virgatum</i>	rodzina: wiechlinowate; wysokość: 1,8-2,2 m; liście: trzcinowate, proste lub lekko wygięte, zielone z brązowym odcieniem, kwitnienie: VI-IX; kolor kwiatu: białobrązowy
stokłosa uniolowata	<i>Bromus willdenowii</i>	rodzina: wiechlinowate; wysokość: do 1 m; liście: owłosione, kwitnienie: VI-VII; kolor kwiatu: jasnozielony
kłósówka miękka	<i>Holcus mollis</i>	rodzina: wiechlinowate; wysokość: do 1 m; liście: nagie lub słabo owłosione, kwitnienie: VI-VII; kolor kwiatu: jasnozielony
wydmuchrzyca groniasta	<i>Leymus ramosus</i>	rodzina: wiechlinowate; wysokość: do 1,5 m; liście: wąskie bardzo długie, kwitnienie: VII-VII; kolor kwiatu: jasnozielony

Źródło: opracowanie własne na podstawie [28]

Source: own elaboration based [28]

Gatunki te obecnie uznawane za uprawy marginalne stanowią ciekawą propozycję do kształtowania przestrzeni publicznej, ze względu na wysoką wytrzymałość w ekstremalnych warunkach siedliskowych. Ponadto są chętnie eksponowane w ogrodach botanicznych. Dzięki kolekcjom istnieje możliwość prowadzenia zajęć edukacyjnych dotyczących zastosowania i uprawy roślin energetycznych. Przykładem wykorzystania pozaprodukcyjnego tego typu roślinności jest Śląski Ogród Botaniczny w Mikołowie. Od 2007 roku posiada on w swoich zasobach najpopularniejsze w Polsce gatunki roślin energetycznych [12].

Rośliny energetyczne mogą być wykorzystywane do budowy produktu turystycznego. Od 2007 roku w Pałacu w Kurozwękach Marcin Popiel – obecny właściciel zajmuje się projektowaniem labiryntów (tab. 4).

W pierwszym roku powstania labiryntu nawiązywał do mistrzostw Europy w piłce nożnej. Ścieżki przedstawiały napis Polska Ukraina (pisane cyrylicą) EURO 2012 oraz wytyczono kształt piłki futbolowej. W 2008 r. motywem labiryntu były obchody 50 lat współpracy województwa świętokrzyskiego z obwodem Winnickim na Ukrainie. W roku 2009 przy współpracy z Europejskim Centrum Bajki w Pacanowie powstał największy na świecie Koziołek Matołek. Na powierzchni ok. 4 ha w 2010 roku został naniesiony projekt poświęcony obchodom dwusetnej rocznicy urodzin Fryderyka Chopina. W roku 2011 nowością było pole kukurydzy zasiane pięcioma jej odmianami; projekt labiryntu nawiązywał do postaci Św. Jakuba. W 2012 r. labirynt przedstawiał bizona w wiosce indiańskiej i był największym, jaki został stworzony do tej pory

Tabela 4. Materiał roślinny i tematyka labiryntów w Kurozwałkach w latach 2007-2014 .

Table 4. Plant material and subject mazes in Kurozwałki in 2007-2014

Rok	Powierzchnia [ha]	Długość ścieżek [km]	Materiał roślinny	Tematyka
2007	1,3	2,52	Kukurydza zwyczajna	Euro 2012
2008	3,5	4,50	Kukurydza zwyczajna	50 lat współpracy województwa świętokrzyskiego z obwodem Winnickim na Ukrainie
2009	3,5	4,30	Kukurydza zwyczajna	Koziołek Matolek
2010	4,0	4,75	Kukurydza zwyczajna	200 rocznica urodzin Fryderyka Chopina.
2011	4,0	4,35	Kukurydza zwyczajna	Św. Jakub
2012	4,5	5,50	Kukurydza zwyczajna	Bizon w wiosce indiańskiej
			Słonecznik zwyczajny	Napis Kurozwałki
2013	4,5	4,70	Konopie włókniste	Julian Tuwim
2014	Brak danych	Brak danych	Kukurydza zwyczajna	Jan Paweł II

Źródło: opracowanie własne na podstawie [13]

Source: own elaboration based [13]

w Kurozwałkach. W tym samym roku do wykonania mniejszego labiryntu z napisem Kurozwałki wykorzystano słonecznik zwyczajny. W roku 2013 labirynt nawiązywał do tematyki wierszy Juliana Tuwima i powstał z konopi włóknistej. Rok 2014 to powrót do pierwotnej rośliny, z której powstawały labirynty - kukurydzy zwyczajnej a motyw przewodni to postać św. Jana Pawła II [13] (tab. 4).

## Literatura

- [1] Badora K.: Farmy wiatrowe jako elementy determinujące strukturę i funkcjonowanie krajobrazu wiejskiego, *Architektura Krajobrazu*, nr 2, 2013, s. 58-77.
- [2] Banak M.J.: Lokalizacja elektrowni wiatrowych – uwarunkowania środowiskowe i prawne, *Człowiek i Środowisko*, nr 34(3-4), 2010, 117-128.
- [3] Bożętka B.: Pozyskiwanie energii wietrznej a zmiany krajobrazu. Konsekwencje dla funkcji rekreacyjnej, *Problemy Ekologii Krajobrazu*, Tom XXVII, 2010, s. 49-58.
- [4] Bryś K., Ojrzyńska H.: Przemiany krajobrazu wsi górskich w Sudetach Wschodnich, *Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego*, nr 14 Krajobraz a turystyka, 2010, s. 159-173.

- [5] Chomiak A., Rolnicze uprawy krajobrazowe na trasie Wrocław-Kłodzko. Paca magisterska, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, 2008, s. 77-81.
- [6] Chyliński K.W., Fornal-Pieniak B.: Walory wizualne roślinności spontanicznej na dachach przemysłowych budynków w Warszawie, *Problemy Ekologii Krajobrazu*, Tom XX, 2008, s. 379-384.
- [7] Czapiewska G.: Energia odnawialna i jej wpływ na rozwój obszarów wiejskich pomorza środkowego, [w:] Jasiulewicz M. (red.), *Wykorzystanie biomasy w energetyce aspekty ekonomiczne i ekologiczne*, Wyd. Polskie Tow. Ekonomiczne, Warszawa 2011.
- [8] Czarnecki A., Lewandowska-Czarnecka A.: Cechy kluczowe a pojemność krajobrazu na zmiany, [w:] Łach J., Zaręba A. *Krajobrazy zdefiniowane – znaki i symbole w krajobrazie*, Wyd. Inst. Geografii i Rozwoju Regionalnego UW, Wrocław, 2012, s. 65-84.
- [9] Fiutowska G., Dąbrowski L.: Rozwój energetyki wiatrowej w aspekcie planistycznym i krajobrazowym na przykładach gmin Puck i Gniewino oraz miasta Gdynia, *Problemy Ekologii Krajobrazu*, Tom XXXV, 2013, s. 65-74.
- [10] Gargała M., Trąba C.: Chwasty segetalne we współczesnym krajobrazie otwartym gminy Markowa, *Architektura Krajobrazu*, 2014 (w druku).
- [11] Hernik J.: Potrzeba uwzględniania walorów krajobrazu kulturowego w zarządzaniu gminą wiejską, *Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego*, nr 10 Zarządzanie krajobrazem kulturowym, 2008, s. 61-68.
- [12] <http://sibg.org.pl/> [dostęp: 2 czerwca 2014 r.].
- [13] <http://www.kurozweki.com/pl/wycieczki atrakcje/labirynt> [dostęp: 2 czerwca 2014 r.].
- [14] <http://www.ure.gov.pl> [dostęp: 2 czerwca 2014 r.].
- [15] Janecki J.: Możliwości kształtowania układów naturalnych i półnaturalnych w krajobrazach otwartych, *Nauka Przyroda Technika*, Tom 2, nr 4, [http://www.npt.up-poznan.net/tom2/zeszyt4/art\\_46.pdf](http://www.npt.up-poznan.net/tom2/zeszyt4/art_46.pdf) [dostęp: 2 czerwca 2014 r.].
- [16] Koreleski K.: Ochrona i kształtowanie terenów rolniczych w systemie kreowania krajobrazu wiejskiego, *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*, nr 4, 2009, s. 5-20.
- [17] Lipińska B.: Kultura użytkowania przestrzeni – degradacja krajobrazu wiejskiego, [w:] Liżewska I., Knercera W., Wyd. Stowarzyszenie WK „Borussia”, Olsztyn 2003.
- [18] Lisowska A.: *Technologie zbioru roślin energetycznych*, Wyd. SGGW, Warszawa, 2010.
- [19] Malinowska E.: Wpływ atrakcyjności wizualnej krajobrazu na potencjał turystyczny Nadwiślańskiego Parku Narodowego i jego otuliny, [w:] Richling A. *Problemy ekologii krajobrazu t. XXVII*, s. 277-285.
- [20] Miklaszewska K.: Barszcz Sosnowskiego – obcy gatunek inwazyjny: biologia, zagrożenia, zwalczanie, *Progress in Plant Protection/Postępy w Ochronie Roślin*, nr 48(1), 2008, s. 297-300.
- [21] Niedziółka I., Zuchniarz A.: Analiza energetyczna wybranych rodzajów biomasy pochodzenie roślinnego, *Matrol, Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa*, nr 8A, 2006, s. 232-237.
- [22] Polska A.: Oceny estetyczne krajobrazu, *Prace Komisji Krajobrazu Kulturowego*, nr 15 Niematerialne wartości krajobrazów kulturowych, 2011, s. 185-192.
- [23] Sobczak K., Trzaskowska E.: Miedze, samotniki, czyżnie – wyznaczniki tożsamości krajobrazu rolniczego Polski, [w:] Janecki J. Borkowski Z. (red.), *Krajobraz i ogród wiejski*, nr 4 Dziś i jutro wsi, s. 15-35.

- [24] Sobolewski M.: Perspektywy wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce, *Studia BAS*, nr 1(21), 2010, s. 267-290.
- [25] Sowińska-Świerkosz B., Chmielewski T.J., Pawlas A., Prognoza presji projektowanych siłowni wiatrowych na fizjonomię krajobrazu Wyżyny Lubelskiej. *Problemy Ekologii Krajobrazu*, Tom XXXV, 2013, s. 55-63
- [26] Staszek W., Niecikowski K.: Problemy zmian krajobrazu w dobie intensywnego rozwoju energetyki wiatrowej, [w:] Chylińska D., Łach J. *Studia krajobrazowe a ginące krajobrazy*, Wyd. Inst. Geografii i Rozwoju Regionalnego UW, Wrocław, 2010, s. 329-338.
- [27] Wiklent G., Kistowski M.: Wpływ przedsięwzięć elektroenergetycznych na wybrane elementy środowiska przyrodniczego i krajobraz gminy Pelpin. *Problemy Ekologii Krajobrazu*, Tom XXXV, 2013, s. 19-44.
- [28] [www.ihar.edu.pl](http://www.ihar.edu.pl) [dostęp: 2 czerwca 2014 r.].
- [29] Zabłocki M.: Determinanty wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce, *Technika Poszukiwań Geologicznych Geotermia, Zrównoważony Rozwój*, nr 2, 2013, s. 29-44.
- [30] Zaliwski A.S., Hołaj J.: Modele gospodarstwa jako źródło danych do optymalizacji produkcji roślin energetycznych w gminie, *Inżynieria Rolnicza*, nr 2(137), 2012, s. 347-355.

## ENERGY CROPS AS CREATORS OF LANDSCAPE

### Summary

In Polish climatic conditions, there is a real chance of inclusion in to the energy system of different species of plants, which currently have little importance in creating the landscape. Increase in the area of crop may be the cause of changing the image of rural areas. Therefore, the study analyzes the importance of energy plantations as an added value used in landscape architecture and tourism. Energy crops will increase the attractiveness of the landscape through the direct satisfaction of human needs in the field of aesthetic beauty and harmony, as in space make a positive accent color. Plants such as *Brassica napus*, *Helianthus tuberosus*, *Rosa multiflora* through the uniform structure of the composition form large patches of color that give the unintended effect of artistic communication. In addition, the cultivation of energy crops on large areas allows to use them in tourism through the creation of various types of mazes. Considered to be attractive primarily mazes made from annual plants: *Zea mays*, *Cannabis sativa* hemp, because every year they enable the creation of new patterns of tracks. Some species, such as the *Reynoutria sachalinensis* can contribute to sustainable disorders floristic composition of meadow and arable land, as it did in the case of introduction of *Heracleum sosnowskyi* in the Bieszczady mountains. The impact on the image of the space may have not only grown energy crops large areas, but also species of lesser economic importance, is often used to create thematic gardens.

**Keywords:** space landscape, color, tourist attraction, biodiversity

DOI:10.7862/rb.2014.108

Przesłano do redakcji: 20.11.2014 r.

Przyjęto do druku: 04.09.2014 r.

Sławomir RABCZAK<sup>1</sup>  
Danuta PROSZAK-MIĄSIK<sup>2</sup>  
Krzysztof NOWAK<sup>3</sup>

## WYKORZYSTANIE SYSTEMU FREE-COOLINGU W KLIMATYZACJI

Ciągle rosnące ceny energii elektrycznej, często zmuszają użytkowników do poszukiwania oszczędności, oraz nowych, tanich i ekologicznych źródeł energii. W wielu gałęziach przemysłu, handlu są wprowadzane nowoczesne urządzenia mające na celu zmniejszenie zużycia energii elektrycznej. Również w systemach klimatyzacji coraz częściej stosuje się różnego rodzaju urządzenia zmniejszające koszty eksploatacyjne. Do takich rozwiązań należy system free-cooling'u. Polega on na wykorzystaniu powietrza zewnętrznego do procesu schładzania powietrza wewnętrznego w sposób pośredni lub bezpośredni. Stosowanie rozwiązania bezpośredniego jest możliwe jedynie, gdy temperatura powietrza zewnętrznego spadnie poniżej temperatury powietrza w pomieszczeniu, czyli w okresie przejściowym i zimowym, gdy wymagane jest jeszcze chłodzenie na skutek dużych zysków ciepła. Polega on na bezpośrednim nawiewaniu chłodniejszego powietrza zewnętrznego, po wcześniejszej jego obróbce w celu nadania mu odpowiednich parametrów. Free-cooling pośredni, najczęściej jest realizowany poprzez zamontowanie dodatkowej chłodnicy free-cooling i zaworu trójdrogowego w sprężarkowym agregacie chłodniczym. Gdy temperatura na zewnątrz spadnie poniżej temperatury powrotu medium pośredniczącego, free-cooling rozpoczyna pracę częściowego lub przy niższych temperaturach całkowitego schładzania czynnika pośredniczącego. W artykule przedstawiono analizę zapotrzebowania w chłód dla wybranego obiektu oraz możliwość pokrycia częściowego z wykorzystaniem systemu free'cooling'u. Określone zostały granice czasowe stosowania tego typu systemu w oparciu o wykres tz-tp oraz określone wielkości mocy chłodniczej możliwe do pozyskania w tym systemie.

**Słowa kluczowe:** free-cooling, chłodzenie, chiller, moc chłodnicza.

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Sławomir Rabczak, Politechnika Rzeszowska, Powstańców Warszawy 12, 17-865 1699, rabczak@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Danuta Proszak-Miąsik, Politechnika Rzeszowska, Powstańców Warszawy 12, 17-865 1699, dproda@prz.edu.pl

<sup>3</sup> Krzysztof Nowak, Politechnika Rzeszowska, Powstańców Warszawy 12, 17-865 1699, krzynow@prz.edu.pl

## 1. Wstęp

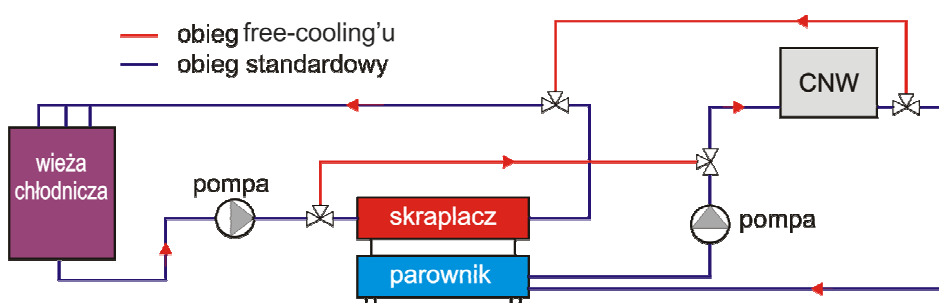
System free-cooling, jest stosowany głównie tam gdzie zyski ciepła w danym obiekcie są znaczne przez cały rok. Do takich obiektów zalicza się min.: serwerownie, centra handlowe, zakłady przemysłowe. Stosowanie tego systemu wiąże się również ze znacznym zwiększeniem nakładów inwestycyjnych, poniesionych na zakup agregatów wody lodowej wyposażonych w układ free-cooling'u, głównie z uwagi na konieczność wyposażenia układu w dodatkowe chłodnice free-cooling'u lub układu instalacji obejściowej systemu chillera. [1] Stosowalność free-cooling'u jest silnie uzależniona od wielkości zysków ciepła w pomieszczeniu oraz od temperatury powietrza zewnętrznego. Ponieważ system działa w okresie, kiedy temperatura powietrza zewnętrznego jest na tyle niska aby możliwe było ochłodzenie wody chłodniczej lub powietrza w pomieszczeniu, stąd w samym pomieszczeniu muszą być generowane odpowiednie zyski ciepła, które są konieczne do usunięcia pomimo stosunkowo niskiej temperatury powietrza zewnętrznego. Jest to sytuacja, która w znacznym stopniu limituje możliwości stosowania tego typu systemu do miesiąca – dwóch maksymalnie, przy założeniu pracy systemu klimatyzacji kilka godzin dziennie.

## 2. Przykładowe systemy z zastosowaniem free-cooling'u

Jednym z najprostszych systemów wykorzystujących zjawisko naturalnego wykorzystania zdolności chłodzących powietrza zewnętrznego jest system free-cooling'u bezpośredniego. System ten polega na wykorzystaniu w sposób bezpośredni powietrza zewnętrznego do chłodzenia pomieszczeń klimatyzowanych. Rozwiązanie to jest wykorzystywane w modułowych centralach klimatyzacyjnych lub monoblokowych centralach klimatyzacyjnych przygotowujących powietrze pierwotne w systemach o dwuetapowym uzdatnianiu powietrza. W centralach składających się z poszczególnych modułów funkcja free-cooling'u jest realizowana za pośrednictwem komory mieszania, w której poprzez odpowiednie sterowanie przepustnicami powietrza świeżego i recyrkulacyjnego zwiększa się udział powietrza zewnętrznego aż do 100 % udziału w powietrzu nawiewanym (w celu maksymalnego wykorzystania chłodu zawartego w powietrzu zewnętrznym). [2] Zwiększona ilość świeżego powietrza zewnętrznego jest utrzymywana na maksymalnym poziomie tylko przez określony czas występowania warunków sprzyjających do realizacji procesu free-cooling'u. W pozostałym czasie przepustnice są ustawiane na minimalny udział powietrza świeżego. Za określone udziały poszczególnych strumieni powietrza w powietrzu nawiewanym odpowiada sterownik mikroprocesorowy, który w oparciu o czujniki temperatury oraz specjalny algorytm sterowania („ekonomizer”) dokonuje optymalnego ustawienia kąta poszczególnych przepustnic. [3] W monoblokowych centralach klimatyzacyjnych przygotowujących powietrze pierwotne, z uwagi na pracę ze 100 % udziałem powietrza świeżego, funkcja

free-cooling'u jest realizowana poprzez dezaktywację sprężarkowego układu chłodniczego przy niskich temperaturach powietrza zewnętrznego, pozwalających na uzyskanie żądanej temperatury nawiewu za centralą bez pracy układu chłodniczego.

Drugi możliwy rodzaj wykorzystania chłodu zawartego w powietrzu zewnętrznym, tzw. „free-cooling pośredni”, umożliwia schłodzenie powietrza wewnętrznego z wykorzystaniem medium pośredniczącego pozwalającego na wymianę ciepła pomiędzy powietrzem ochładzanym, a świeżym powietrzem zewnętrznym. Ciecz pośrednicząca odbiera ciepło od schładzanego powietrza wewnętrznego, a następnie przekazuje je do świeżego powietrza zewnętrznego. Powietrze zewnętrzne dokonuje w sposób pośredni schłodzenia powietrza w pomieszczeniu (rys. 1).



Rys. 1. Schemat układu do produkcji wody lodowej z obiegiem free-cooling'u.

Figure 1. Schema of ice water production unit with free-cooling system.

Systemy klimatyzacyjne wymagające przygotowania wody ziębniczej o określonej temperaturze z reguły wykorzystują sprężarkowe agregaty chłodnicze do jej schłodzenia. Wykorzystanie powietrza zewnętrznego o niskiej temperaturze w celu schłodzenia cieczy pośredniczącej bez ingerencji sprężarkowego układu chłodniczego przynosi wymierne korzyści finansowe związane z niższymi kosztami eksploatacji, a także podnosi wartość obiektu z uwagi na wyższą efektywność systemów w nim działających. Ciecz pośrednicząca może stanowić woda zasilająca odbiorniki chłodu, takie jak klimakonwektory, belki chłodnicze, itp. Inne medium pośredniczące może stanowić czynnik chłodniczy (rozwiązanie firmy Carrier). Z uwagi na fakt, że proces free-cooling'u jest realizowany tylko przy temperaturze powietrza zewnętrznego niższej od temperatury wody na powrocie z instalacji, realizacja free-cooling'u odbywa się często przy współdziałaniu sprężarkowych agregatów chłodniczych. [4] Mechanicznie rozwiązanie free-cooling'u jest w pewnym stopniu powiązane z pracą agregatu; z tego powodu możemy rozróżnić następujące warianty realizacji free-cooling'u pośredniego:

- rozwiązanie w postaci dodatkowego wymiennika free-cooling'u z trójdrogowym zaworem regulacyjnym, jako opcjonalnym wyposażeniem dla mono-



blokowego agregatu chłodniczego,

- rozwiązanie w postaci wymiennika pośredniego, pompy glikolowej oraz dodatkowego wymiennika free-cooling (współpracującego ze sprężarkowym agregatem wody ziemniczej),
- rozwiązanie bez dodatkowego wymiennika free-cooling'u, wykorzystujące typowy układ chłodniczy agregatu chłodniczego oraz pompę czynnika chłodniczego pracującą w okresie postoju sprężarki i w sprzyjających warunkach do realizacji procesu schładzania cieczy za pośrednictwem powietrza o niskiej temperaturze (rozwiązanie stosowane przez firmę Carrier),
- inne rozwiązania, np. wykorzystujące „free-cooler”, czyli dry-cooler, którego zadaniem jest schłodzenie cieczy w instalacji za pośrednictwem powietrza zewnętrznego o niskiej temperaturze.

Dry-cooler realizujący proces free-cooling'u może być wykorzystywany zarówno w rozwiązaniach, w których stosowane są monoblokowe agregaty chłodnicze ze skraplaczem chłodzonym cieczą, jak i monoblokowe agregaty ze skraplaczem chłodzonym powietrzem. W przypadku agregatów ze skraplaczem chłodzonym cieczą w okresach wysokich temperatur powietrza zewnętrznego „dry-cooler” odprowadza ciepło ze skraplaczy podczas „produkcji mocy chłodniczej”, natomiast w okresie niskich temperatur powietrza zewnętrznego „dry-cooler” pełni funkcję „free-coolera”, czyli urządzenia, które kosztem poboru mocy tylko silników wentylatorów pozwala na schłodzenie cieczy do żądanej temperatury.

W przypadku monoblokowych agregatów chłodniczych ze skraplaczem chłodzonym powietrzem dry-cooler może pełnić funkcję urządzenia wstępnie schładzającego wodę do żądanej temperatury, natomiast dalsze schłodzenie w miarę potrzeby może być realizowane na parowniku agregatu chłodniczego. [3]

### **3. Analiza działania systemu z wykorzystaniem free-cooling'u**

Zapotrzebowanie na energię chłodniczą obliczono dla przyjętego obiektu jakim jest budynek centrum handlowego typu „galeria”. Założono parametry powietrza w pomieszczeniach i na zewnątrz zgodnie z polskimi normami w tym zakresie. Temperatura wewnętrzna w okresie letnim ustalona została na poziomie 21°C, natomiast temperatura zewnętrzna jest zmienna w zależności od godziny, niemniej za godzinę obliczeniową przyjęto 14<sup>00</sup> w miesiącu lipcu. Na podstawie zysków ciepła określona została ilość powietrza wentylacyjnego na poziomie 992 000 m<sup>3</sup>/h. W analizowanym przypadku w centralach klimatyzacyjnych znajdują się systemy odzysku ciepła, wykorzystywane w okresie letnim do odzysku chłodu z powietrza wywiewanego o sprawności ok. 55%. Pomimo stosowanego odzysku chłodu pozwalającego na ochłodzenie powietrza od temperatury zewnętrznej wynoszącej 29,5°C do 26,5°C, moc chłodnicza osiągnęła wartość 3 473 kW.

Dla tak przyjętych założeń policzono zapotrzebowanie na chłód dla każdego miesiąca przyjmując dla uproszczenia, że jest ono zależne od różnicy entalpi pomiędzy powietrze w pomieszczeniu  $h_p$ , a powietrzem zewnętrznym  $h_z$ . Dla miesiąca lipca obliczona wartość zapotrzebowania na chłód wynosi:  $Q_{ch}^{lipiec} = 3\,473$  kW. Zatem dla pozostałych miesięcy wartość ta zależy w przybliżeniu od parametrów powietrza, zgodnie z zależnością:

$$Q_{ch}^{miesiqi} = Q_{ch}^{lipiec} \cdot \frac{\Delta h_{miesiqi}}{\Delta h_{lipiec}}, \quad kW \quad (1)$$

gdzie:

$Q_{ch}^{miesiqi}$  – zapotrzebowanie na chłód dla danego miesiąca, kW

$Q_{ch}^{lipiec}$  – zapotrzebowanie na chłód dla lipca, kW

$\Delta h_{lipiec}$  – różnica entalpii dla chłodzenia dla miesiąca lipca odczytana z wykresu i-x, -15 kJ/kg

$\Delta h_{miesiqi}$  – różnica entalpii dla chłodnicy dla danego miesiąca, kJ/kg, liczona jako:

$$\Delta h_{miesiqi} = h_{ch} - h_z^{miesiqi}, \quad [kJ/kg] \quad (2)$$

$h_z$  – średnia wartość entalpii powietrza dla każdego miesiąca wg danych stacji meteorologicznej Rzeszów-Jasionka, kJ/kg

$h_{ch}$  – entalpia powietrza po ochłodzeniu, kJ/kg

Chłodzenie występuje jedynie w sytuacji kiedy wymagana entalpia powietrza w pomieszczeniu jest mniejsza od entalpii powietrza zewnętrznego,  $h_p < h_z$ . Na podstawie wartości średniego zapotrzebowania godzinowego na chłód w poszczególnych miesiącach wyznaczona została wielkość sezonowego miesięcznego zapotrzebowania na energię chłodniczą.

$$Q_{ch}^{sezonowe} = Q_{ch}^{miesiqi} \cdot t, \quad kWh \quad (3)$$

gdzie:

$t$  – czas pracy urządzenia chłodniczego (wentylacji) w ciągu miesiąca, h

Dla statystycznego miesiąca przyjęto średnio, że układ chłodniczy działa dziennie przez czas 12 godzin w dni powszednie oraz po 10 godzin w niedzielę, co łącznie określa ilość godzin w miesiącu na poziomie  $t = 26 \cdot 12 + 4 \cdot 10 = 352$  h/m. Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli nr 1. Zapotrzebowanie na chłód występuje jedynie w miesiącach letnich od maja do września włącznie. W celu określenia ram czasowych, w których możliwe będzie wykorzystanie systemu free-cooling'u należy ustalić najpierw granice stosowania instalacji chłodniczej oraz konieczności chłodzenia w pomieszczeniu.

Tabela 1. Zestawienie mocy chłodniczej w poszczególnych miesiącach

Tabel 1. Cooling power for each month's

Miesiące	$h_z$	$\Delta h^{miesiąc}$	$Q_{ch}^{miesiąc}$	$Q_{ch}^{sezonowe}$	$T_z^{średnia}$
	[kJ/kg]	[kJ/kg]	[kW]	[kWh]	°C
styczeń	1,6	24,1	-	-	-4,6
luty	8,6	17,1	-	-	0,3
marzec	9,1	16,6	-	-	1,0
kwiecień	20,6	5,1	-	-	8,0
maj	29,5	-3,8	876	308394	12,5
czerwiec	40,0	-14,2	3299	1161317	16,8
lipiec	40,7	-15,0	3473	1222496	16,9
sierpień	43,3	-17,5	4062	1429949	17,7
wrzesień	31,9	-6,2	1426	502038	12,3
październik	20,4	5,4	-	-	6,8
listopad	12,5	13,2	-	-	2,0
grudzień	6,7	19,0	-	-	-1,2

Sytuacja taka występuje kiedy temperatura nawiewu zrówna się z temperaturą po odzysku ciepła na wymienniku krzyżowym i występuje do momentu zrównania temperatury nawiewu z temperaturą zewnętrzną. Zmianę omawianych powyżej temperatur przedstawiono na rys. 2.

Założono, że w okresie letnim woda lodowa schładzana będzie od 12 do 7°C, natomiast w okresie przejściowym od 15 do 9°C.

Stąd punkt wyjścia dla systemu free-cooling jest zrównanie się temperatury powietrza zewnętrznego z temperaturą powrotu z instalacji wody chłodniczej w okresie przejściowym  $T_z < 15^\circ\text{C}$ . Ponadto w okresie zimowym założono współpracę systemu klimatyzacji z instalacją centralnego ogrzewania przez przyjęcie różnicy temperatur pomiędzy powietrzem w pomieszczeniu, a powietrzem nawiewanym na poziomie  $\Delta T_{w zimie} = 1 \text{ K}$ .

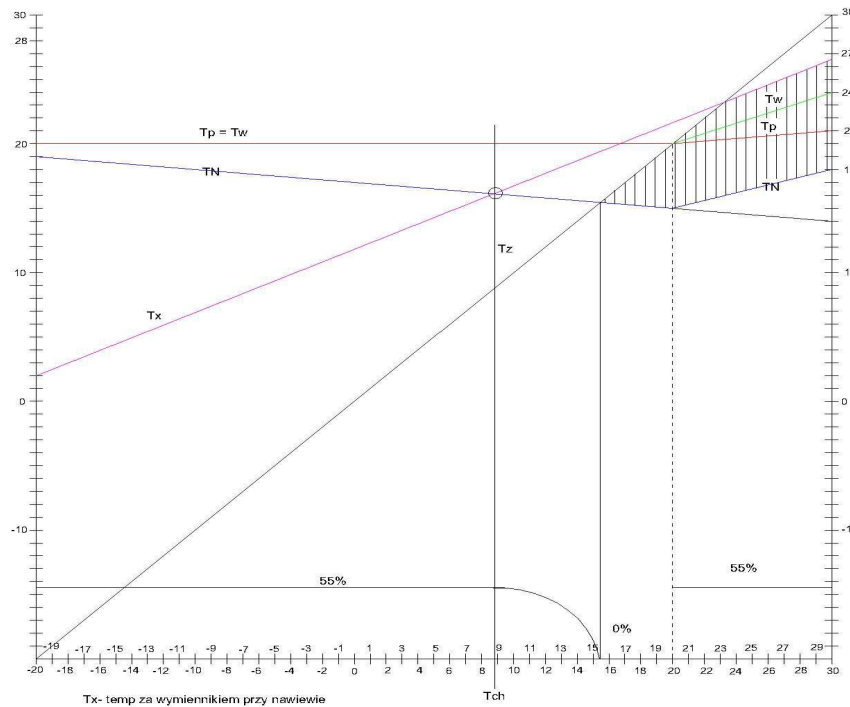
Możliwość pozyskania chłodu od powietrza zewnętrznego do celów przygotowywania wody chłodzącej powietrze w centrali klimatyzacyjnej w okresie przejściowym występuje jedynie w miesiącach kwiecień – maj oraz we wrześniu (rys. 3).

Obliczone wielkości sprawności wykorzystania systemu free-cooling'u zestawiono w tabeli nr 2. Sprawność ta jest stosunkowo mała i osiąga maksimum przy temperaturze zewnętrznej 9°C oraz maksymalnej różnicy temperatur  $\Delta T_{fc}$ . Wielkości sezonowej mocy jaka jest możliwa do pozyskania z systemu free-cooling'u  $Q_{fc}$  określa zależność:

$$Q_{fc} = Q_{ch}^{sezonowe} \cdot \eta_{fc}, \quad kWh \quad (4)$$

gdzie:  $Q_{ch}^{sezonowe}$  – sezonowe zużycie energii chłodniczej dla miesięcy o średniej temp powietrza od 9 – 15 °C, kWh

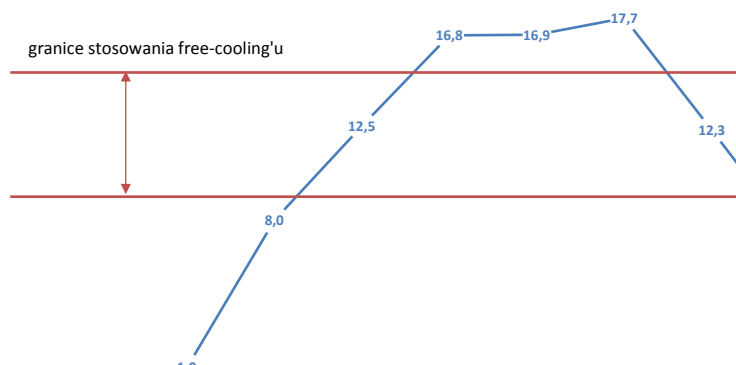
$\eta_{fc}$  – sprawność sytemu free-cooling, %



Rys. 2. Wykres  $T_z$ - $T_p$  dla analizowanego przypadku obciążenia chłodniczego budynku  
 $T_z$  - temperatura zewnętrzna,  $T_p$  - temperatura w pomieszczeniu,  $T_N$  - temperatura nawiewu,  
 $T_W$  - temperatura wywiewu,  $T_{ch}$  - temperatura chłodzenia,  $T_x$  - temperatura po odzysku ciepła

Figure 2. Diagram  $T_z$ - $T_p$  for analysed circumstance of building cooling load  
 $T_z$  - ambient temperature,  $T_p$  - room temperature,  $T_N$  - supply air temperature,  $T_W$  - return air temperature,  $T_{ch}$  - end of cooling period temperature,  $T_x$  - temperature after heat recovery

Na tej podstawie określono orientacyjne wielkości mocy układu chłodniczego pochodzącego z systemu free-cooling'u. Wielkości te zestawiono w tabeli nr 3. Zgodnie z przedstawioną powyżej tabelą można określić skrajne wielkości sprawności systemu działającego free-cooling'u na poziomie pomiędzy 15 a 17% dla 2 miesięcy, w których system ten jest w stanie przy założonych parametrach wody lodowej działać dla potrzeb chłodniczych. W porównaniu z zapotrzebowaniem na energię chłodniczą dla całego sezonu chłodniczego, w którym należy zabezpieczyć moc rzędu 4,6MWh, dzięki działającemu układowi free-coolingu można tę wartość zmniejszyć jedynie w granicach ok 3%.



Rys. 3. Wykres zmienności temperatury powietrza zewnętrznego w zależności od miesiąca

Figure 3. Diagram of temperaturę changing due to month's

Tabela 2. Wydajność systemu free-cooling'u w zależności od temperatury zewnętrznej

Tabele 2. Free-cooling efficiency due to ambient temperature

$T_z$	$\Delta T_{fc}$	Wydajność free-cooling'u, $\eta_{fc}$
$^{\circ}\text{C}$	$^{\circ}\text{C}$	%
15	0	0
14	1	0
13	2	10
12	3	20
11	4	30
10	5	40
9	6	50

Tabela 3. Wielkość mocy chłodniczej pozyskanej z systemu free-cooling'u

Tabele 3. Free-cooling power system

Miesiąc	$T_z$	Sprawność $\eta_{fc}$	$Q_{ch}$ sezonowo	$Q_{fc}$
	$^{\circ}\text{C}$	%	[kWh]	[kWh]
maj	12,5	15	30 8394	46 259
wrzesień	12,3	17	50 2038	85 346
$\Sigma$				131 606

#### 4. Podsumowanie

Systemy free-cooling'u stosowane powinny być przede wszystkim w obiektach z dużymi zyskami ciepła wewnętrznego, szczególnie dotyczy to okresu przejściowego, w którym temperatura powietrza zewnętrznego jest niższa od wymaganej temperatury pomieszczeń wewnętrznych, niemniej zyski ciepła generowane w obiekcie powodują znaczne podniesienie temperatury powietrza wewnętrznego. Jak wynika z przedstawionej uproszczonej analizy możliwości pozyskania chłodu z użyciem systemu wymienników free-cooling'u dla analizowanego obiektu ilość energii chłodniczej w całym sezonie chłodniczym sięga ok. 3%, co nie stanowi wielkości interesującej z punktu widzenia inwestycyjnego. Biorąc pod uwagę jedynie okres miesięcy, w których system ten jest w stanie funkcjonować zapewnia on pokrycie ok. 16% całkowitego zapotrzebowania na chłód w rozpatrywaniu okresie, co może stanowić już pewną alternatywę jeśli chodzi o źródło chłodu, szczególnie ciekawe z uwagi na jego bardzo niski koszt eksploatacji w porównaniu z tradycyjnymi sprężarkowymi układami chłodniczymi. W zależności od współczynnika sezonowej wydajności energetycznej ESEER dla układu chłodniczego oraz wielkości mocy pomp obiegowych w systemie free-cooling'u oszczędności w energii elektrycznej mogą sięgać od 15 do 30%, przy założeniu że zużycie energii w systemie free-cooling'u będzie kształtować się na poziomie ok. 10 razy mniejszym od zużycia energii elektrycznej w systemie ze sprężarką elektryczną o współczynniku ESEER na poziomie pomiędzy 3,0, a 3,5. Jeśli chodzi o takie spojrzenie na wielkości oszczędności energii elektrycznej zaoszczędzonej przez system free-cooling'u to w okresie występowania możliwości zastosowania tego typu systemu w bilansie miesięcznym są to oszczędności jak najbardziej uzasadniające stosowanie tego typu rozwiązania.

#### Literatura

- [1] Adamski B., Free-cooling pośredni czy bezpośredni? Dylemat inwestora i projektanta, „Chłodnictwo i Klimatyzacja” nr 8/2010.
- [2] Kazimierz M., Uzdatnianie powietrza w inżynierii środowiska dla celów wentylacji i klimatyzacji, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków 2004.
- [3] Gaziński B., Krzyżaniak G., Technika klimatyzacyjna dla praktykantów” SYSTHERM SERWIS, Poznań 2005.
- [4] Adamski B., Systemy free coolingu pośredniego. Analiza i symulacja oszczędności pod kątem nakładów eksploatacyjnych cz. 1, „Rynek Instalacyjny” nr 5/2009.

## FREE COOLING SYSTEM APPLICATION IN AIR CONDITIONING

### Summary

Oncreasing electricity prices, often forcing users to seek savings and new, cheap and clean energy. In many industries modern equipment to reduce electricity consumption are introduced. Also in air conditioning systems are increasingly being used all sorts of devices to reduce operating costs. Such solutions is free-cooling system. Free-cooling system operate as cooler of internal air in direct or intermediate way. Directed free-cooling system is on only if ambient temperature is below internal one – winter and transition period when air cooling is nesesity couse of large heat gain in cooled obiect. Intermediate free-cooling system work due to additional cool exchanger mounted in compressor unit with 3-way valve. The possible, obtained from analitical model the power of free-cooling system has been presented in the article. The boundaries of free-cooling system in all year period has presented using a  $T_z-T_p$  figure. Free-cooling effect, is usually carried out by adding a second free-cooling radiator and three-way valve in the compressor chiller. When the outdoor temperature drops below the temperature of the medium return intermediary, free cooling starts partial or at lower temperatures, the total cooling medium. The article presents an analysis of the demand in the cold for the selected object and to cover part of the system using free-cooling system.

**Keywords:** free-cooling, cooling, chiller, cooling power

DOI:10.7862/rb.2014.109

*Przesłano do redakcji: 26.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 04.09.2014 r.*

Sławomir RABCZAK<sup>1</sup>  
Danuta PROSZAK-MIĄSIK<sup>2</sup>  
Krzysztof NOWAK<sup>3</sup>

## KONCEPCJA POMPY CIEPŁA ZE SKRAPLACZEM DWUCZŁONOWYM

Kwestie optymalnego wykorzystania energii stanowią obecnie obszar, wokół których skupia się większość prac badawczych i ich technicznych aplikacji. Typowe układy pomp ciepła oddają do otoczenia ciepło w górnym wymienniku ciepła w procesie początkowo ochładzania przegrzanej pary czynnika chłodniczego, a następnie w wyniku samego skraplania. Te dwa procesy odbywają się w jednym wymienniku ciepła. W pracy przedstawiono możliwości odrębnego pozyskania ciepła przegrzania i ciepła samego skraplania z górnego wymiennika pompy ciepła. Rozwiązanie takie pozwala na wykorzystanie pompy ciepła jako urządzenia do produkcji ciepła o dwóch różniących się od siebie poziomach temperatur, co pozwala na bardziej wszechstronne wykorzystanie urządzenia, np. do przygotowywania ciepłej wody użytkowej oraz jednocześnie do celów centralnego ogrzewania niskotemperaturowego. Przedstawiono ideę działania tego typu układu pompy ciepła oraz schematy obrazujące możliwości jej aplikacji w budownictwie. Dokonano analizy wynikającej z transformacji odebranego ciepła na potrzeby przygotowania ciepłej wody o umownie wysokiej temperaturze oraz dla potrzeby wentylacji lub ogrzewania, gdzie wystarczające są niższe temperatury medium grzewczego. Wykonano obliczenia mocy skraplaczy dwuczłonowych dla wybranych czynników chłodniczych oraz przedstawiono koncepcję pompy ciepła pozwalającą na produkcję ciepła o dwóch różnych poziomach temperatur. Przedstawiono wstępnie stanowisko badawcze do określania rzeczywistych wielkości ciepła pozyskiwanych z poszczególnych wymienników ciepła górnego dla wybranego czynnika chłodniczego. Omówione zostały podstawowe założenia konieczne do przeprowadzenia pomiarów.

**Słowa kluczowe:** pompa ciepła, skraplacz, wymiana ciepła, ciepło przegrzania

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Sławomir Rabczak, Politechnika Rzeszowska, Powstańców Warszawy 12, 17-865 1699, rabczak@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Danuta Proszak-Miąsik, Politechnika Rzeszowska, Powstańców Warszawy 12, 17-865 1699, dproda@prz.edu.pl

<sup>3</sup> Krzysztof Nowak, Politechnika Rzeszowska, Powstańców Warszawy 12, 17-865 1699, krzynow@prz.edu.pl



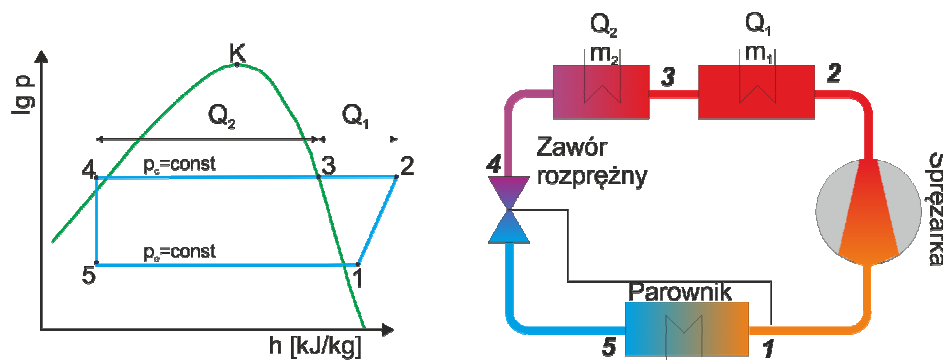
## 1. Wstęp

Głównym celem pompy ciepła jest produkcja energii do ogrzewania o możliwie wysokich parametrach. Niemniej z uwagi na realizację najczęściej lewo bieżnego obiegu Lindego w typowym skraplaczu przed właściwym procesem skraplania czynnika chłodniczego następuje ochładzanie gorących par czynnika chłodniczego powstałych podczas sprężania gazu chłodniczego w sprężarce. W wyniku tego efektu górny wymiennik ciepła większość swojej powierzchni wymiany ciepła wykorzystuje do ochłodzenia czynnika, natomiast pozostała część realizuje proces kondensacji gazu ochłodzonego do stanu nasycenia. Procesu ochładzania gorącego gazu w wymienniku charakteryzuje się dużo mniejszymi współczynnikami przejmowania ciepła w porównaniu z procesem kondensacji, stąd też proces ten wymaga znacznej powierzchni wymiany ciepła, która jest również konieczna dla samego procesu kondensacji. W wyniku takiego przebiegu procesu w jednym urządzeniu określanym jako skraplacz realizowane są w istocie dwie przemiany, przy czym przemiana skraplania jako bardziej efektywna zajmują mniej powierzchni wymiennika. Ponadto trudno jest wykorzystać ciepło przegrzanego gazu po sprężarce do celów wymagających wyższych temperatur, natomiast ciepło skraplania do pozostałych celów gdzie wymagania odnośnie poziomu temperatury nie są tak rygorystyczne, szczególnie obydwa procesy zachodzą w jednym urządzeniu i nie można z całą pewnością stwierdzić jaka część wymiennika realizuje jedną z wymienionych przemian. Dlatego powstała idea rozdzielenia tych dwóch procesów i umieszczenia ich w osobnych urządzeniach.

## 2. Wymiennik ciepła przegrzania oraz skraplania

Zaletą rozdzielenia procesu skraplania od procesu ochładzania gazu chłodniczego jest możliwość odzysku ciepła o stosunkowo wysokiej temperaturze od gazu po sprężarce i doprowadzenie jego parametrów w pobliże lub na krzywą nasycenia. Pozwala to na zmniejszenie wymiarów skraplacza, przy jednoczesnym optymalnym wykorzystaniu źródła ciepła przegrzania, a później ciepła skraplania dla procesów nie wymagających zbyt wysokich temperatur, np. do ogrzewania lub wentylacji. Na rysunku 1 przedstawiono obieg Lindego realizowany przez pompę ciepła z odrębnymi wymiennikami dla przegrzania i skraplania.

Główna różnica w porównaniu z tradycyjnym obiegiem pompy ciepła polega na wyposażeniu układu w dodatkowy wymiennik ciepła, który ochładza czynnik od wysokiej temperatury po sprężaniu do temperatury równej lub bliskiej temperaturze skraplania (przemiana 2-3 na rys. 1). Przemiana 3-4 odbywa się przy stałej temperaturze czynnika chłodniczego, doprowadzając go do stanu cieczy lekko przechłodzonej [5].



Rys. 1. Obieg Lindego pompy ciepła z dwuczłonowym wymiennikiem ciepła górnego  
 Figure 1. Linde circuit of heat pump with two parts condenser

Każdy z czynników chłodniczych wykazuje inne zachowanie jeśli chodzi o wielkość ciepła oddawanego na drodze ochładzania i skraplania. Dla porównania wykonano przykładowe obliczenia wielkości ciepła przegrzania  $Q_1$  i ciepła skraplania  $Q_2$  dla wybranych czynników chłodniczych: R-134a, R-410A, R-422D, R-717. Dla potrzeb analizy przyjęto jednakowe warunki początkowe dla wszystkich czynników chłodniczych zakładając temperaturę parowania  $T_o = 1^\circ\text{C}$  oraz temperaturę skraplania  $T_{skr} = 45^\circ\text{C}$ . Wyniki obliczeń zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie mocy wymienników ciepła skraplania  $Q_2$  i przegrzania  $Q_1$   
 Tabel 1. Power of condensing heat exchanger  $Q_2$  and superheating heat exchanger  $Q_1$

Czynnik	$m$ , kg/s	$Q_1$ , kW	$Q_2$ , kW	$Q_{skr}$ , kW	$Q_1/Q_2$ , %	$T_2$ , °C	COP
R-134a	0,046	1,66	7,63	9,29	21,7	61,9	5,6
R-410A	0,047	2,25	7,63	9,88	29,5	76,4	4,9
R-422D	0,096	1,60	11,55	13,15	13,9	58,4	4,7
R-717	0,007	1,74	7,63	9,37	22,8	130,8	4,2

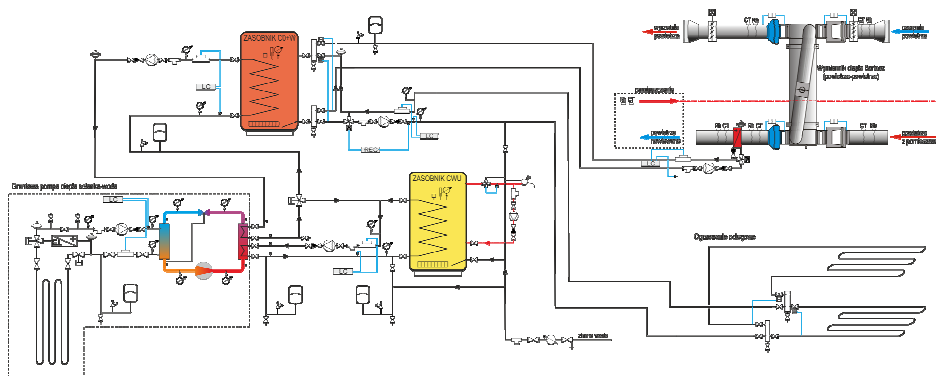
Podano również wymagany strumień czynnika chłodniczego  $m$ . Ponieważ wymienniki połączone są szeregowo oznacza to, że ten sam strumień popłynie przez dwa wymienniki, co rzutuje bezpośrednio na wydajność obu wymienników. Inaczej, moc jednego wymiennika określa moc drugiego wymiennika i zależy ona jedynie od rodzaju czynnika chłodniczego i parametrów pracy dolnego i górnego źródła ciepła. Zakładając początkowo indywidualne wydajności cieplne wymienników, należy je w dalszej kolejności skorygować o rzeczywiste zachowanie się układu, co pociąga za sobą sytuację kiedy należy przyjmować przepływ czynnika chłodzącego skraplacz, dla którego wartość ta wychodzi największa a następnie przeliczyć drugi wymiennik. W sytuacji takiej jeden z wymienników będzie przewymiarowany w stosunku do rzeczywistych wyma-

gań wymagających z zapotrzebowania na energię o różnym poziomie temperatury (dla c.w.u. o wysokiej temperaturze oraz c.o. o temperaturze niższej). Jest to sytuacja wymagająca od użytkownika zapewnienia odbioru ciepła dodatkowego wynikającego z różnicy pomiędzy wartością uzyskaną na przewymiarowanym wymienniku ciepła, a projektowym zapotrzebowaniem na ciepło. Można zauważyć, że iloraz ciepła przegrzania i ciepła skraplania przyjmuje różne wartości dla każdego czynnika chłodniczego, stąd też każdy przypadek należy rozpatrywać indywidualnie, ponieważ brak jest widocznych prostych zależności pomiędzy tymi wielkościami. Temperatura po sprężaniu  $T_2$  stanowi indikator czynnika chłodniczego pozwalający ustalić przyszłe jego zastosowanie. Ponieważ dla jednego z analizowanych czynników temperatura jest zbyt niska aby można było produkować ciepłą wodę użytkową o temperaturze np. 55 °C, stąd też czynnik taki nie nadaje się do zastosowania w pompach ciepła produkujących ciepło dla zapewnienia przygotowania c.w.u. Biorąc pod uwagę możliwość okresowej dezynfekcji wody w zasadzie tylko amoniak  $NH_3$  (R-717) nadaje się do tego celu, natomiast w pozostałych przypadkach należałoby zastosować grzałki elektryczne lub podnieść temperaturę skraplania, co wiąże się z obniżeniem efektywności działania układu poprzez obniżenie współczynnika wydajności grzewczej COP (tab. 1). Ze względów ekonomicznych najlepiej nie dopuszczać do konieczności obniżania COP, niemniej wartości w granicach 3,5 do 4,0 są jeszcze do zaakceptowania [3].

### **3. Możliwe aplikacje pompy ciepła z dwoma wymiennikami ciepła górnego**

Pompy ciepła mogą działać w zasadzie we wszystkich możliwych z technicznego punktu widzenia gałęziach gospodarki. Na szeroką skalę pompy ciepła znajdują zastosowanie w budownictwie przemysłowym szczególnie do systemów odzysku ciepła technologicznego, ale również do ogrzewania. W budownictwie mieszkalnym szczególne zastosowanie znajdują jako układu do ogrzewania mieszkań oraz przygotowywania c.w.u. W budownictwie energooszczędnym oraz w budynkach pasywnych z wentylacją mechaniczną lub klimatyzacją, gdzie istnieje znaczące zapotrzebowanie na energię do ogrzewania dla wentylacji, pompa ciepła jest rozwiązaniem bardzo wszechstronnym – pozwala na produkcję ciepła dla pokrycia wszystkich potrzeb cieplnych budynku oraz umożliwia jednoczesną lub naprzemienną produkcję chłodu dla klimatyzacji. W nowoczesnym budownictwie bardzo często znajdują się instalacje zasilane czynnikiem grzewczym o stosunkowo niskiej temperaturze, jak np. ogrzewanie podłogowe, ściennie, klimatyzacja, a jednocześnie jest konieczność produkcji c.w.u. gdzie temperatury powinny być na poziomie znacznie wyższym. Stąd konieczność poszukiwania rozwiązań mających na celu scentralizowanie układu do produkcji ciepła i chłodu, najlepiej w gabarytach jednego kompaktowego urządzenia. Najczęściej stosowane są tzw. gruntowe pompy ciepła, pobierające

ciepło z gruntu za pomocą instalacji dolnego źródła ciepła wykorzystującej niezamarzający czynnik pośredni. Rzadziej, lecz zyskujące coraz większą popularność znajdują pompy ciepła powietrzne, o mniejszej wydajności energetycznej w porównaniu z pompami gruntowymi, niemniej eliminujące konieczność wykonania drogiej inwestycyjnie instalacji dolnego źródła ciepła [1,2]. Przykład tego typu instalacji bazującej na pompie ciepła z wymiennikiem ciepła przegrzania oraz skraplania przedstawiono na rysunku 2. Pompa ciepła pobiera ciepło z gruntu, następnie dostarcza je do dwóch zasobników ciepła, odpowiednio zasobnika o wysokiej temperaturze (z wymiennika ciepła przegrzania) dla przygotowania c.w.u. oraz do zasobnika obsługującego system ogrzewania podłogowego oraz wentylacji (z wymiennika ciepła skraplania). Układ zaprojektowano tak, aby pracował z priorytetem c.w.u. W czasie kiedy produkowana jest ciepła woda zasilana może być początkowo z wymiennika ciepła skraplania i jednocześnie z wymiennika ciepła przegrzania, tj. zasobnik c.w.u. zasilany jest początkowo „niższą temperaturą”.

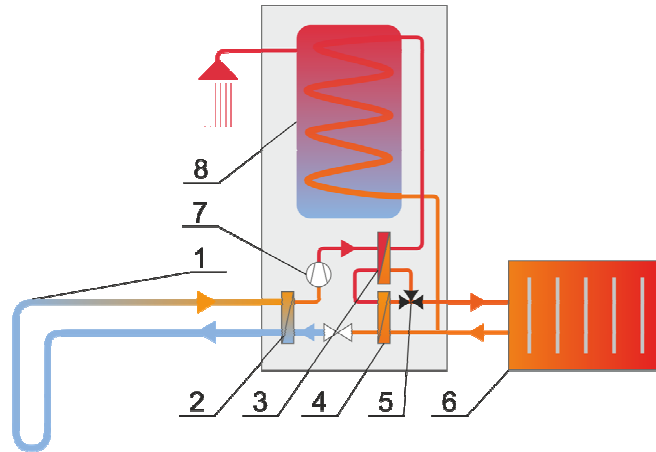


Rys. 2. Przykład pompy ciepła z wymiennikiem ciepła przegrzania i skraplania w instalacji ogrzewania podłogowego, wentylacji i c.w.u.

Figure 2. Example of heat pump heat exchanger for condensing and superheating proces in floor heating instalation, ventilation and hot water.

Po dogrzaniu wody do niższej temperatury obieg przełącza się za pomocą zaworu trójdrogowego w swoje pierwotne położenie realizując swoją podstawową funkcję – ładując zasobnik dla potrzeb ogrzewania i wentylacji. Dzięki temu możliwy jest stosunkowo krótki okres przygotowywania c.w.u. Podobne rozwiązania stosowane są przez producentów nowoczesnych pomp ciepła szczególnie dla potrzeb przygotowania ciepłej wody oraz konieczności okresowej dezynfekcji układu za pomocą wysokiej temperatury. Zastosowanie tego typu rozwiązania w pompie ciepła przedstawiono na rys. 3.

Tak jak poprzednio, w układzie tym ciepła woda przygotowywana jest najpierw na wymienniku niskotemperaturowym (wymennik ciepła skraplania 4), następnie dzięki odpowiedniemu położeniu zaworu 5 wstępnie podgrzany czyn-



Rys. 3 Przykład pompy ciepła z wymiennikiem ciepła przegrzania i skraplania do przygotowywania c.w.u. i ogrzewania

1-kolektor gruntowy, 2-parownik, 3-wymiennik ciepła przegrzania, 4-wymiennik ciepła skraplania, 5-zawór przełączający, 6-odbiornik ciepła, 7-sprężarka, 8-zasobnik c.w.u.

Figure 3 Industrial example of heat pump with two heat exchangers: condensing and superheating for hot water and heating

1-ground collector, 2-evaporator, 3-superheating heat exchanger, 4-condensing heat exchanger, 5-switching valve, 6-heat receiver, 7-compressor, 8-hot water tank.

nik grzewczy przepływa na wymiennik wysokotemperaturowy 3, gdzie osiąga wymaganą temperaturę do podgrzania wody w zasobniku c.w.u. 8.

W czasie przygotowywania c.w.u. system odbioru ciepła 6 dla celów ogrzewania działa z osłabieniem lub jest chwilowo wyłączony w zależności od temperatury powietrza na zewnątrz. W momencie kiedy ciepła woda w zasobniku c.w.u. osiągnie wymaganą temperaturę zawór 5 przełącza się w położenie umożliwiające cyrkulację czynnika grzewczego pomiędzy systemem ogrzewania 6 a wymiennikiem ciepła skraplania 4. Należy zaznaczyć, że jest to system bardzo efektywny jeśli chodzi o przygotowywanie ciepłej wody użytkowej w pierwszej kolejności przed przygotowaniem czynnika grzewczego dla systemu ogrzewania stosowany np. przez firmę Danfoss. [6]

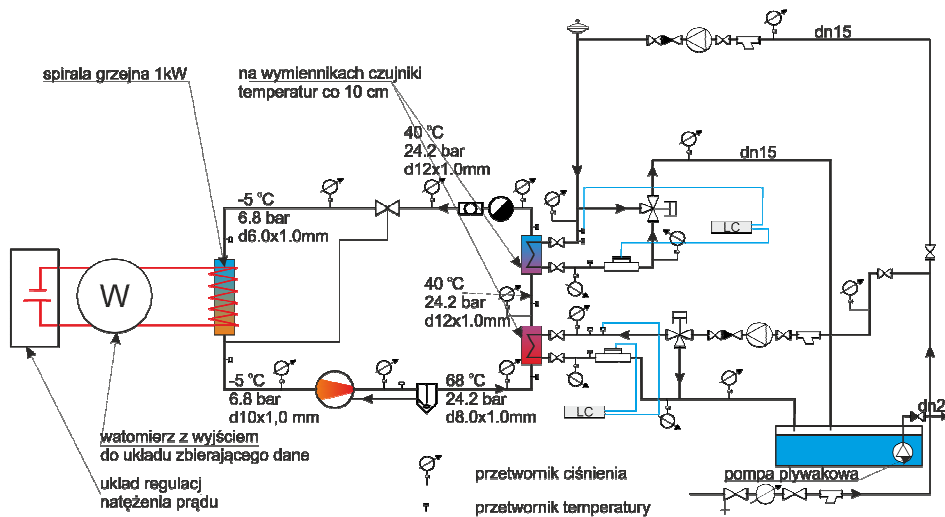
#### 4. Wstępna ocena dotycząca efektywności działania skraplacza dwuczłonowego na przykładzie stanowiska badawczego

Głównym celem badania jest ustalenie zależności pomiędzy teoretycznym, a rzeczywistym procesem przekazywania ciepła w wymienniku ciepła przegrzania oraz wymienniku ciepła skraplania dla wybranych czynników chłodniczych. Proces wymiany ciepła w wymienniku ciepła przegrzania zachodzi na skutek odbierania ciepła od wymiennika przez przepływającą wodę lub powietrze, które jest chłodzone na wymienniku. O ile możliwe jest ustalenie teore-

tyczne wymiarów samego wymiennika, o tyle istnieje uzasadnione pytanie o zachowanie się układu w warunkach rzeczywistych z uwagi na mnogość procesów nieodwracalnych, których trudno uniknąć, a które są trudne do uwzględnienia w obliczeniach samego wymiennika. Wyjściem z tej sytuacji jest przewymiarowywanie wymienników, na ogół sięgające wartości 20-30% w stosunku do wielkości wynikających z teoretycznych zależności [4]. Stanowisko badawcze ma za zadanie ustalić rzeczywistą długość wymienników w procesie chłodzenia pary przegrzanej i skraplania oraz ustalenie możliwości predykcji ich przyszłych gabarytów na bazie opracowanego modelu teoretycznego i weryfikacji eksperymentalnej.

Schemat stanowiska przedstawiono na rys. 4. Głównymi elementami stanowiska są dwa wymienniki ciepła górnego pompy ciepła chłodzone wodą, umieszczone w przezroczystej rurze. Wymienniki wykonane są z rur miedzianych jako pionowe 3 przewody, w których w odstępach ok. 10 cm umieszczone są na całej wysokości czujniki temperatury.

Wydajność grzewcza stanowiska wnosi ok. 1300 W. Ciepła dla parownika produkowane jest przez grzałkę elektryczną nawiniętą na parownik wykonany w kształcie walca. Na każdym z obiegów wymiennika ciepła skraplania i przegrzania zainstalowano liczniki ciepła umożliwiające określenie rzeczywistych wielkości ciepła jakie są oddawane do czynnika chłodzącego jakim jest woda wodociągowa. Szczytowanie danych pomiarowych odbywa się poprzez aplikację producenta mierników, do których podpięte są czujniki temperatury znajdujące się zarówno na układzie pompy ciepła jaki i instalacji wodnej chł-



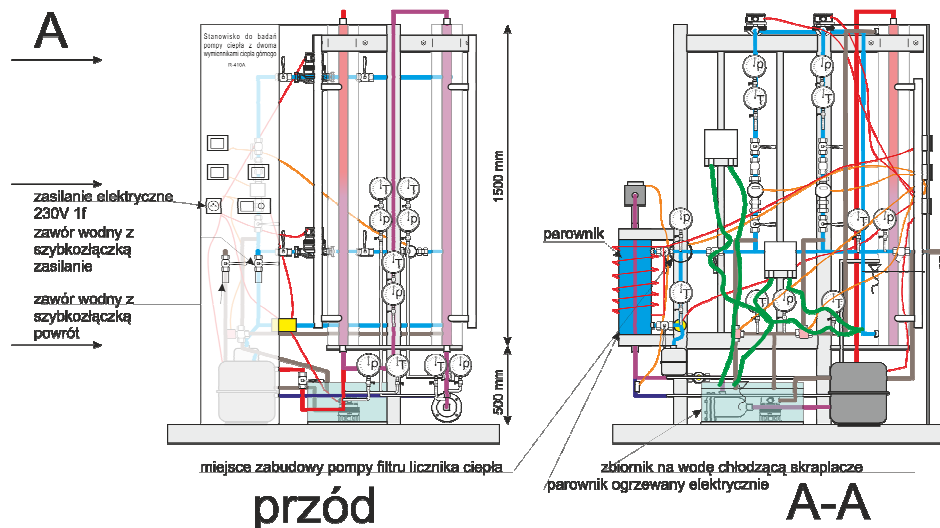
Rys. 4. Schemat stanowiska badawczego do pomiaru wielkości ciepła przegrzania i skraplania dla czynnika R-410A

Figure 4. Schema of test stage for amount of heat received from condensing and superheating proces of R-410A

dzącej oraz z czujników ciśnienia zbierających odczyty z charakterystycznych punktów układu chłodniczego. Układ zaprojektowany został dla czynnika chłodniczego R-410A dla przyjętych temperatur dolnego i górnego źródła ciepła na poziomie odpowiednio: temperatura odparowania 5 °C i temperatura skraplania 40 °C. Całkowita powierzchnia wymiany ciepła dla przegrzania przy założeniu, że będzie on chłodzony wodą wyznaczona została na poziomie 0,34 m<sup>2</sup>. Wykonano wymiennik składający się z 3 rur miedzianych o średnicy 35 mm i długości każdej z rur 1,5 m. Całość umieszczono w przezroczystym płaszczu wodnym z rury PVC o średnicy 100 mm. Identyczny wymiennik wykonano dla ciepła skraplania. Całość stanowiska umieszczono na stelażu aluminiowym o wymiarach 0,8 x 0,8 m. Po sprężarce gorący czynnik chłodniczy przepływa do wymiennika ciepła przegrzania, gdzie przepływ wody chłodzącej ustalany jest na takim poziomie aby uzyskać na najniższą temperaturę równą temperaturze skraplania. Następnie czynnik chłodniczy ochłodzony do stanu nasycenia przepływa do kolejnego wymiennika ciepła skraplania, gdzie proces oddawania ciepła do wody chłodzącej odbywa się przy stałej temperaturze. Wielkość stałej temperatury w wymienniku ciepła skraplania oznacza wartość temperatury skraplania procesu rzeczywistej wymiany ciepła i ta wartość stanowi o końcowej temperaturze poprzedniego procesu zachodzącego w wymienniku ciepła przegrzania. Jest to pomiar wymagający ciągłej korekcji zarówno momentu końca procesu na wymienniku ciepła przegrzania na podstawie temperatury skraplania zmierzonej na wymienniku ciepła skraplania. Poziom odpowiedniej temperatury uzyskuje się poprzez regulację strumienia wody przepływającej przez wymienniki. Widok poglądowy stanowiska przedstawiono na rysunku 5. Największym elementem stanowiska jest konstrukcja 2 wymienników ciepła górnego chłodzonych wodą. Obok sprężarki znajduje się zbiornik na wodę z odpływu z wymienników ciepła przegrzania oraz skraplania, skąd jest ona wypompowywana przez pompę pławkową do systemu kanalizacji budynku. Stanowisko znajduje się w fazie testowania poprawności jego działania i regulacji oraz opracowywania szczegółowego harmonogramu, programu pomiarowego. Problemem może być utrzymanie stabilnych warunków pomiarowych w trakcie badań z uwagi na zmienne parametry powietrza w pomieszczeniu, zmienne napięcie zasilania, które wpływa na moc spirali grzejnej nawiniętej na parownik i konieczności ciągłej regulacji tego elementu pompy ciepła. Ponadto układ dochodzi do stabilizacji po czasie ok 3-4 godzin i dopiero po tym okresie możliwy jest odczyt wielkości pomiarowych. Dane z układu odczytywano dzięki zainstalowanym czujnikom temperatury i ciśnienia poprzez układy firmy Aparator wraz z dostarczonym oprogramowaniem do układów RS. Na podstawie zebranych wyników przeprowadzono obliczenia niezbędnych wielkości fizycznych bazując na równaniu gazów Martina-Hou – wykorzystując w tym celu oprogramowanie firmy Solvay pod nazwą Solkane, tj. entalpia, entropia, a następnie na ich podstawie określono wielkości energetyczne obiegu, jak współczynnik wydajności grzewczej COP.

## 5. Podsumowanie

Pompy ciepła, w których stosowane są systemy pozwalające odzyskiwać w sposób zorganizowany ciepło przegrzania po sprężaniu gazu stosowane są stosunkowo często szczególnie przy większych instalacjach i pompach dwustopniowych z 2 lub większą liczbą sprężarek. Pełnią wówczas funkcję chłodnicy międzystopniowej czynnika chłodniczego, stanowiąc nie tylko źródło ciepła o względnie wysokiej temperaturze, ale przede wszystkim pozwalają na obniżenie wielkości energii niezbędnej do sprężania. W zaproponowanym rozwiązaniu pompy ciepła jednostopniowej wymiennik w postaci skraplacza jest rozdzielony z uwagi na specyfikę procesu zachodzącego podczas oddawania ciepła. Rozdzielenie procesu przegrzania pary czynnika chłodniczego od procesu skraplania umożliwi efektywne wykorzystanie pompy ciepła do produkcji ciepła o różnych poziomach temperatur, co może przyczynić się do popytu tego typu rozwiązań w budownictwie energooszczędnym.



Rys. 5. Widok poglądowy stanowiska pomiarowego pompy ciepła z dwuczłonowym wymiennikiem ciepła górnego

Figure 5. Designed view of measurement test stage of heat pump with two-parts condenser

Szczególne miejsce zajmują rozwiązania pomp ciepła w budownictwie mieszkaniowym, które są w stanie produkować ciepłą wodę użytkową o wymaganej przepisami temperaturze bez konieczności dogrzewania grzałkami elektrycznymi, a często umożliwiają krótkotrwałe podwyższenie temperatury czynnika grzewczego do poziomu wymaganego podczas dezynfekcji układu c.w.u. Dokładne poznanie zachowania w warunkach rzeczywistych czynnika chłodniczego realizującego przemiany w wymiennikach ciepła przegrzania i skraplania



stanowi istotny obszar badań, szczególnie w aspekcie wielkości samych wymienników, a szczególnie z uwagi na wielość nowych czynników chłodniczych wprowadzanych na rynek z uwagi na konieczność dostosowania się do wymagań UE odnośnie ochrony środowiska.

## Literatura

- [1] Marian Rubik, Pompy ciepła. Poradnik, Technika ciepła w budownictwie, Warszawa 2006.
- [2] Wojciech Zalewski, Pompy ciepła sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne, IPPU MASTA Gdańsk, 2001.
- [3] Dominik Staniszewski, Waldemar Targański, Odzysk ciepła w instalacjach chłodniczych i klimatyzacyjnych, IPPU MASTA Gdańsk, 2007.
- [4] Marian Rosiński, Odzyskiwanie ciepła w wybranych technologiach inżynierii środowiska, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, 2012.
- [5] Sławomir Rabczak, Termiczne równania stanu w analizie nowych czynników chłodniczych, Rozprawa doktorska, Wydział Inżynierii Środowiska, Oficyna Wyd. Politechniki Warszawskiej, 2007.
- [6] [www.danfoss.com](http://www.danfoss.com).

## CONCEPT OF HEAT PUMPS WITH TWO PARTS CONDENSER

### Summary

Issues of optimal energy use is currently the area around most of research and technical applications are focused. The paper presents the possibility of obtaining superheat and the condensing heat exchanger from the top of heat pump exchanger. The analysis of received heat for domestic hot water preparation with conventionally high temperature and for ventilation or heating systems, where lower temperatures are sufficient have been obtain. Calculations are performed under the two parts condenser for selected refrigerants, and presents the concept of heat pumps allows to produce of heat at two different temperature levels, eg. for preparation of hot water, and at the same time for low-temperature space heating system. The principle of operation of this type of heat pump system and diagrams have been presented to pay attention for possibility of its application in the industry. The analysis of transformation of the received heat for domestic hot water needs conventionally high temperature to ventilation and heating systems, where lower temperatures are not always a sufficient heating medium. The paper presents a pre-test to determine the actual size of the heat ratio extracted from each of heat exchangers for the selected refrigerant. Further discusses are necessary to obtain the basic principles to improve the results by measurements.

**Keywords:** heat pump, condenser, heat transfer, superheating.

DOI:10.7862/rb.2014.110

*Przesłano do redakcji: 20.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 04.09.2014 r.*

Henryk RÓŻAŃSKI<sup>1</sup>  
Krzysztof JABŁOŃSKI<sup>2</sup>

## TECHNOLOGIE POZYSKIWANIA BIOMASY LEŚNEJ NA CELE ENERGETYCZNE

Streszczenie. Wzrastające zapotrzebowanie na energię pochodzącą ze źródeł odnawialnych zmusza do poszukiwania jej na terenach leśnych. Wyróżnia się trzy podstawowe źródła drewna energetycznego pochodzącego z lasu, są to: pozostałości zrębowe z cięć rębnych, drewno pozyskiwane z drzew o niewielkich wymiarach, np. w trakcie prowadzenia trzebieży wczesnych oraz drewno pniakowe. Najważniejsze znaczenie mają pozostałości zrębowe pochodzące z cięć rębnych drzewostanów sosnowych. Obecnie stosuje się trzy podstawowe technologie pozyskiwania drewna energetycznego z pozostałości zrębowych. Są to: pozyskiwanie zrębków na powierzchni leśnej lub przy drodze wywozowej oraz pakietowanie gałęzi i wierzchołków drzew. Zastosowana technologia warunkuje postać, w jakiej surowiec energetyczny dociera do odbiorcy. Najbardziej powszechną jest technologia pozyskiwania drewna sypkiego. Zasadnicza operacja rozdrabniania surowca (zrębkowanie) odbywa się przy użyciu agregatu zrębkującego na podwoziu forwardera. Typowy agregat zrębkujący składa się z nośnika i rębarki bębnowej lub tarczowej oraz pojemnika na zrębki. Podawanie surowca gardzieli rębarki odbywa się przy pomocy chwytaka zamontowanego na żurawiu. Transport zrębków odbywa się niezależnie od operacji zrębkowania, w systemie kontenerowym. Maszynowe technologie pozyskiwania zrębków są bardzo wydajne (około 50-400 mp/h) i z tego powodu wymagana jest duża koncentracja surowca w miejscu pracy rębarki. Przedstawiona technologia pozyskiwania drewna energetycznego z biomasy leśnej wymaga stworzenia dobrych systemów organizacyjnych zarówno w odniesieniu do jej produkcji jak i do procesów wytwarzania energii.

**Słowa kluczowe:** pozostałości zrębowe, zrębki, baloty, drewno energetyczne

---

<sup>1</sup> Prof. dr hab. Henryk Różański, afiliacja: Katedra Techniki Leśnej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, 60-637 Poznań, ul. Wojska Polskiego 28, tel. 061 8487638, e-mail: henrykro@up.poznan.pl

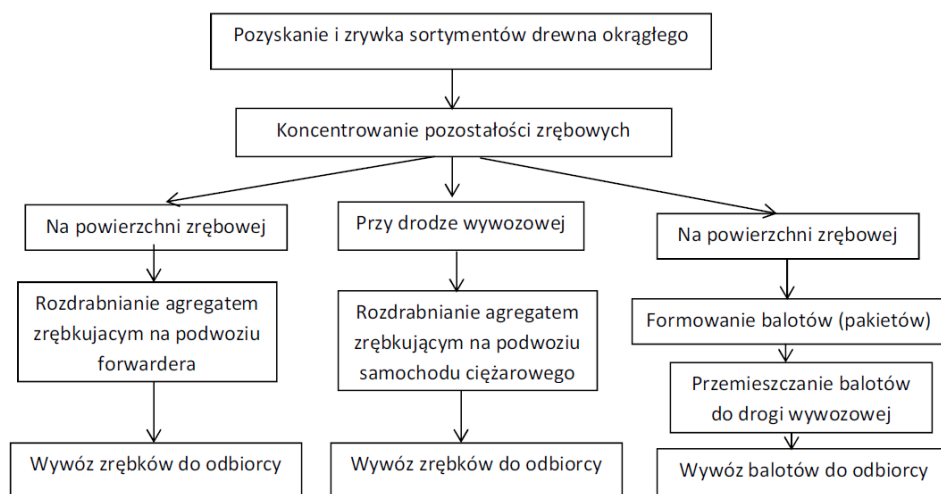
<sup>2</sup> Autor do korespondencji: dr hab. Krzysztof Jabłoński, afiliacja: Katedra Techniki Leśnej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, 60-637 Poznań, ul. Wojska Polskiego 28, tel. 061 8487640, e-mail: jabkrys@up.poznan.pl

## 1. Wstęp

Wzrastające zapotrzebowanie na energię pochodzącą ze źródeł odnawialnych zmusza do poszukiwania jej na terenach leśnych. Samo istnienie bogatych zasobów biomasy leśnej nie rozwiązuje problemu uzyskiwania z niej energii. Do tego, aby biomasę leśną pozyskać, przewieźć i dostarczyć odbiorcy konieczna jest właściwa technologia.

Mówiąc o technologiach pozyskiwania drewna energetycznego należy zacząć od źródeł tego typu surowca. W zasadzie wyróżnia się trzy podstawowe źródła i są to: pozostałości zrębowe z cięć rębnych, drewno pozyskiwane z drzew o niewielkich wymiarach, np. w trakcie prowadzenia trzebieży wczesnych oraz drewno pniakowe. Drewno z trzebieży wczesnych jest pozyskiwane przy zastosowaniu technologii ręczno-maszynowych i maszynowych. Ze względów przyrodniczych, gałęzie i wierzchołki często pozostawia się na powierzchni w formie rozdrobnionej, ponieważ surowiec ten zawiera znaczne ilości pierwiastków biogenych, ważnych dla rozwoju następnego pokolenia lasu [1, 3]. Spośród wymienionych źródeł surowca energetycznego zasadnicze znaczenie mają pozostałości zrębowe i rozwój technologiczny procesów jego pozyskiwania koncentruje się głównie wokół tego rodzaju surowca. Drewno pniakowe jest pozyskiwane tylko przy okazji wylesiania powierzchni pod np. budowę autostrad, dróg, itp.

W Polsce z roku na rok wzrasta stopień umaszynowania procesów pozyskiwania sortymentów drzewnych w postaci drewna okrągłego. Dynamicznie wzrasta liczba harvesterów i forwardeków stosowanych do pozyskiwania drewna w postaci kłód i krótszych odcinków zwanych wyrzynkami (np. drewno opałowe okrągłe). Pozyskiwanie surowca energetycznego na skalę przemysłową również wymaga zastosowania maszynowych procesów pozyskiwania i zrywki tego surowca. Zasadniczo wyróżnia się trzy podstawowe maszynowe technologie pozyskiwania surowca energetycznego pochodzenia leśnego z pozostałości zrębowych: produkcja zrębków energetycznych na powierzchni leśnej, produkcja zrębków z materiału zgromadzonego przy drodze wywozowej oraz pakietowanie pozostałości zrębowych (Rys. 1). Zastosowana technologia warunkuje postać w jakiej surowiec energetyczny dociera do odbiorcy.



Rys. 1. Technologie pozyskiwania surowca energetycznego z pozostałości zrębowych

Fig. 1. Energy wood harvesting technologies from logging residues

## 2. Technologie produkcji zrębków i pakietów

Najbardziej powszechną technologią jest technologia pozyskiwania drewna sypkiego (zrębki zielone o różnej frakcyjności). Technologia ta polega na pozyskiwaniu drewna harvesterem lub pilarką spalinową (ścinka, okrzesywanie, wyrzynka sortymentów oraz układanie wymanipulowanych kłód i wyrzynków), zrywce sortymentów drewna okrągłego przy użyciu forwardera lub przyczepy samozaładowczej agregatowanej z ciągnikiem rolniczym a następnie na właściwych operacjach przygotowania surowca energetycznego. Zastosowanie harwestera do pozyskiwania drewna powoduje, że pozostały po zabraniu sortymentów drewna okrągłego surowiec energetyczny jest już ułożony w pasy, co umożliwia zastosowanie maszyn do jego zebrania i podnosi wydajność pracy. Pozostający na powierzchni zrębowej materiał w postaci gałęzi i wierzchołków drzew jest następnie zbierany i gromadzony na powierzchni zrębowej lub przy drodze wywozowej. Do tej operacji – zrywki pozostałości zrębowych – można stosować ten sam forwarder co do zrywki sortymentów drzewnych, lub specjalistyczny forwarder posiadający rozkładane boki w miejsce typowych kłonic. Zasadnicza operacja rozdrabniania surowca (zrębkowanie) odbywa się przy użyciu agregatu zrębkującego na podwoziu forwardera ( w przypadku rozdrabniania na powierzchni zrębowej) lub na podwoziu samochodu ciężarowego – w przypadku rozdrabniania surowca zgromadzonego przy drodze wywozowej. W procesie technologicznym pozyskiwania zrębków energetycznych w lesie, operacja zrębkowania surowca na powierzchni leśnej ma kluczowe znaczenie, bowiem umożliwia rozdrobnienie surowca gałęziowego bez konieczności

uprzedniego wyciągania go do np. drogi lub składnicy. Agregat zrębkujący powinien prezentować cechy niezbędne do stosowania technologii rozdrabniania na powierzchni leśnej, a więc posiadać rębarkę bębnową oraz pojemnik na zrębki (o pojemności ok. 20 m<sup>3</sup>) z możliwością jego podnoszenia w celu przesypania zawartości do kontenera lub do skrzyni ładownej samochodu wywozowego a także żuraw wyposażony w chwytak, podający surowiec do gardzieli rębarki. Alternatywą może być zastosowanie ciągnika rolniczego w wykonaniu leśnym z zawieszoną lub doczepioną rębarką i z pojemnikiem na zrębki, najczęściej w postaci przyczepy. Rozdrobniony surowiec w postaci zrębków jest wywożony do odbiorcy w systemie kontenerowym. Najczęściej zrębki są przesypane do kontenerów znajdujących się w pobliżu. Transport zrębków do odbiorcy odbywa się niezależnie od operacji zrębkowania.

Druga z podstawowych technologii zaopatrywania odbiorców w surowiec energetyczny z lasu polega na pakietowaniu (balotowaniu) pozostałości zrębowych na powierzchni leśnej przy użyciu maszyny pakietującej na podwoziu forwardera. Pakieciarka posiada żuraw hydrauliczny wyposażony w chwytak oraz urządzenie umożliwiające sprasowanie podanego surowca gałęziowego i opasanie go taśmą, tworząc w ten sposób balot. Wytworzone baloty (pakiety) są następnie przemieszczane (zrywane przy pomocy forwardera) do drogi wywozowej, przy której są gromadzone w oczekiwaniu na transport ciężarowy do odbiorcy. Zrębkowanie balotów następuje już na terenie zakładu.

Obecnie na świecie i również w Polsce szerzej stosowana jest technologia pozyskiwania surowca energetycznego w postaci zrębków [2, 4]. W Polsce pracuje około 10 agregatów tego typu. Druga z technologii pozyskiwania surowca energetycznego w lesie – technologia balotowania (pakietowania) [5] jest mniej rozpowszechniona a w Polsce znajduje się zaledwie kilka pakieciarek.

Poza technologiami produkcji drewna energetycznego w lesie, zastosowanie znajdują także technologie wykorzystujące rozdrabniacze typu recykler, służące do rozdrabniania bardzo różnorodnego materiału, jak pniaki, pozostałości zrębowe, pakiety utworzone z gałęzi oraz drewno użytkowe. W przypadku rozdrabniania surowca silnie zanieczyszczonego, jak np. pniaki konieczne jest zastosowanie stacji przesiewającej, która usuwa zanieczyszczenia mineralne. Tego typu maszyny znajdują zastosowanie na składnicach surowca, w zakładach przemysłowych, itp.

Wszystkie wyżej przedstawione technologie wymagają zastosowania wysokowydajnych ale i kosztownych maszyn-agregatów, co stwarza określone problemy organizacyjne. Z uwagi na fakt, że liczba tych maszyn służących do pozyskiwania drewna energetycznego jest niewielka w naszym kraju, konieczność zapewnienia im wystarczającego frontu pracy, wymusza rozwiązywanie szeregu problemów logistycznych. Ważniejszym z nich jest konieczność przemieszczania maszyn pomiędzy leśnymi powierzchniami roboczymi, zgodnie z obowiązującymi przepisami, które wymagają indywidualnych zezwoleń na przemieszczanie (określona trasa przejazdu, dzień i godzina). Niewielkie w su-

mie powierzchnie (max 4 ha), na których przeprowadza się pozyskiwanie surowca energetycznego i znaczna ich liczba (kilkanaście tysięcy w skali kraju) powoduje, że udział czasów przemieszczania maszyn jest znaczący w całkowitym czasie ich użytkowania i istotnie wpływa na koszty całych procesów technologicznych.

### 3. Podsumowanie

Jednym z najistotniejszych wyzwań w zakresie efektywnego zaopatrzenia odbiorców w biomasę leśną do celów energetycznych są rozwiązania organizacyjno-logistyczne całego procesu. Biorąc przykładowo pod uwagę, że w przeciętnym nadleśnictwie prowadzi się cięcia rębne na powierzchni około 200 ha w ciągu roku, oraz że na powierzchni zrębowej znajduje się ok 30 ton surowca energetycznego możliwego z technologicznego punktu widzenia do pozyskania, przewidywać można zatrudnienie agregatu zrębkującego przez około miesiąc. Założyć przy tym należy wydajność maszyny na poziomie 50 mp surowca w ciągu godziny efektywnej pracy i liczbie około 6 godzin takiej pracy w ciągu dnia roboczego, pod warunkiem uprzedniego zgromadzenia surowca. Z uwagi na znaczące koszty zakupu tego typu agregatów niebagatelny problemem staje się konieczność zapewnienia odpowiedniego frontu pracy i rozwiązywania kwestii częstego przemieszczania maszyn.

Przedstawione procesy technologiczne znajdują zastosowanie gdzie podmioty realizujące pozyskiwanie leśnego surowca energetycznego, posiadają tego typu maszyny. Produkcja zrębków energetycznych w lesie wymaga w procesie technologicznym specjalistycznych maszyn, których cena zbliżona jest do cen maszyn stosowanych przy pozyskiwaniu sortymentów drewna okrągłego. Stosowanie kosztownych maszyn wymaga zapewnienia im odpowiedniego frontu pracy. Stosunkowo niewielka liczba tych maszyn w Polsce wynika również z faktu, że znaczna część pozostałości zrębowych pozyskiwana jest w technologii tzw. samo wyrobu. Polega to na pozyskiwaniu i nabywaniu drewna w postaci gałęzi przez okoliczną ludność, zwłaszcza na terenach o stosunkowo dużym bezrobociu, nawet, kiedy w pobliżu znajdują się duże zakłady przerobu drewna. Przy takim zagospodarowaniu pozostałości zrębowych, porządkowanie powierzchni zrębowej przed jej odnowieniem odbywa się poprzez rozdrobnienie pozostałego surowca w formie z reguły cienkich gałązek z igliwem i niekiedy zmieszanie go z glebą.

Przedstawione technologie pozyskiwania drewna energetycznego podlegają ciągłym modyfikacjom, jeśli chodzi o stosowane modele maszyn. Z uwagi na znaczne nakłady, które należy ponieść chcąc stosować jedną z przedstawionych technologii oraz z powodu dużej wydajności tych maszyn, konieczne jest stworzenie czytelnego klimatu wokół problemu pozyskiwania drewna energetycznego w lesie. Dotyczy to zarówno gospodarza lasu, odbiorcy surowca, organów

kształtujących politykę energetyczną państwa, jak i samych przedsiębiorców leśnych, którzy na co dzień pozyskują drewno.

### Literatura

- [1] Gornowicz R., Pilarek Z. 2013. Wpływ pozyskiwania biomasy na wycofywanie pierwiastków biogenych ze środowiska leśnego. W: Biomasa leśna na cele energetyczne. Red. Gołos P, Kaliszewski A. IBL. Warszawa.
- [2] Hakkila P., Aarniala M. 2002. Improving the forest chip production process. Wood Energy Technology Programm. Newsletter on results 4/2002.
- [3] Kowalkowski A., Olejarski I. 2013. Możliwości wykorzystania popiołów z biomasy leśnej jako elementów odżywczych. W: Biomasa leśna na cele energetyczne. Red. Gołos P, Kaliszewski A. IBL. Warszawa.
- [4] Róžański H., Jabłoński K. 2012. Optymalne technologie pozyskiwania drewna energetycznego z cięć rębnych. Część I. Zrębki energetyczne. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna. 5/2012.
- [5] Róžański H., Jabłoński K. 2013. Optymalne technologie pozyskiwania drewna energetycznego z cięć rębnych. Część II. Baloty z pozostałości zrębowych. Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna. 1/2013.

## FOREST BIOMASS HARVESTING TECHNOLOGIES FOR ENERGY PURPOSES

### Summary

Growing needs for renewable energy make it necessary to look for its sources in forests. There are three basic sources of forest woody biomass, these are: logging residues from final fellings, small-sized wood, e.g. from early thinnings and stump wood. Logging residues from final fellings in pine stands is the most important source. Today, there are three main technologies used for energy wood harvesting. These are: wood chip production on the forest site or at roadside and the bundling of tree branches and tops. The technology applied decides about the form in which the energy wood is delivered to the heating plant. The most commonly used technology is that of chip production, with the main operation of chipping, which is performed with a chipper on a forwarder undercarriage. The typical chipping set consists of a drum chipper, a chip container and an undercarriage, on which the former two are assembled. The feeding of the material to the chipper is done with a crane with a grapple. The transport of chips is independent of the chipping operation and it is performed in the container system. Mechanized technologies of wood chip production are characterized by high productivity (50-400 bulk cu.m. per hour) and they require large wood concentrations on the chipping site. The presented energy wood chip production technology requires good organization systems, with regard the chip production as well as the energy production.

**Keywords:** logging residues, chips, bundles, energy wood

DOI:10.7862/rb.2014.111

*Przesłano do redakcji: 25.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 04.09.2014 r.*

**Elżbieta RYBAK-WILUSZ**<sup>1</sup>

**Vyacheslav PISAREV**<sup>2</sup>

**Paulina SAWICKA**<sup>3</sup>

## **URZĄDZENIA ZINTEGROWANYCH SYSTEMÓW ZAOPATRZENIA W ENERGIĘ BUDYNKU ZAMIESZKANIA ZBIOROWEGO**

Wprowadzania nowych rozwiązań służących poprawie efektywności produkcji i wykorzystania energii wynikające z przepisów krajowych i europejskich zmierza w kierunku rozwoju energetyki rozproszonej, zwiększenia wykorzystania odnawialnych źródeł energii, preferowania skojarzonego wytwarzania energii. W budynkach o dużym zapotrzebowaniu na ciepło dla potrzeb przygotowania c.w.u. wykorzystanie energii słonecznej zostało już szeroko rozpowszechnione. Inne możliwości to wykorzystanie ciepła gruntu lub skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła. Wymaga to zastosowania nowych urządzeń oraz rozbudowy istniejących instalacji.

W artykule przedstawiono zmiany sposobu zaopatrzenia w ciepło domu studenckiego Politechniki Rzeszowskiej jakie nastąpiły w ciągu ostatnich lat. Polegały one na zastosowaniu kolektorów słonecznych wspomagających instalację centralnej ciepłej wody w istniejącym wymiennikowym węźle zasilanym z sieci ciepłnej. W dalszej kolejności przedstawiono propozycję współpracy istniejącej instalacji z pompą ciepła oraz z agregatem kogeneracyjnym. Zintegrowana z istniejącą instalacją pompa ciepła wykorzystuje za pomocą wymienników pionowych ciepło gruntu, natomiast nośnikiem energii pierwotnej w przypadku zastosowania agregatu kogeneracyjnego jest gaz ziemny wysokometanowy wykorzystany do produkcji energii elektrycznej i ciepła. W artykule zaprezentowano, również graficznie, sposób rozwiązania instalacji oraz wzajemne powiązanie i współpracę zastosowanych urządzeń służących do produkcji, przetwarzania i magazynowania energii.

Należy zwrócić uwagę, że zaproponowane połączenia istniejącej instalacji z nowymi urządzeniami wynika z dużego zużycia ciepła niskotemperaturowego w postaci ciepłej wody użytkowej oraz znacznego i ciągle wzrastającego zużycia energii elektrycznej.

---

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Elżbieta RYBAK-WILUSZ, dr inż. e-mail: elrywi@prz.edu.pl; Politechnika Rzeszowska, Zakład Ciepłownictwa i Klimatyzacji, ul. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

<sup>2</sup> Vyacheslav PISAREV, dr hab.inż. prof. PRz e-mail: vpisarev@prz.edu.pl; Politechnika Rzeszowska, Zakład Ciepłownictwa i Klimatyzacji, ul. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów

<sup>3</sup> Paulina SAWICKA mgr inż. e-mail: sawicka61@wp.pl; Politechnika Rzeszowska, Zakład Ciepłownictwa i Klimatyzacji, ul. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów



**Słowa kluczowe:** kogeneracja, pompa ciepła, ciepła woda użytkowa, rozwiązanie techniczne

## 1. Wprowadzenie

Wprowadzanie nowych rozwiązań systemów zaopatrzenia budynków w energię wynika z trzech zasadniczych przesłanek, do których zaliczamy poprawę efektywności energetycznej, zmniejszenie emisji zanieczyszczeń do środowiska naturalnego oraz wzmocnienie bezpieczeństwa energetycznego odbiorców. Do zasadniczych działań w celu ich realizacji, należy między innymi, rozwój energetyki rozproszonej wykorzystującej lokalne źródła energii obejmujące zwiększenie wykorzystania OZE, preferowanie skojarzonego wytwarzania energii oraz dążenie do zastąpienia ciepłowni zasilających scentralizowane systemy ciepłownicze źródłami kogeneracyjnymi. Wymaga to oceny potencjału oszczędności energii, oceny efektów środowiskowych oraz ekonomicznych korzyści zmiany struktury dostaw energii pierwotnej. Możliwość rozwoju nowych inwestycji w tym zakresie stymuluje wsparcie finansowe uzyskiwane przez zastosowanie preferencyjnych kredytów oraz dotacji ze środków krajowych i europejskich [1,2].

Źródłem zaopatrzenia w energię większości budynków użyteczności publicznej wielu miast w Polsce są ciepłownie lub elektrociepłownie. Nie wyklucza to możliwości zastosowania innych źródeł energii tworzących zintegrowany system produkcji ciepła oraz produkcji energii elektrycznej. Umożliwia to rozwój wykorzystania odnawialnych źródeł energii zwłaszcza energii słonecznej, ciepła gruntu oraz układów skojarzonych małej mocy.

Jednym z takich przykładów jest przedstawiona w artykule zmiana systemu zaopatrzenia w ciepło domu studenckiego jaka nastąpiła w ostatnim okresie oraz propozycje dalszych zmian możliwych do przeprowadzenia w kontekście przyjętego kierunku rozwoju energetyki w Polsce. Potencjalne wprowadzenie nowych rozwiązań obejmuje zastosowanie nowych urządzeń w zakresie produkcji, przetwarzania, magazynowania i dostarczania energii oraz spełnienie obowiązujące norm oraz określonych standardów technicznych.

## 2. Charakterystyka potrzeb cieplnych budynku

Przedmiotem analizy jest dom studencki Politechniki Rzeszowskiej o nazwie „Promień”. Jest to 5 kondygnacyjny budynek zamieszkania zbiorowego przeznaczony do okresowego pobytu studentów. Na każdym piętrze znajduje się 26 pokoi 3-osobowych, pomieszczenia sanitarno-gospodarze, pralnia i kuchnia, na parterze pomieszczenia administracyjne i usługowe, a w piwnicy węzeł cieplny.

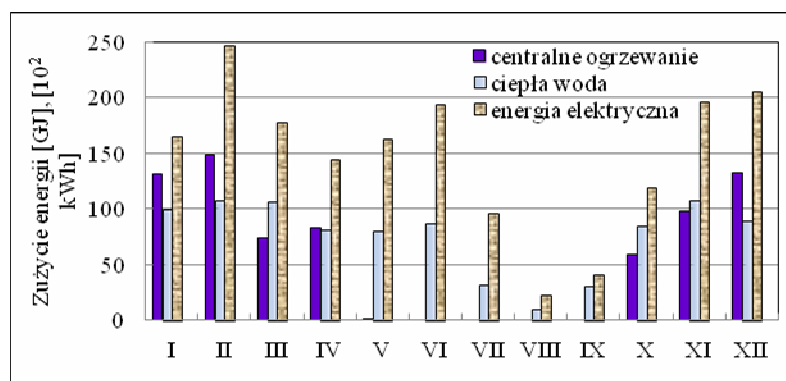
Tab.1. Roczne zapotrzebowanie na energię oraz koszty energii w domu studenckim w 2009 r., na podstawie [3]

Tab.1. Annual energy demand and energy costs in a student house in 2009, based on [3]

Lp.	Zapotrzebowanie na energię		Roczne koszty energii [zł]
1	Centralne ogrzewanie	725,7 GJ	35 587
2	Ciepła woda użytkowa	914,2 GJ	44 659
	Razem	1639,9 GJ	80 246
3	Energia elektryczna	177 204,0kWh	78 021

W budynku energia wykorzystywana jest dla potrzeb ogrzewania, przygotowania ciepłej wody, przygotowania posiłków oraz oświetlenia. Charakteryzuje go duże jednostkowe obciążenie powierzchniowe wynoszące  $5,47 \text{ m}^2$  na mieszkańca. Ze względu na funkcję oraz sposób użytkowania budynek cechuje duże zużycie ciepła na potrzeby c.w.u. i energii elektrycznej.

Zapotrzebowanie na ciepło na potrzeby przygotowania c.w.u. jest wyższe niż na ogrzewanie budynku, natomiast roczny koszt wytwarzania ciepła jest niewiele wyższy od kosztów energii elektrycznej (tab.1). Ciepło na cele c.w.u. oraz energia elektryczna wykorzystywane są przez cały rok. Zapotrzebowanie na ciepło do ogrzewania występuje tylko w sezonie grzewczym. W miesiącach od października do czerwca występuje bardzo duże obciążenie cieplne i elektryczne (rys.1) ze względu na zameldowanie ok. 318 osób [3]. W sezonie letnim obciążenie cieplne i elektryczne maleje z uwagi na pobyt tylko ok. 50 osób.



Rys.1. Zużycie ciepła na potrzeby c.w.u., c.o. oraz zużycie energii elektrycznej w 2009 r.

Fig.1. The consumption of heat for hot water, central heating and electric energy in 2009

Całkowite zapotrzebowanie na moc cieplną wynosi  $91,5 \text{ kW}$ , w tym do ogrzewania pomieszczeń  $54,7 \text{ kW}$ , a na potrzeby c.w.u.  $36,8 \text{ kW}$ . Zapotrzebowanie na moc elektryczną wynosi  $62 \text{ kW}$  [4].

### 3. Opis istniejącej instalacji

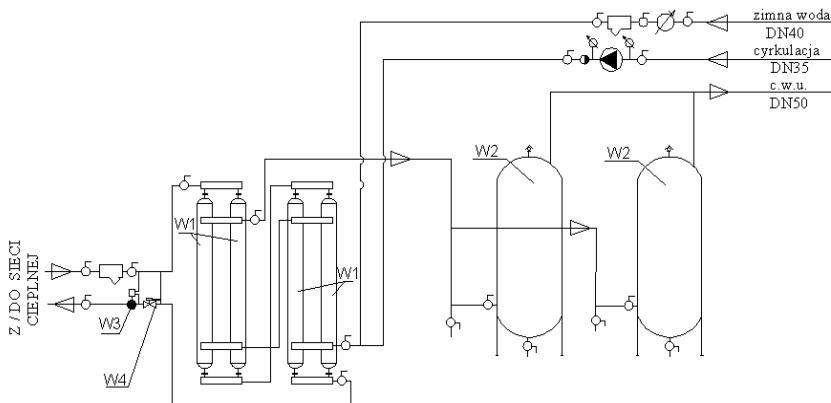
Obiekt został oddany do użytkowania w 1972 r. Całkowite potrzeby ciepłej wody pokrywał wówczas węzeł cieplny centralnego ogrzewania i ciepłej wody zasilany z miejskiej sieci ciepłej wodą o parametrach 135/70°C (rys. 2), z regulacją jakościową w źródle ciepła. Parametry instalacji centralnego ogrzewania wynoszą 90/70°C. Temperatura ciepłej wody  $T_c = 45^\circ\text{C}$ . Podstawowymi urządzeniami węzła ciepłej wody były:

- wymiennik JAD 3/18 (W1, rys.2) – szt.4,
- zasobnik ciepłej wody o poj. 1000 dm<sup>3</sup> (W2, rys.2) – szt 2.

Zasobniki umożliwiają dostosowanie energii wytworzonej w wymiennikach do dużej dobowej nierównomierności rozbioru ciepłej wody w budynku.

W 2010 r. została wykonana instalacja kolektorów słonecznych, która wspomaga instalację centralnej ciepłej wody w istniejącym węźle (rys. 3). Głównymi urządzeniami są:

- kolektor słoneczny (1, rys.3) – szt. 20,
- pojemnościowy podgrzewacz c.w.u. (7, rys.3) – szt 3,
- chłodnica glikolu (22, rys.3) – szt 1.

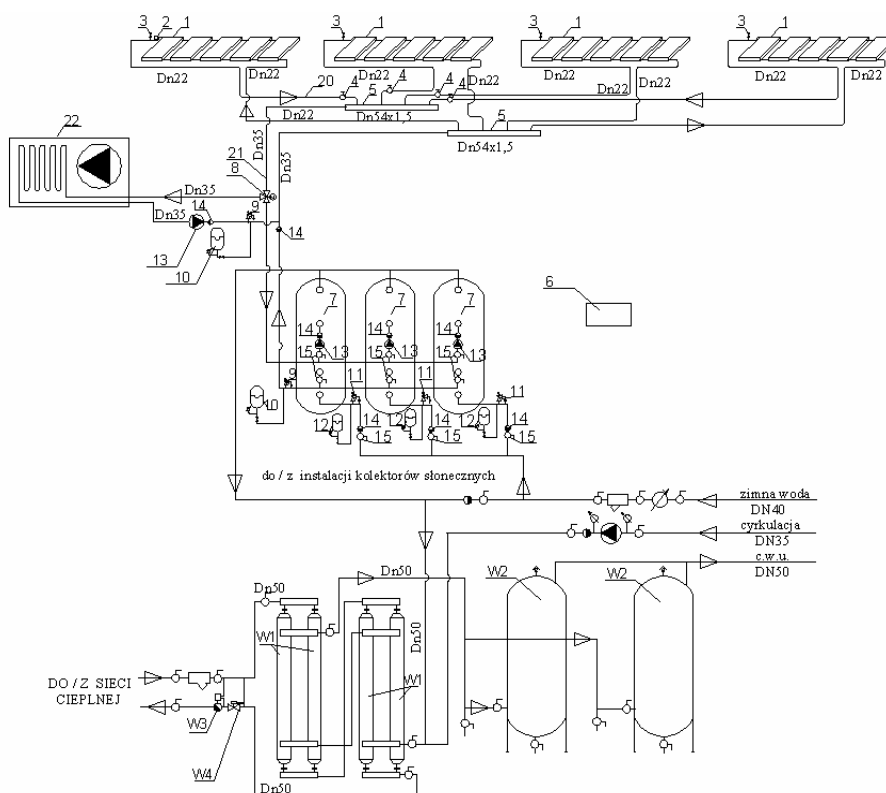


Rys.2. Schemat węzła cieplnego dla celów przygotowania c.w.: W1-wymiennik Jad 3/18, W2-zasobnik ciepłej wody Vaillant 1000, W3-licznik ciepła, W4-regulator różnicy ciśnienia.

Fig.2. Schema of heat centre the hot water preparation

Kolektory słoneczne zostały umieszczone na dachu budynku tworząc 4 zespoły po 5 kolektorów w każdym. Są to kolektory typu Hewalex KS 2000SP o powierzchni absorbera wynoszącej 1,82 m<sup>2</sup> (1, rys.3) połączone systemem rurociągów. Dla zrównoważenia oporów przepływu czynnika w poszczególnych bateriach kolektorów, za rozdzielaczami o średnicy DN54 zastosowano zawory regulacyjne (4, rys.3). Ciecz grzewcza (glikol) z kolektorów słonecznych jest dostarczana do pomieszczenia węzła, gdzie zaprojektowano 3 pojem-

nościowe podgrzewacze c.w.u. Reflex typu SF 750 (7, rys.3). W podgrzewaczach następuje ogrzanie zimnej wody użytkowej doprowadzonej następnie do istniejących w węźle 4 zespołów wymienników JAD3/18 (W1, rys.3). W zależności od temperatury jaką uzyska w pojemnościowych podgrzewaczach woda użytkowa zostaje dogrzana do docelowej temperatury i następnie zakumulowana w zasobnikach c.w. (W2, rys. 3).



Rys.3. Schemat istniejącej instalacji: 1- bateria 5 kolektorów Hewalex KS 2000 SP, 2 - czujnik temperatury, 3- odpowietrznik z separatorem Hewalex, 4 - zawory regulacyjne ASV-1 Danfoss Dn20, 5 - rozdzielacze Dn54x1,5, 6 - sterownik RX-910 SOLAR WC-NG1 z kompletem czujników, 7 - pojemnościowy podgrzewacz wody SF 750 Reflex z grzałką elektryczną 4,5 kW, 8 - zawór trójdrogowy VRB-3 DN25 z siłownikiem AMV 15 Danfoss, 9 - zawór bezpieczeństwa SYR 2115 Dn 20 6 bar, 10 - naczynie wzbiorcze przeponowe Reflex S200 z szybkozłączką SUR 1x1", 11 - zawór bezpieczeństwa SYR 2115 Dn20 6 bar, 12 - naczynie wzbiorcze przeponowe Refix DT5-80 z złączką flowjet 11/4", 13 - pompa obiegowa UPS SOLAR 25-120 230V Grundfoss, 14 - zawór zwrotny Socla DN32, 15 - zawór odcinający kulowy DN32, 16 - zawór zwrotny Socla DN40, 17 - zawór odcinający kulowy DN40, 20 - rurociągi glikolu Dn 22x1 w izolacji, 21 - rurociąg glikolu Dn 35x1,5 w izolacji, 22 - chłodnica glikolu z automatyką typ MCKD5P45-100/1/A1C6B6/V4/V3- „Klimor”[1],(pozostałe oznaczenia jak na rys. 2)

Fig.3. Schema of an existing installation the hot water preparation

W okresie braku rozbioru c.w.u. oraz gdy temperatura wody osiągnie wartość powyżej  $60^{\circ}\text{C}$ , a temperatura cieczy w kolektorach wzrośnie powyżej  $110^{\circ}\text{C}$  następuje przyłączenie zaworu trójdrogowego VRB-3 DN25 z siłownikiem AMV15 Danfoss (8, rys.3). Włączony zostanie obwód przez chłodnicę glikolu (22, rys.3), następuje uruchomienie chłodnicy oraz schłodzenie cieczy grzewczej kolektorów.

W celu zabezpieczenia instalacji przed rozwojem bakterii Legionelli każdy pojemnościowy podgrzewacz c.w.u. wyposażono w grzałkę elektryczną o mocy 4,5 kW, która powoduje przegrzanie wody, zgodnie z warunkami technicznymi, do temperatury  $+75^{\circ}\text{C}$  przez okres co najmniej 5 minut, z częstotliwością 1 raz na 3 doby.

Do sterowania pracą instalacji słonecznej wykorzystano sterownik RX-910 Solar WC-NG1 produkcji Frisko Wrocław (6, rys.3). Sterownik zainstalowano w specjalnym cokole montażowym, do którego podłączone są wszystkie przewody czujnikowe i zasilające [1].

Wykorzystanie energii promieniowania słonecznego umożliwia obniżenie kosztów eksploatacyjnych wytwarzania ciepła. Niemniej jednak możliwość dostarczenia ciepła uzależniona jest od warunków klimatycznych, pory roku oraz pory dnia, stąd opłacalność tego rodzaju rozwiązań w polskich warunkach klimatycznych występuje w systemach o dużym zużyciu ciepłej wody. W przypadku prezentowanego budynku liczba kolektorów i sposób rozwiązania systemu, między innymi przez schładzanie cieczy grzewczej oraz system automatycznego sterowania i regulacji pozwalają na wykorzystanie promieniowania słonecznego w okresie letnim i przejściowym oraz na współpracę z istniejącym węzłem cieplnym powodując obniżenie kosztów produkcji ciepła.

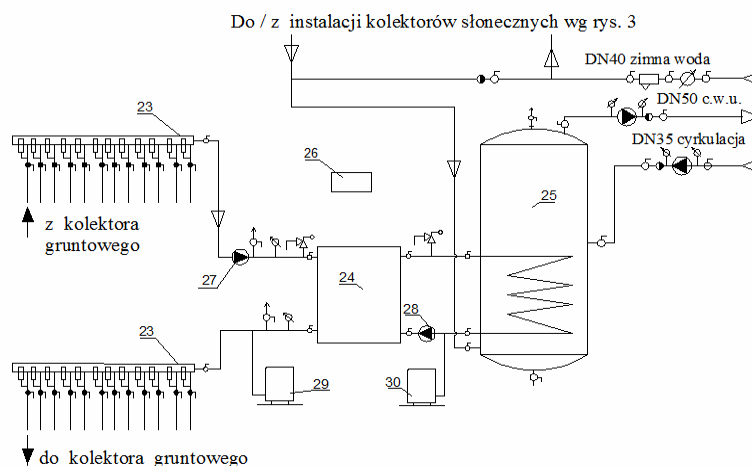
## **4. Rozwiązania zintegrowanych systemów zaopatrzenia w ciepło**

### **4.1. Instalacja słoneczna współpracująca z pompą ciepła**

Propozycją połączenia istniejącego systemu przygotowania ciepłej wody z innym odnawialnym źródłem ciepła jest zastosowanie pompy ciepła współpracującej z wymiennikiem gruntowym [6]. Przewiduje się zastosowanie dwustopniowej pompy ciepła firmy VISSMANN - VITOCAL 300 typ WW 268 (24, rys.4) o mocy grzewczej  $Q_g = 68,6\text{kW}$ . Jest to pompa ciepła typu solanka/woda współpracująca z wymiennikiem gruntowymi i instalacją słoneczną jako podstawowym źródłem ciepła (rys. 4).

Ciepło pobierane jest z dolnego źródła o średniej temperaturze gruntu  $8^{\circ}\text{C}$  za pośrednictwem pionowego gruntowego wymiennika ciepła (rys.4). Wybór tego rodzaju wymiennika wynika z lokalizacji pionowych sond na niewielkiej powierzchni przyległej do zasilanego budynku. Wymiennik wykonany jest z rur z tworzywa sztucznego (HDPE) o średnicy  $D_z=32$  mm i grubości ścianki wynoszącej 3,0 mm. Stanowi go 12 sond gruntowych, w kształcie podwójnej U-rury,

ułożonych w pionowych otworach o głębokości 50 m oddalonych od siebie o 6 m. Całkowita długość przewodów połączonych ze sobą przez zgrzewanie wynosi 1200 m.



Rys.4. Schemat współpracy istniejącej instalacji z pompą ciepła: 23 – rozdzielacz dolnego źródła ciepła, 24 – pompa ciepła Viessmann-Vitocal 300, 25 – wymiennik buforowy BUPRZ 2000 SOLAR, 26 – sterownik pompy ciepła; 27, 28 – pompa obiegowa; 29, 30 – naczynie zbiorcze przeponowe Reflex typu S.

Fig.4. Schema of cooperation an existing installation with a heat pump

Aby zapewnić równomierny rozdział nośnika ciepła w sondach, zastosowano rozdzielacze nośnika ciepła (23, rys.4). Do przekazania ciepła z gruntu do parowacza służy nisko krzepnąca ciecz - roztwór na bazie glikolu etylenowego (płyn Tyfocor). Obieg nośnika ciepła jest wymuszony działaniem pompy obiegowej firmy Grundfos typu CRNE 10-9 A-P-G-E HQQE (27, rys.4). Zabezpieczenie obiegu dolnego źródła ciepła stanowi obliczone i dobrane naczynie wzbiorcze firmy REFLEX typu S80 [4] (29, rys.4).

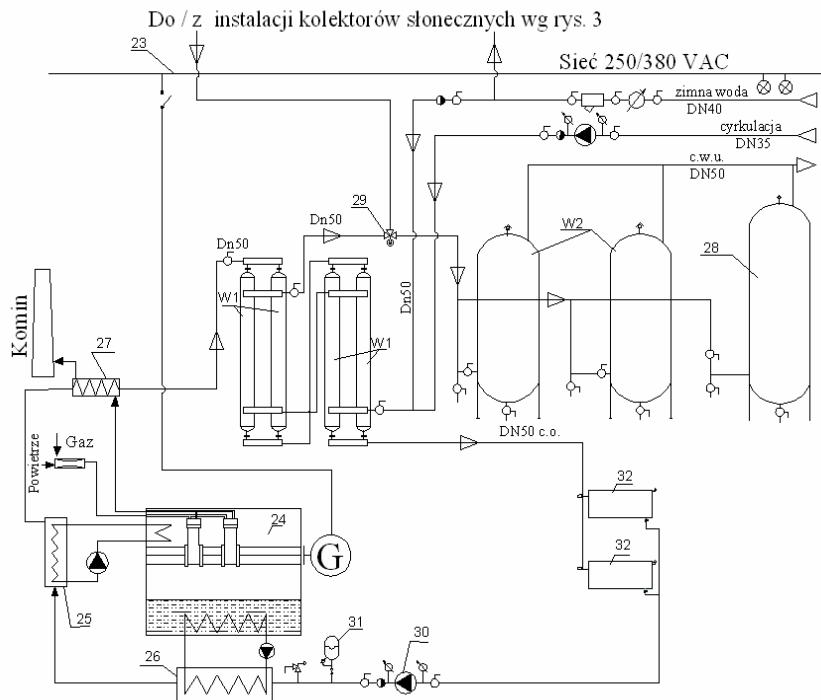
Górne źródło pompy ciepła stanowi wymiennik zasobnikowy typu BU PRZ 2000 SOLAR firmy PHU Wdzydze o pojemności 2000 dm<sup>3</sup> (25, rys.4). Jego zadaniem jest odbiór ciepła z pompy ciepła i akumulacja ciepłej wody użytkowej ogrzanej z wykorzystaniem pompy ciepła, jak również kolektorów słonecznych. Nośnikiem ciepła górnego źródła jest woda o temperaturze na zasilaniu węzownicy wymiennika buforowego wynosząca 60°C, a na powrocie 40°C, której przepływ wymusza pompa obiegowa. Parametry wody zimnej doprowadzanej do wymiennika zasobnikowego z sieci wodociągowej to 10°C. Uzyskana temperatura ciepłej wody użytkowej wynosi 45°C. Pompa ciepła jest przystosowana do wytwarzania niskich temperatur, wobec tego powierzchnia wymiany ciepła węzownicy grzejnej podgrzewacza zasobnikowego (25, rys.4) powinna zapewnić wymaganą temperaturę ciepłej wody w okresie niskiego nasłonecznienia.

Zastosowanie dwustopniowej pompy ciepła pozwala w okresie letnim na obniżenie obciążenia cieplnego pompy oraz efektywną współpracę z instalacją słoneczną. Należy również uwzględnić konieczność dostosowania systemu sterowania i kontroli instalacją słoneczną do współpracy ze sterownikiem pompy ciepła (26, rys.4). Przewidywany czas zwrotu kosztów nastąpi po ok. 13 latach [4].

#### 4.2. Instalacja słoneczna współpracująca z agregatem kogeneracyjnym

Inną propozycją współpracy istniejącego systemu podgrzewania ciepłej wody z produkcją ciepła oraz energii elektrycznej jest zastosowanie agregatu kogeneracyjnego.

Na podstawie obliczonego zapotrzebowania ciepła [4] dobrano agregat kogeneracyjny typu Vitobloc 200 Moduł EM-70/115 o następujących parametrach: moc elektryczna 70 kW<sub>e</sub>, moc cieplna 115 kW<sub>t</sub>, zużycie gazu ziemnego



Rys.5. Schemat współpracy istniejącej instalacji z agregatem kogeneracyjnym: 23 – istniejąca sieć elektryczna, 24 – agregat kogeneracyjny VITOBLOC 200 Moduł EM-70/115, 27 – grzejnik, 28 - zbiornik ciepłej wody Vaillant 200024 –pompa ciepła Viessmann-Vitocal 300, 25 – wymiennik chłodzenia płaszczu wodnego, 26 –wymiennik chłodzenia miski olejowej, 27 – wymiennik odzysku ciepła ze spalin, 28 – zbiornik ciepłej wody Vaillant 2000, 29 - zawór trójdrogowy VRB-3 DN32 z siłownikiem AMV, 30 – pompa obiegowa, 31 – naczynie zbiorcze przeponowe Reflex typu S, 32 – grzejnik c.o.(pozostałe oznaczenia jak na rys.3)

Fig.5. Schema of cooperation an existing installation with a cogeneration unit

24 m<sup>3</sup>/h, sprawność elektryczna wynosi 32,8, cieplna 52,8 %, a sprawność ogólna 90,7 %.

Agregat zlokalizowano w maszynowni znajdującej się w piwnicy budynku. Pracuje on w oparciu o gaz ziemny wysokometanowy i jest wyposażony w 6 cylindrowy silnik gazowy z zapłonem iskrowym.

Agregat po stronie ciepła pracuje równolegle z instalacją słoneczną, natomiast wytworzona za pośrednictwem generatora prądu współpracującego z silnikiem gazowym energia elektryczna może być wykorzystana na pokrycie potrzeb własnych budynku lub sąsiednich akademików. Odbiór ciepła umożliwia układ wymienników, którymi są: chłodnica oleju smarowego (26, rys.5), chłodnica płaszcza wodnego (25, rys.5), oraz chłodnica spalin wylotowych z silnika (27, rys.5). W celu zapewnienia możliwie jak najdłuższego i nieprzerwanego czasu pracy bloku kogeneracyjnego wykorzystywane są istniejące dwa zasobniki ciepłej wody (W2, rys.5) oraz zasobnik buforowy (28, rys.5) o pojemności 2000 dm<sup>3</sup>. Zasobniki akumulują ciepłą wodę użytkową ogrzaną w wymiennikach przepływowych typu Jad do wymaganej temperatury. Nadmiar ciepła kierowany jest do instalacji grzewczej (32, rys.5). Na rys. 5 przedstawiono schemat istniejącej instalacji współpracującej z agregatem kogeneracyjnym.

Charakterystykę pracy agregatu we współpracy z istniejącym źródłem ciepła przedstawiono w artykule [4]. Przeprowadzona analiza ekonomiczna [4] wykazała zwrot kosztów inwestycyjnych po 22 latach. Warunkiem opłacalności rozwiązania jest stała praca agregatu kogeneracyjnego - ciągły rozbiór ciepła i odbiór energii elektrycznej oraz zintegrowanie urządzeń z istniejącą infrastrukturą budynku.

## 5. Podsumowanie

W obiektach o dużym zużyciu energii elektrycznej oraz ciepła niskotemperaturowego, którymi są instalacje ciepłej wody użytkowej istnieją możliwości zastosowania zintegrowanych systemów zaopatrzenia w energię. Umożliwiają one wykorzystanie odnawialnych nośników ciepła takich jak ciepło gruntu lub dają sposobność skojarzonej produkcji ciepła i energii elektrycznej. Sprzyjają w ten sposób rozwojowi energetyki rozproszonej ograniczając inwestycje sieciowe.

Powoduje to konieczność rozbudowy istniejących instalacji przez wprowadzenie nowych urządzeń w zakresie produkcji i przetwarzania ciepła takich jak pompy ciepła, wymienniki gruntowe i agregaty kogeneracyjne. Wymaga również zastosowania nowych urządzeń magazynujących energię z uwagi na dopasowanie zmieniającej się w czasie ilości produkowanej energii do rzeczywistych potrzeb. Powiązanie różnych systemów produkcji ciepła stawia również wyższe wymagania w stosunku do systemu sterowania i kontroli pracą zmodernizowanych instalacji oraz zintegrowania nowych instalacji z istniejącą infrastrukturą budynku.



Powodem stosowania nowych rozwiązań są niskie koszty pozyskiwanej energii oraz możliwość obniżenia kosztów eksploatacyjnych istotna przy ciągle rosnących rynkowych cenach paliw i energii elektrycznej. W kontekście stosunkowo wysokich kosztów inwestycyjnych wsparcie finansowe w postaci różnorodnych dotacji i kredytów jest główną zachętą do ich wprowadzania.

## Literatura

- [1] Ustawa Prawo energetyczne (Dz.U. 54/1997 poz. 348, z późn. zmian.).
- [2] Ministerstwo Gospodarki. Polityka energetyczna Polski do 2030 r. Załącznik do uchwały nr 202/2009 Rady Ministrów z dnia 10.11.2009 r. Warszawa 2009.
- [3] Informacje Działu Technicznego Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2010.
- [4] Pisarev V., Rybak-Wilusz E., Sawicka P.: Analiza wielowariantowa zintegrowanego systemu zaopatrzenia budynku w energię. t.II, 2012 Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej, Budownictwo i Inżynieria środowiska, z.59 nr 2/2012/II.
- [5] Skorek J., Kalina J.: Ocena efektywności energetycznej i ekonomicznej gazowych układów kogeneracyjnych małej mocy. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [6] Pisarev V.: Alternatywne źródła energii. Instalacje z pompami ciepła. Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 2012.
- [7] [www.grundfos.pl](http://www.grundfos.pl).
- [8] [www.viessmann.pl](http://www.viessmann.pl).

## THE DEVICES OF CONNECTED SYSTEMS SUPPLY ENERGY FOR BUILDING COLLECTIVE RESIDENCE

### Summary

The introduction of new solutions to improve the efficiency of the production and use of energy arising from national and European legislation. It is moving in the direction of distributed energy development, increase the use of renewable energy sources, preferring a combined heat and power. In the buildings where is a large heat demand for the preparation of hot water, using solar energy has already been widely disseminated. The other possibility is to use the ground source heat pump or the cogeneration unit. This requires the use of new equipment and expansion of an existing installation.

The article shows how had been changes in the student house with the heat supplying of which have occurred over the past years. Solar thermal collectors are used that assist a hot water installation in an existing heat centre. In the article technical solutions of an existing installation and solar energy installation integrated with a heat pump and cogeneration are presented. The proposed combination of an installation with the new equipment is due to the high consumption of low temperature heat in the form of hot water and a significant and ever-increasing electricity consumption. This solution could provide significant environmental and financial benefits. However, require financial support during implementation.

**Keywords:** cogeneration, heat pump, hot water, technical solution.

DOI:10.7862/rb.2014.112

*Przesłano do redakcji: 21.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 04.09.2014 r.*

Adam RYBKA<sup>1</sup>  
Michał KRUPA<sup>2</sup>

## KIERUNKI PROJEKTOWANIA NIEWIELKICH OBIEKTÓW O FUNKCJI TEATRALNEJ NA PRZYKŁADZIE NOWEJ SIEDZIBY TEATRU LALEK W RABCE-ZDROJU

Artykuł dotyczy problematyki projektowania niewielkich obiektów teatralnych na przykładzie koncepcji nowej siedziby Teatru Lalek w Rabce-Zdroju. Zagadnienie to zostało przedstawione na tle obiektów o podobnej funkcji, które powstały na świecie w ciągu ostatnich lat: Dee and Charles Wyly Theatre w Dallas USA, projektu REX i OM, Domäne Hildesheim w Hildesheim Niemcy, projektu agn Niederberghaus & Partner GmbH. W artykule przeanalizowano wielofunkcyjne budynki przeznaczone na potrzeby kultury m.in.: Małopolski Ogród Sztuki projektu pracowni Ingarden & Ewý. Analiza wybranych realizacji posłużyła do opracowania na zlecenie przedstawicieli samorządu terytorialnego koncepcji architektonicznej obiektu teatralnego w Rabce-Zdroju. Zadanie to wymagało wieloetapowych studiów związanych z technologią funkcjonowania teatru, a także, w tym przypadku, odpowiednim nawiązaniem do zastanego krajobrazu kulturowego zabytkowego uzdrowiska. Wynikiem tych analiz było stworzenie modelowego projektu budynku o przedmiotowej funkcji, który następnie modyfikowano i dostosowywano do możliwości i oczekiwań inwestora oraz kontekstu, w którym inwestycja będzie realizowana – sąsiedztwo dwóch zabytkowych kościołów. Ważnym aspektem związanym z realizacją inwestycji kulturalnych jest ich znaczenia dla społeczności lokalnych. W toku prac projektowych zostały opracowane trzy warianty koncepcji różniące się przyjętymi rozwiązaniami funkcjonalnymi, przestrzennymi oraz zastosowanym językiem form architektonicznych. Wybrana wspólnie z inwestorem koncepcja zakłada stworzenie budynku, w którym elementy związane z funkcją teatralną mogą być wykorzystywane w inny sposób. Dzięki temu zabiegowi budynek teatru będzie obiektem multifunkcyjnym co w oczywisty sposób zwiększy jego atrakcyjność, a także podniesie rentowność całej inwestycji.

**Słowa kluczowe:** projekt architektoniczny, teatr, obiekt wielofunkcyjny

---

<sup>1</sup> Dr hab. inż. arch. Adam RYBKA, prof. PRz, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, telefon: (17 865) 1624, akbyr@prz.edu.pl.

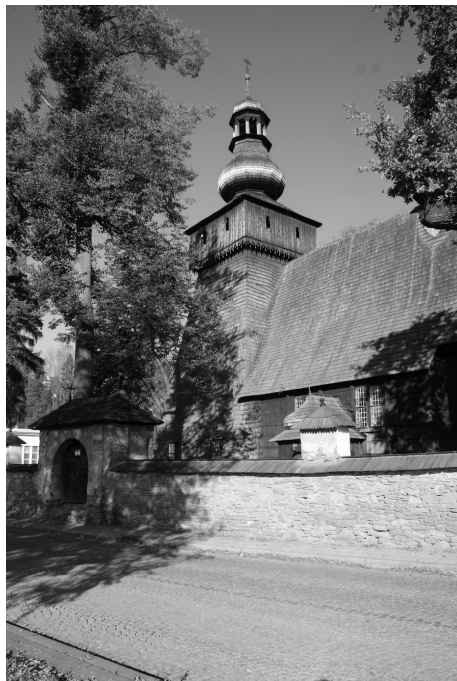
<sup>2</sup> Autor do korespondencji: dr inż. arch. Michał Krupa, Politechnika Rzeszowska, Al. Powstańców Warszawy 12, 35-959 Rzeszów, telefon: (17 865) 1691, mkrupa@prz.edu.pl.

## 1. Historia Teatru Lalek w Rabce-Zdroju

Rabka-Zdrój jako uzdrowisko funkcjonowała już w latach 60-tych XIX wieku [1]. Historia teatru lalek w Rabce-Zdroju związana jest ze zmianą charakteru miasta na uzdrowisko dziecięce po II Wojnie Światowej. Konieczność zapewnienia ciągłości edukacji młodym pacjentom Państwowego Zespołu Sanatoriów Przeciwgruźliczych zaowocowała utworzeniem Referatu Pedagogicznego, przy którym zorganizowano w 1949 roku teatr lalek. Pierwsze przedstawienia organizowano w Oficerskim Domu Wypoczynkowym w Rabce. Teatr, który stał się stałym elementem kulturalnej oferty uzdrowiska do połowy lat osiemdziesiątych XX wieku nie miał własnej siedziby. Korzystano z udostępnionych pomieszczeń m.in. w Willi „Wiosna” przy ul. Poniatowskiego (1949 r.) oraz w Willi „Wesoła” na Słonem (od 1950 r.). Dopiero w 1985 roku na potrzeby teatru przeznaczona została Willa „Watra” przy ul. Pocztowej 6, mieszcząca „Dom Aktora”, w którym do dzisiaj znajdują się pomieszczenia administracji, lokale mieszkalne pracowników, pokoje gościnne oraz biblioteka. Wówczas teatr nie posiadał stałej sceny w związku z czym spektakle odbywały się najczęściej w sanatoriach lub szkołach. Problemy lokalowe oraz związane z tym trudności logistyczne przy organizacji kolejnych przedstawień trwają do dziś.

Prace nad nowym projektem siedziby teatru lalek zostały podjęte w 2008 roku. Początkowo, przyjęty początkowo harmonogram prac nad projektem był niezwykle komfortowy z perspektywy architekta. Wiadomo było, że zgodnie z ustaleniami samorządu lokalnego podjętymi jeszcze w 1990 roku teatr będzie zlokalizowany przy ul. Orkana, na terenie należącym do parafii Św. Marii Magdaleny. Konkretna działka miała jednak dopiero zostać wydzielona. Jej kształt i powierzchnia miały wynikać z przyjętych rozwiązań architektonicznych. Prace projektowe rozpoczęto od sformułowania programu funkcjonalno-użytkowego. Wypracowano rozwiązania, które wydawały się optymalne. Następnie stworzono wstępną koncepcję architektoniczną budynku i to do niej dostosowano projekt wydzielenia nowej działki. Niestety rzeczywistość zweryfikowała całą sytuację gdyż nabyta przez inwestora działka nie pozwalała na realizację pierwotnej koncepcji.

Przy pracach nad nowym projektem pozostawiono założoną wielkość sceny oraz widowni, która miała pomieścić 200-250 osób. Pozostałe elementy budynku musiały zostać całkowicie przeprojektowane. Wielkość działki nie pozwalała bowiem na wygodne rozmieszczenie pomieszczeń związanych z zapleczem scenicznym czy foyer na jednym poziomie. Jednocześnie warunki gruntowe sprawiały, że projektowanie kondygnacji podziemnej byłoby całkowicie nieracjonalne. Wysokość budynku ograniczały wymogi ochrony ładu przestrzennego co wynikało z faktu, że w najbliższym sąsiedztwie znajduje się dwukondygnacyjny budynek banku, a nieco dalej, po przeciwnej stronie ul. Orkana dwa kościoły pw. Św. Marii Magdaleny: XVII wieczny kościół, drewniany, siedziba Muzeum Władysława Orkana oraz wzniesiony na początku XX wieku murowany.



Ryc. 1. Muzeum Władysława Orkana w Rabce-Zdroju, fot. [w:] Archiwum autora

Fig. 1. Władysław Orkan Museum in Rabka-Zdrój, photography [in:] Author's archive



Ryc. 2. Teatr Dee i Charles'a Wyly, Dallas, USA, fot. [w:] Archiwum autora

Fig. 2. Dee and Charles Wyly Theater, Dallas, USA, photography [in:] Author's archive

Wymienione wyżej uwarunkowania zmusiły projektantów do poszukiwania nowych rozwiązań architektonicznych. W tym celu przeanalizowano projekty oraz zrealizowane obiekty o zbliżonej funkcji, w których zaobserwowano podobne problemy. Poniżej przedstawiono kilka z nich. Jedne stanowiły inspirację w zakresie rozwiązań funkcjonalnych, inne zwracały uwagę zastosowanymi formami, kolejne ukazywały różne sposoby nawiązywania dialogu z zastanym otoczeniem.

## 2. Teatr Dee i Charles Wyly w Dallas (USA)

Jednym z ciekawszych, współcześnie zrealizowanych obiektów teatralnych jest Teatr Dee i Charles'a Wyly w Dallas w Stanach Zjednoczonych. Jego wyjątkowość polega na zupełnie nietypowym rozmieszczeniu poszczególnych stref funkcjonalnych wewnątrz budynku. Nietypowy układ wynikał częściowo z kontekstu przestrzennego (w tym z kształtu i rozmiarów działki), w którym miał być zrealizowany. Decydujący jednak był eksperymentalny charakter działalności artystycznej prowadzonej przez tę instytucję wymagający stworzenia moż-

liwości elastycznego kształtowania przestrzeni sceny i widowni oraz ich wzajemnych relacji. Pomieszczenia, które w tradycyjnym teatrze znajdują się za sceną jak choćby kieszenie sceniczne czy magazyny zostały zlokalizowane ponad przestrzenią, w której odbywają się spektakle. Natomiast elementy, które zwykle odnajduje się pomiędzy strefą wejściową a sceną znalazły się częściowo na kondygnacji podziemnej oraz na wyższych piętrach [2]. W rezultacie architektki z współpracujących przy projekcie biur OMA oraz REX uzyskali przestrzeń na poziomie parteru, którą można swobodnie kształtować oraz otwierać na otoczenie zewnętrzne budynku [3]. Ten nietypowy rozkład funkcji wymusił zastosowanie wielu urządzeń pozwalających na relatywnie szybkie i łatwe manipulowanie elementami widowni, sceny czy dekoracji. W ten sposób powstał ciekawy budynek, który można nazwać „maszyną” teatralną. Udowodniono w ten sposób, że nietypowy układ części związanej bezpośrednio ze sceną i ruchem dekoracji w trakcie spektaklu może skutecznie działać. To podejście projektantów widać również w bryle zewnętrznej, która w zasadzie w żaden sposób nie odwołuje się do archetypicznych form kojarzących się z obiektem mieszczącym teatr gdyż jest prosta, monolityczna architektura i sugeruje bezwzględne podporządkowanie funkcji.

### **3. Teatr na Zamku Marienburg (Kulturcampus Domäne Marienburg) w Hildesheim, (Niemczech)**

Przykładem projektu, w którym dokonano skutecznej integracji nowoprojektowanej formy z zabytkowym otoczeniem jest Teatr na Zamku Marienburg w Hildesheim, w Niemczech należący do Wydziału Teatru i Muzyki lokalnego Uniwersytetu. Projekt budynku, który został ukończony w 2012 roku przygotowała firma agn Niederberghaus & Partner GmbH. Projektanci zrezygnowali z poszukiwania dosłownych cytatów formalnych w zabytkowym sąsiedztwie. Połączenie zabytkowej struktury z prostą i nowoczesną formą architektoniczną przyniosło efekt w postaci wysokiej jakości architektury i tworzonej przez nią przestrzeni [4]. Zastosowanie skromnych środków wyrazu architektonicznego podkreśla walory estetyczne środowiska, w które budynek został wkomponowany. Śledząc linie gzymsów i nadproży projektowanego budynku można dostrzec elementy historycznej przestrzeni, do których nawiązywali architektki. Podobnie jak w wyżej wymienionych przykładach widać, że przy ograniczonej skali projektowanych obiektów teatralnych zasadniczy wpływ na zewnętrzną formę budynku ma fakt, że w środku znajduje się zamknięta kubatura sali teatralnej. Jedynie przestrzeń pełniąca funkcję foyer stwarza okazję do uzasadnionego „otwarcia” elewacji – np. za pomocą przeszkleń.



Ryc. 3. Teatr na Zamku Marienburg w Hildesheim, fot. [w:] Archiwum autora

Fig. 3. Domäne Marienburg Theater, photography [in:] Author's archive

#### 4. Małopolski Ogród Sztuki w Krakowie

Znakomitym przykładem wielofunkcyjnego budynku kulturalnego jest siedziba Małopolskiego Ogródu Sztuki w Krakowie zaprojektowana przez biuro Ingarden & Ewy. Złożona funkcja została wpisana w gabaryty XIX-wiecznej zabudowy. Projekt zakładał głęboką integrację środowiska zewnętrznego oraz wnętrza budynku. Styk tych dwóch przestrzeni miał sprzyjać działalności artystycznej ale nie tylko, autorzy projektu doskonale zdawali sobie sprawę z komercyjnych aspektów funkcjonowania tego typu obiektów. Atrakcyjna przestrzeń związana ze strefą wejściową budynku świetnie nadaje się do organizowania tutaj ekspozycji czy promocji handlowych. Podobnie, jak we wcześniej omawianym projekcie – Teatru w Hildesheim, spójna przestrzeń stworzona przez zabytkowe otoczenie oraz nowy budynek została stworzona przez elementy zupełnie różne w odbiorze [5].



Ryc. 4. Małopolski Ogród Sztuki w Krakowie, fot. [w:] Archiwum autora

Fig. 4. Lesserpoland Garden of Art in Krakow, photography [in:] Author's archive

## 5. Koncepcja nowej siedziby Teatru Lalek w Rabce-Zdroju

Wybrane i wyżej przedstawione przykłady dobrze ilustrują zasadnicze problemy jakie pojawiły się przy przedmiotowym projekcie nowej siedziby Teatru Lalek w Rabce-Zdroju. Mając na uwadze przedstawione na początku artykułu problemy związane z samą działką (stosunkowo niewielka powierzchnia) jak i jej położeniem (sąsiedztwo obiektów zabytkowych) stworzono kolejno trzy koncepcje. W niniejszym artykule przedstawiona zostanie ostatnia, zaakceptowana przez inwestora. Całkowite podporządkowanie projektowanego budynku funkcji i technologii teatralnej okazało się z kilku względów niemożliwe, na przykład powierzchnia działki nie pozwoliła na zaprojektowanie prawej i lewej kieszeni scenicznej – przewidziano tylko lewą. Analiza wysokościowa przeprowadzona w obszarze oddziaływania inwestycji wykluczyła możliwość wzniesienia sznurowni o pełnej wysokości wynikających z tradycyjnych modeli tatrów. Punktem wyjścia przy projektowaniu była pojemność widowni określona na poziomie 200 do 250 widzów. W powiązaniu z nią ustalono wielkość sceny i okna scenicznego. Dalsze rozmieszczenie poszczególnych funkcji i rozmiar związanych z nimi pomieszczeń były kompromisem pomiędzy zasadami projektowania budynków teatralnych, a uwarunkowaniami jakie stwarzała działka oraz możliwościami finansowymi inwestora. Zastosowanie odpowiedniego wyposażenia w sali pozwoli na to, aby pełniła również funkcję kina czy sali audytorijnej. Foyer znajduje się na dwóch kondygnacjach, na których znajdują się wejścia na widownię (parter oraz 2 piętro). Ograniczona powierzchnia

działki uniemożliwiła zaprojektowanie tej niezwykle ważnej przestrzeni w sposób tradycyjny, na jednym poziomie. Niemniej jednak szukając pozytywnych aspektów tej sytuacji należy zwrócić uwagę, że dzięki temu widzowie w przerwach spektakli będą mogli z poziomu 2 piętra podziwiać widok na XVII wieczny drewniany kościół. Dążenie do optymalizacji kosztów realizacji i późniejszej eksploatacji obiektu poszukiwano sposobów na ograniczenie kubatury. Osiągnięto to przez integrację pewnych funkcji i przestrzeni. Pomieszczenie pełniące rolę kieszeni scenicznej pozwala również na pracę nad scenografią czy kostiumami. Udało się stworzyć zwartą bryłę, pozbawioną na większości powierzchni otworów, co ma pozytywny wpływ na efektywność energetyczną projektowanego budynku. Parametry termoizolacyjne przegród przekraczają o przeszło 70% parametry narzucone przez obowiązujące prawo. Większe przeszklenia znajdują się głównie na zachodniej elewacji budynku. Założenia koncepcji zawierają postulat przyjęcia takich rozwiązań materiałowych i instalacyjnych aby obiekt kwalifikował się do programu „LEMUR – Energooszczędne Budynki Użyteczności Publicznej” realizowanego przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Program ten ma na celu minimalizację emisji CO<sub>2</sub> w procesie realizacji i eksploatacji projektowanych budynków. Wstępne analizy wykazały, że przyjęte rozwiązania architektoniczne są wystarczające do zakwalifikowania budynku nawet do najwyższej kategorii „A”, przewidzianej we wspomnianym programie NFOŚiGW.



Ryc. 5. Projekt Teatru Lalek w Rabce-Zdroju – widok od pn.-zachodu, archiwum G.P. ZERIBA  
Fig. 5. Puppet Theatre project in Rabka-Zdrój – view from north-west, G.P. ZERIBA's archive





Ryc. 6. Projekt Teatru Lalek w Rabce-Zdroju – widok od zachodu, archiwum G.P. ZERIBA

Fig. 6. Puppet Theatre project in Rabka-Zdrój – view from west, G.P. ZERIBA's archive



Ryc. 7. Projekt Teatru Lalek w Rabce-Zdroju – widok od południa, archiwum G.P. ZERIBA

Fig. 7. Puppet Theatre project in Rabka-Zdrój – view from south, G.P. ZERIBA's archive



Ryc. 8. Projekt Teatru Lalek w Rabce-Zdroju – widok od pn-wsch, Archiwum G.P. ZERIBA.

Fig. 8. Puppet Theatre project in Rabka-Zdrój – view from north-east, G.P. ZERIBA's archive.

Reasumując należy zwrócić uwagę na fakt, że projektowany budynek Teatru w Rabce-Zdroju będzie miał niebagatelne znaczenie dla lokalnej społeczności. Realizacja ta wpłynie na poszerzenie oferty kulturalnej miasta a także stworzy możliwość organizacji imprez o charakterze komercyjnym. Należy mieć nadzieję inwestycja zostanie zakończona sukcesem, a obiekt stanie się jednym z nowych symboli miasta.

## Literatura

- [1] Beiersdorf Z., Krasnowolski B.: Rabka. Studialne materiały konserwatorskie dla zespołu uzdrowiska i dawnej wsi, mpis, Kraków 1977, [w:] Archiwum NID O. Kraków, sygn. 495, s. 4-6.
- [2] Schmolke, B.: Construction and Design Manual: Theatres and Concert Halls, Dom Publisher, Berlin 2011.
- [3] Giannotti, A.: Drama in the City - Dee and Charles Wyly Theater, C3, Seul 2009, s. 74-87.
- [4] Kuśnierz-Krupa D., Konserwatorski profesjonalizm w Lizbonie / Conservator's professionalism in Lisbon, [w:] „Karta Krakowska 2000 – 10 lat później - Cracow Charter 2000 - 10 years later”, (red.) A. Kadłuczka, Monografia nr 400, Seria Architektura, Wyd. PK, Kraków 2011, s. 177.
- [5] Stiasny G., Mycielski K.: Małopolski Ogród Sztuki, [w:] „Architektura – murator” nr 01/2013, Warszawa 2013, s. 34-53.

## TRENDS IN DESIGNING SMALL OBJECTS SERVING A THEATRE FUNCTION ON THE EXAMPLE OF THE NEW PUPPET THEATRE IN RABKA-ZDROJ

### Summary

The article concerns the issue of designing small theatre objects on the example of the new Puppet Theatre in Rabka Zdroj. The question was posed against the background of theatre objects created in the world within recent years, such as: Dee and Charles Wyly Theatre in Dallas, USA, designed by REX and OMA and Domäne Hildesheim in Hildesheim, Germany, designed by agn Niederberghaus & Partner GmbH. Multi-functional buildings meant to serve cultural needs have also been analysed in the article, e.g.: Lesser Poland Garden of Art designed by Ingarden & Ewý. An analysis of selected realisations was used to prepare an architectonic concept of such a theatre object in Rabka-Zdroj commissioned by representatives of the local government. The task required multi-stage studies connected with e.g. technology of theatre functioning, functionality of a theatre object and, in this case, an appropriate reference to the existing cultural landscape of a historic health resort. The result of those analyses was creating a model project of such a building which was subsequently modified and adjusted to the possibilities and expectations of a concrete investor, and of the context in which a given investment would be realised – neighbourhood of two historic churches. An important aspect connected with the realisation of cultural investments is their significance for local communities. In the course of project work, three variants of the concept were prepared which differed in accepted functional and spatial solutions, and the applied language of architectonic forms. The concept, selected jointly with the investor, involves creating a building in which elements serving theatre functions can be used otherwise. Because of that the theatre building will be a multi-functional object which will obviously enhance its attractiveness and also increase the profitability of the whole undertaking.

**Keywords:** architectural design, theater, multifunctional building

DOI:10.7862/rb.2014.113

*Przesłano do redakcji: 14.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 04.09.2014 r.*

Agata SIWIŃSKA<sup>1</sup>

## WPŁYW WILGOTNOŚCI WZGLĘDNEJ POWIETRZA NA SORPCYJNE ZAWILGOCENIE MATERIAŁÓW BUDOWLANYCH

Referat dotyczy procesu sorpcji wilgoci w materiałach budowlanych. Przedstawiono w nim badania związane z wyznaczeniem zawilgocenia sorpcyjnego, zrealizowane na ośmiu różnych materiałach w sześciu odmiennych warunkach cieplno-wilgotnościowych. Testowanymi materiałami były cegła ceramiczna CC, cegła silikatowa CS, cztery betony komórkowe BK1, BK2, BK3, BK4 oraz zaprawa cementowa ZC i cementowo-wapienna ZCW. Badania zrealizowano w temperaturze 5°C oraz przy następujących poziomach wilgotności względnej powietrza:  $\varphi \approx 11,3; 33,6; 58,9; 75,7; 87,7; 98,5$  %. Próbkę materiałów o grubości 1 cm zaizolowano na pobocznicy i wysuszono do stałej masy w temperaturze 105°C. Następnie próbki umieszczano nad nasyconymi roztworami odpowiednich soli stabilizującymi wilgotność względną powietrza na określonym poziomie. W danych warunkach wilgotnościowych znajdowało się po 3 próbki każdego materiału. Badania polegały na rejestracji zmiany masy próbek w określonych odstępach czasu. Pomiar zmiany masy próbek rejestrowano przy użyciu wagi elektronicznej o dokładności 1 mg. Najdłużej ustalała się równowaga sorpcyjna przy wilgotności powietrza bliskiej 100 %. Przeprowadzone pomiary dostarczyły ilościowych danych na temat wielkości zawilgocenia sorpcyjnego w zależności od rodzaju, gęstości materiału oraz warunków cieplno-wilgotnościowych, w jakich materiały się znajdują. Oceniano wpływ wymienionych czynników na wielkość zawilgocenia sorpcyjnego. Wraz ze wzrostem wilgotności względnej powietrza obserwowano wzrost zawilgocenia sorpcyjnego. Jedynie w przypadku cegły ceramicznej nie zanotowano wyraźnych różnic w wielkości tego parametru. Największe wartości uzyskiwano dla betonów komórkowych.

**Słowa kluczowe:** sorpcja, wilgoć, beton komórkowy, cegła ceramiczna, cegła silikatowa, zaprawa cementowa, zaprawa cementowo-wapienna

### 1. Wstęp

Materiały stosowane do wykonywania ścian charakteryzują się właściwościami higroskopijnymi. Materiały o tej właściwości mają zwilżalne i łatwo na-

---

<sup>1</sup> Agata Siwińska, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Budownictwa i Architektury, Katedra Dróg, Mostów i Materiałów Budowlanych, Al. Piastów 50, 70-311 Szczecin, telefon: 91 449 43 41, e-mail: siwinska@zut.edu.pl

sycające się parą wodną pory. W normach europejskich przyjmuje się, że eksploatacyjna wilgotność materiału w przegrodzie jest to jego wilgotność w stanie równowagi z otaczającym powietrzem o temperaturze 23°C i wilgotności względnej 80 % [3, 8, 21, 25]. W pracy [8] podana jest zawartość wilgoci  $u_{80}$  oraz izotermy sorpcji dla różnych materiałów na podstawie danych zebranych w Fraunhofer-Institut für Bauphysik oraz przez innych badaczy.

Z kolei w normie [3] opisano postępowanie mające na celu określenie równowagowej zawartości wilgoci przy 23°C i 80 % wilgotności względnej powietrza. Podana jest liczba próbek, ich objętość, grubość oraz warunki kondycjonowania potrzebne do wyznaczenia  $u_{80}$ . Na tej podstawie autorzy [5] wykonali między innymi badania na naturalnym kamieniu. Natomiast Krus i Holm [13] określali podstawowe parametry związane z transportem wilgoci w nawiazaniu właśnie do wartości  $u_{80}$  dla kilku materiałów budowlanych.

W niniejszym artykule zamieszczono wyniki badań zawilgocenia sorpcyjnego uzyskane dla wybranych materiałów budowlanych w różnych warunkach cieplno-wilgotnościowych. Badania zostały wykonane w ramach prac badawczych realizowanych w Zakładzie Materiałów Budowlanych i Fizyki Budowli KDMiMB ZUT w Szczecinie.

## 2. Zawilgocenie sorpcyjne materiałów budowlanych

„Praktyczna” wilgotność materiałów budowlanych jest definiowana jako ilość wody znajdująca się we wbudowanych materiałach, która nie jest przekroczona z prawdopodobieństwem 90 %. W celu oszacowania tej wilgotności można posługiwać się wilgotnością higroskopijną przy wilgotności względnej powietrza 80÷85 %. Rząd wielkości praktycznego masowego zawilgocenia materiałów budowlanych  $u_m$  podany jest w [30]. I tak np. dla cegły ceramicznej wynosi on 1 %, cegły wapienno-piaskowej 3 %, a betonu komórkowego 6,5 %.

Badacze z różnych ośrodków podejmują się wyznaczenia sorpcyjności materiałów budowlanych, np. [12, 20]. Właściwości wilgotnościowe dla materiałów do izolacji cieplnej oraz materiałów murowych można znaleźć również w [8, 21]. Badacze podają wielkość zawilgocenia masowo bądź objętościowo [8, 14, 15]. Zamieszczone w [8] i [21] wilgotności masowe  $u$  oraz objętościowe  $\psi$  odpowiadają wilgotności w warunkach równowagi z powietrzem o temperaturze 23°C i wilgotności względnej 50 % oraz 80 %. Płoński i Pogorzelski [20] podają sorpcyjność w temperaturze 20°C.

Z powodu złożonej geometrii porów materiałów budowlanych wyznaczenie ich równowagowego zawilgocenia sorpcyjnego stwarza czasami trudności ze względu na to, iż tradycyjna metoda pomiaru wymaga kondycjonowania próbek przez wiele tygodni a nawet miesięcy. Poszukiwane są nowe metody skracające czas pomiaru. Zastosowanie tzw. Sorptionsprüfschrank przedstawiono w pracy [5]. Badacze uzyskali zadawalającą zgodność wyników przy wykorzystaniu tradycyjnej metody oraz komory do badań sorpcji.

Do najmniej higroskopijnych materiałów należą wyroby ceramiczne [24]. Cegła ceramiczna charakteryzuje się bardzo niską sorpcyjnością, która nie przekracza 1,5 %. Najmniejszą wilgotność sorpcyjną wśród materiałów budowlanych obok ceramiki ma również beton zwykły, wełna mineralna, gipsobeton, przy czym nie przekracza ona 3 % masy. Natomiast największą wilgotność sorpcyjną przekraczającą 20 % mają materiały drewnopochodne [9]. W grupie zapraw niską sorpcyjnością charakteryzują się zaprawy wapienne a wyraźnie wyższą zaprawy cementowe oraz cementowo-wapienne [12].

W literaturze naukowej można znaleźć wiele prac poświęconych ocenie wpływu różnych parametrów na wielkość zawilgocenia sorpcyjnego. Generalnie sorpcyjność materiałów zmienia się w bardzo szerokich granicach, a zależy głównie od rodzaju materiału, jego struktury porowatości, gęstości, składu, proporcji składników, zastosowanych dodatków i domieszek, technologii wykonania, a także warunków cieplno-wilgotnościowych, czyli wilgotności względnej powietrza i temperatury.

Zdecydowanie odmienne charaktery izoterm uzyskane dla rozmaitych materiałów budowlanych o różnych strukturach porowatości wskazują na duży wpływ tego czynnika na wielkości zawilgocenia sorpcyjnego. W przypadku gęstości nie można stwierdzić jednoznacznej tendencji, gdyż dla różnych materiałów zależność zawilgocenia sorpcyjnego od gęstości przedstawia się inaczej. I tak np. dla cegły ceramicznej wzrost gęstości powoduje obniżenie sorpcyjności, a dla cegły wapienno-piaskowej na odwrót. W przypadku betonu komórkowego zależność ta jest taka sama jak dla cegły silikatowej.

Kolejnymi ważnymi parametrami różnicującymi sorpcyjność materiałów budowlanych jest ich skład, proporcje zastosowanych składników, dodatki, domieszki a także technologia produkcji. Przykładowe orientacyjne wartości wilgotności sorpcyjnej wybranych materiałów budowlanych zamieszczono w pracy [12]. Wartości podawane przez różnych badaczy w kraju i za granicą wykazują niekiedy znaczne zróżnicowanie. W pracy [12], na podstawie przeprowadzonych badań sorpcji cegły ceramicznej stwierdzono, że uzyskane duże różnice między ceglami o zbliżonej gęstości, ale pochodzącymi z różnych cegielni, mogą wynikać ze składu surowcowego gliny i technologii produkcji. Czynniki te powodowały nawet trzykrotne zróżnicowanie wyników. Podobne rozbieżności badacze zaobserwowali w przypadku cegły silikatowej, tłumacząc to zastosowaniem popiołów lotnych.

Jeśli chodzi o beton komórkowy to również duży wpływ na wielkość jego zawilgocenia sorpcyjnego wywiera skład surowcowy. Większą sorpcyjnością wykazują się betony nieautoklawizowane, produkowane z cementu i popiołów lotnych. Natomiast pojawiające się różnice w wynikach badań mogą mieć związek również z doborem parametrów autoklawizacji [12]. Z danych przytoczonych w [20] wynika, że w przypadku betonu komórkowego sorpcyjność różni się nawet o 20 % w zależności od odmiany. Badania przeprowadzone na betonach komórkowych piaskowych i popiołowych wykazały, że średnie wilgotno-

ści sorpcyjne przy 50 % i 80 % wilgotności względnej powietrza są zbliżone, natomiast przy wilgotności 100 % betony popiołowe mają o około 20 % wyższą wilgotność sorpcyjną [1].

W przypadku tych samych zapraw wyniki uzyskiwane przez różnych badaczy [12, 20] wykazują znaczne zróżnicowanie. Różnice w sorpcyjności betonów i zapraw wynikają z zastosowania różnych kruszyw i spoiw oraz wprowadzenia do mieszanki różnych domieszek i dodatków. W efekcie uzyskuje się kompozyty nowej generacji o właściwościach znacznie odbiegających od tradycyjnych materiałów. Przykładowo wyniki badań sorpcyjności betonu wysokowartościowego w pięciu izotermicznych warunkach wilgotnościowych znaleźć można w [2].

Kolejnym czynnikiem decydującym w znacznej mierze o wielkości zawilgocenia sorpcyjnego jest wilgotność względna powietrza. Ujawnia się tutaj jednoznaczna tendencja zwiększenia zawilgocenia materiału wraz ze wzrostem  $\varphi$  potwierdzona wynikami badań wielu badaczy [5, 6, 10, 11, 14]. Instrukcja [30] redukuje liczbę punktów potrzebnych do wyznaczenia izotermy sorpcji. Zakłada, że wystarczy jedynie określenie zawilgocenia sorpcyjnego przy trzech poziomach wilgotności względnej powietrza, a mianowicie 75 %, 80 % i 85 %. W praktyce jednak wielu badaczy wykonuje badania przy większej liczbie poziomów wilgotności względnej powietrza z zakresu od 0 % do 100 %, i tak np. Gawin [6] wykonywał badania przy siedmiu, Franzen i Griesser [5] przy dziewięciu, Janz [10] przy dziesięciu. W każdym przypadku badacze uzyskiwali potwierdzenie wspomnianej zależności.

Ostatnim z wymienionych czynników jest wpływ temperatury. Pogorzelski [23] na podstawie badań Płońskiego stwierdza słabą zależność wilgotności sorpcyjnej materiałów od temperatury. Badania Płońskiego wykazały bowiem, że izotermy sorpcji otrzymane dla różnych temperatur charakteryzują się zbliżonym przebiegiem. Dlatego badania przeprowadza się w pomieszczeniach o temperaturze niekontrolowanej z reguły wynoszącej około 20÷25°C. Autorzy [7] badania na cegle glinianej wykonywali w temperaturze 23°C przy siedmiu poziomach wilgotności względnej powietrza. Przy 25°C i przy dziesięciu poziomach wilgotności względnej powietrza pomiary na piaskowcu, betonie komórkowym, zaprawie cementowej, cementowo-wapiennej, cegle oraz cegle wapienno-piaskowej wykonywali Janz i Johansson [10, 11]. Izotermy sorpcji stwardniałego zaczynu cementowego badali Espinosa i Franke [4]. Pomiary wykonywano również przy temperaturze 23°C oraz przy dziewięciu poziomach wilgotności względnej powietrza. Zawilgocenie sorpcyjne materiałów w temperaturze 20°C począwszy od wilgotności względnej powietrza równej 0 % nad żelazem krzemionkowym do 100 % nad czystą wodą testował także Min-Seok Lee [14].

W przypadku materiałów budowlanych nie ma jednoznacznej zależności zawilgocenia sorpcyjnego od temperatury w całym zakresie wilgotności względnej powietrza. Zależność ta przedstawia się inaczej w różnych przedziałach wilgotności, co zaobserwował Min Seok Lee [14] badając izotermy sorpcji

trzech materiałów przy trzech temperaturach 10, 20 i 30°C. Na podstawie wyników pomiarów autor zaobserwował jedynie niewielki wpływ temperatury na wielkość zawilgocenia sorpcyjnego.

### 3. Opis eksperymentu

Do badania sorpcji materiałów budowlanych stosuje się metodę statyczną, polegającą na oznaczaniu ilości zaadsorbowanej masy adsorbantu na podstawie dokładnych pomiarów: masy próbki przed, w trakcie oraz po zakończeniu doświadczenia, a także pomiaru temperatury. Sposób określania właściwości sorpcyjnych standardową metodą omówiony jest w normie [22]. Jej wady oraz zastosowanie nowej metody (APM Augenblicksprofilmethode, IPM Instantaneous Profile Method) skracającej czas pomiaru zaprezentowali Plagge, Funk, Scheffler, Grunewald, Häupl [17, 18, 19, 26]. Z kolei Markova, Sparr i Wadsö [16, 29] zaprezentowali nowatorską technikę pomiaru tzw. mikrokalorymetru, który pozwala na termodynamiczne scharakteryzowanie procesu sorpcji.

Przedstawiane w artykule badania mające na celu określenie zawilgocenia sorpcyjnego zrealizowano zgodnie z normą [22]. Założony program badawczy obejmował wyznaczenie zawilgocenia sorpcyjnego ośmiu materiałów budowlanych przy sześciu poziomach wilgotności względnej powietrza. Były to poziomy  $\varphi \approx 11,3; 33,6; 58,9; 75,7; 87,7; 98,5$  %. Badania wykonano przy stałej temperaturze wynoszącej 5°C.

Do badań przyjęto osiem różnych hydrofilowych materiałów budowlanych. Były to: cegła ceramiczna (CC), cegła silikatowa (CS), beton komórkowy (BK1, BK2, BK3, BK4), zaprawa cementowa (ZC) oraz zaprawa cementowo-wapienna (ZCW). W grupie betonów komórkowych analizowano cztery betony pochodzące od różnych producentów oraz o różnej gęstości. Dane dotyczące gęstości objętościowej testowanych materiałów zebrano w Tabeli 1 [27, 28]. Przyjęte do badań materiały charakteryzowały się odmienną strukturą, porowatością oraz gęstością.

Tabela 1. Średnia gęstość objętościowa próbek

Table 1. Average bulk density of samples

Material	$\rho$ [kg/m <sup>3</sup> ]
BK1 Termalica 500	609
BK2 Prefabet Łagisza 600	585
BK3 Ytong 400	595
BK4 Prefbet 600	626
CC Cegła ceramiczna	1547
CS Cegła silikatowa	1727
ZC Zaprawa cementowa	2053
ZCW Zaprawa cementowo-wapienna	1681



Prace przygotowawcze polegały na pocięciu materiałów gotowych oraz zapraw wykonanych w laboratorium na próbki o grubości 1 cm, zaizolowaniu ich pobocznic silikonem oraz wysuszeniu do stałej masy w temperaturze 105°C (Rys. 1).



Rys. 1. Próbkki – izolowanie i suszenie

Fig. 1. Samples – insulating and drying

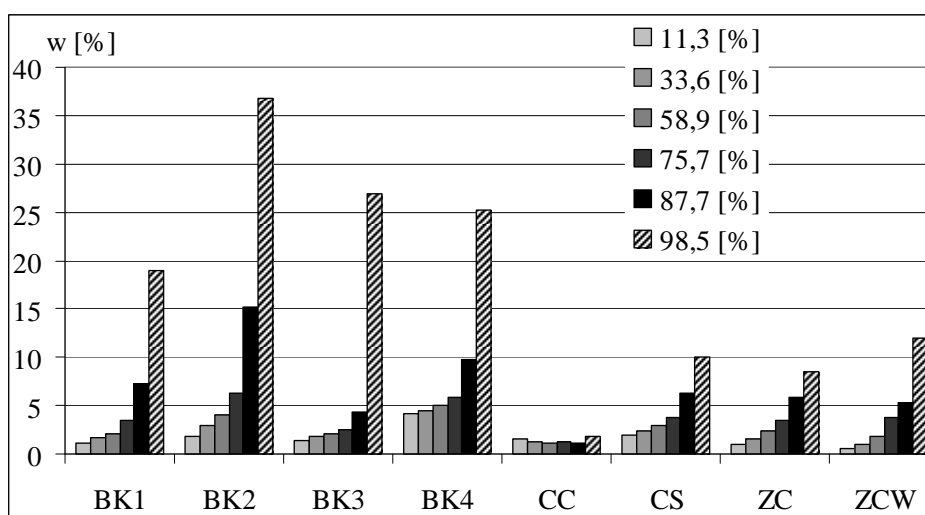
W ten sposób przygotowane próbki danego materiału umieszczano na rusztach, nad nasyconymi roztworami odpowiednich soli, stabilizujących wilgotność względną powietrza na określonym poziomie. W danych warunkach wilgotnościowych znajdowało się po 3 próbki każdego materiału. Ruszty z próbkami zamykano w szczelnych pojemnikach, które z kolei lokowano w termostatach utrzymujących stałą temperaturę na poziomie 5°C. Badania polegały na rejestracji zmieniającej się masy próbek w danych warunkach ciepłowo-wilgotnościowych w określonych odstępach czasu. Pomiar zmiany masy próbek rejestrowano przy użyciu wagi elektronicznej o dokładności 1 mg. Najdłużej ustalała się równowaga sorpcyjna przy wilgotności powietrza bliskiej 100 %. Były to najtrudniejsze do stabilizacji warunki pomiaru. Przy  $\varphi \approx 98,5\%$  następowało np. wykraplanie się pary wodnej w górnej części pojemnika. Aby zapobiec skapywaniu kropeł i zawilgoceniu próbek zastosowano specjalne bibułowe wkładki, co pozwoliło wyeliminować grube błędy pomiaru. Po przeprowadzeniu wielomiesięcznych pomiarów dokonywano obliczeń zawilgocenia sorpcyjnego [27, 28]. Uśrednione wyniki obliczeń dla testowanych materiałów zebrano w Tabeli 2.

Tabela 2. Średnia ustabilizowana wilgotność sorpcyjna w [%]

Table 2. Average equilibrium sorption moisture content w [%]

$\varphi$ [%]	BK1	BK2	BK3	BK4	CC	CS	ZC	ZCW
11,3	1,14	1,85	1,36	4,13	1,51	2,01	0,94	0,59
33,6	1,69	2,96	1,76	4,51	1,25	2,37	1,51	0,97
58,9	2,12	4,11	2,04	4,95	1,09	2,96	2,42	1,84
75,7	3,48	6,29	2,54	5,89	1,24	3,76	3,53	3,76
87,7	7,24	15,17	4,27	9,78	1,17	6,28	5,80	5,25
98,5	18,98	36,84	26,9	25,25	1,88	10,07	8,49	11,96

Z kolei na wykresie (Rys. 2) zestawiono graficznie uzyskane wyniki zawilgocenia sorpcyjnego dla poszczególnych materiałów przy danej wilgotności względnej powietrza.



Rys. 2. Zawilgocenie sorpcyjne materiałów

Fig. 2. Sorption moisture content of materials

#### 4. Podsumowanie

Przeprowadzone pomiary dostarczyły ilościowych danych na temat wielkości zawilgocenia sorpcyjnego w zależności od rodzaju i gęstości materiału oraz warunków ciepłno-wilgotnościowych, w jakich materiały się znajdują.

Mianowicie wraz ze wzrostem wilgotności względnej powietrza obserwowano wzrost zawilgocenia sorpcyjnego. Jedynie w przypadku cegły ceramicznej nie zanotowano wyraźnych różnic w wielkości zawilgocenia, plasowało się ono na poziomie od 1,09 do 1,88 %, co potwierdziły przytoczone powyżej źródła literaturowe. Największe wartości zawilgocenia uzyskiwano dla betonów komórkowych. W tej grupie materiałów wyraźnie uwidocznił się wpływ gęstości i składu surowcowego na otrzymywane wartości. W zakresie wilgotności względnej powietrza do 58,9 % największe zawilgocenie sorpcyjne otrzymywano dla betonu BK4. Powyżej tego poziomu wyższe wartości zawilgocenia notowano dla betonu BK2. Rozbieżności w wielkości zawilgocenia sorpcyjnego tych samych wyrobów o zbliżonej gęstości wynikać mogą z faktu, iż powstały one w różnych zakładach, przy zastosowaniu odmiennych sposobów produkcji i odmiennych składników.

W przypadku cegły silikatowej przy niższych wilgotnościach sorbowała ona od dwóch do trzech razy więcej, natomiast przy wyższych powyżej 87,7 %,

przeszło pięciokrotnie więcej niż cegła ceramiczna. W porównaniu z materiałem BK4 cegła silikatowa sorbowała około 2,5 razy mniej wilgoci niż beton komórkowy w temperaturze 5°C.

W grupie zapraw generalnie niższą sorpcyjnością charakteryzowała się zaprawa cementowo-wapienna. Jednak przy najwyższym poziomie wilgotności względnej powietrza, tj. przy  $\varphi \approx 98,5\%$ , dla ZCW zanotowano zwilgocenie sorpcyjne bliskie 12%.

Jak wykazano w trakcie przeprowadzonych badań równowaga sorpcyjna w danych warunkach temperatury i ciśnienia zależy od rodzaju adsorbentu, jego struktury porowatości i powierzchni właściwej oraz wzrasta wraz ze wzrostem wilgotności względnej powietrza. Materiały o różnej strukturze wewnętrznej wykazują odmienną dynamikę tego procesu i różne zależności równowagowe.

## Literatura

- [1] Bobociński A.: Wpływ wilgotności sorpcyjnej na przewodność cieplną betonów komórkowych. Prace Instytutu Techniki Budowlanej. Kwartalnik nr 4 (128) Warszawa 2003.
- [2] Bogucka J., Grabiec-Mizera T., Jasiczak J.: Ocena właściwości sorpcyjnych betonu wysokowartościowego. XLV Konferencja Naukowa Komitetu Inżynierii Lądowej i Wodnej PAN i Komitetu Nauki PZITB, Wrocław-Krynica 1999, s. 167-172.
- [3] DIN 52 620 Wärmeschutztechnische Prüfungen. Bestimmung des Bezugsfeuchtegehalts von Baustoffen. Ausgleichsfeuchtegehalt bei 23°C und 80% relative Luftfeuchte.
- [4] Espinosa R. M., Franke L.: Influence of the age and drying process on pore structure and sorption isotherms of hardened cement paste. Cement and Concrete Research 36 (2006) 1969-1984.
- [5] Franzen C., Griesser U. J.: Neue Perspektiven für die Bestimmung des Feuchte-sorptionsverhaltens von Naturbausteinen. Universität Innsbruck, Innsbruck 2002, 221-227.
- [6] Gawin D.: Modelowanie sprzężonych zjawisk ciepłno-wilgotnościowych w materiałach i elementach budowlanych. Zeszyty naukowe nr 853, Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej Łódź 2000.
- [7] Hansen E. J., Hansen K. K.: Unfired clay bricks – moisture properties and compressive strength. Building Physics 2002 – 6th Nordic Symposium, 453-460.
- [8] Hohmann R., Setzer M. J., Wehling M.: Bauphysikalische Formeln und Tabellen. Wärmeschutz – Feuchteschutz – Schallschutz. Werner Verlag, München 2004.
- [9] Ickiewicz I., Sarosiek W., Ickiewicz J.: Fizyka budowli. Wybrane zagadnienia. Politechnika Białostocka, Białystok 2000.
- [10] Janz M.: Moisture transport and fixation in porous materials at high moisture levels. Lund 1997.
- [11] Johannesson B. F.: Prestudy on diffusion and transient condensation of water vapor in cement mortar. Cement and Concrete Research 32(2002) 955-962.

- [12] Kisielewicz T., Królak E., Pieniżek Z.: Fizyka cieplna budowli. Politechnika Krakowska, Kraków 1998.
- [13] Krus M., Holm A. H.: Simple methods to approximate the liquid transport coefficients describing the absorption and drying. Proceedings of the 5th Symposium "Building Physics in the Nordic Countries", Göteborg 1999, 241-248.
- [14] Lee Min-Seok: Versuche und kritische Anmerkungen zu einigen Grundlagen der Feuchtespeicherung und des Feuchtetransports in Baustoffen. Dissertation, Dortmund 1996.
- [15] Lohmeyer G.: Praktische Bauphysik. Wydawnictwo B.G. Teubner, Stuttgart 1992.
- [16] Markova N., Sparr E., Wadsö L.: On application of an isothermal sorption microcalorimeter. *Thermochimica Acta* 374 (2001) 93-104.
- [17] Plagge R., Funk M., Scheffler G., Grunewald J.: Experimentelle Bestimmung der hygryschen Sorptionsisotherme und des Feuchtetransportes unter instationären Bedingungen. *Bauphysik* 28 (2006), Heft 2, s. 81-87.
- [18] Plagge R., Grunewald J., Häupl P.: Simultane Bestimmung der hygryschen Sorptionsisotherme und der Wasserdampfpermeabilität. *Feuchtetag 1999, Umwelt, Meßverfahren, Anwendungen DGZfP-Berichtsband BB 69-CD Poster 22.*
- [19] Plagge R., Scheffler G., Grunewald J.: Measurement of water retention and moisture conductivity at transient conditions. *Research in Building Physics and Building Engineering, Proceedings of the Third International Building Physics Conference, Concordia University, Montreal, Canada 2006, Taylor & Francis Group, London 2006, s. 129-136.*
- [20] Płoński W., Pogorzelski J. A.: Fizyka budowli. Arkady, Warszawa 1979.
- [21] PN-EN 12524:2003 Materiały i wyroby budowlane. Właściwości cieplno-wilgotnościowe. Tabelaryczne wartości obliczeniowe.
- [22] PN-EN ISO 12571:2002 Ciepłno-wilgotnościowe właściwości materiałów i wyrobów budowlanych. Określanie właściwości sorpcyjnych.
- [23] Pogorzelski J. A.: Fizyka cieplna budowli. PWN, Warszawa 1976.
- [24] Praca zbiorowa pod kierunkiem B. Stefańczyka: Budownictwo ogólne. Tom 1. Materiały i wyroby budowlane. Arkady, Warszawa 2005 156.
- [25] Praca zbiorowa pod kierunkiem P. Klemma: Budownictwo ogólne. Tom 2. Fizyka budowli. Arkady, Warszawa 2005.
- [26] Scheffler G., Plagge R., Grunewald J., Häupl P.: Evaluation of instantaneous profile measurements indicating dependencies of moisture transport on hysteresis and dynamics. *Research in Building Physics and Building Engineering, Proceedings of the Third International Building Physics Conference, Concordia University, Montreal, Canada 2006, Taylor & Francis Group, London 2006, s. 121-128.*
- [27] Siwińska A.: Związek między izotermą sorpcji a współczynnikiem przewodzenia ciepła porowatego materiału budowlanego. Rozprawa doktorska, Szczecin 2008.
- [28] Szczeciński M., Szubert L.: Ocena izoterm sorpcji wybranych materiałów budowlanych. Praca inżynierska, Szczecin 2014.
- [29] Wadsö I., Wadsö L.: A new method for determination of vapour sorption isotherms using a twin double microcalorimeter. *Thermochimica Acta* 271 (1996) 179-187.
- [30] WTA-Merkblatt 4-11-02/D Messung der Feuchte von mineralischen Baustoffen. Deutsche Fassung von Oktober 2003.

## THE INFLUENCE OF THE RELATIVE HUMIDITY OF AIR ON SORPTION MOISTURE CONTENT OF BUILDING MATERIALS

### Summary

The paper is devoted to the moisture sorption process in building materials. Presented research carried out on eight different materials in six diverse hygrothermal conditions were aimed on determining sorption moisture content. Ceramic brick CC, calcium silicate brick CS, four autoclaved aerated concretes BK1, BK2, BK3, BK4, cement mortar ZC and cement-lime mortar ZCW were tested. The measurements were conducted in temperature of 5°C and in the following levels of air relative humidity:  $\varphi \approx 11.3; 33.6; 58.9; 75.7; 87.7; 98.5$  %. The materials samples of 1 cm thickness were insulated on sides and dried up in temperature of 105°C to a constant mass. Subsequently, the samples were placed over saturated salt solutions which were stabilizing air relative humidity at definite level. In given humidity conditions 3 samples of every material were kept. The experiments consisted in recording changes of samples mass in pre-defined time intervals. Measurements of the changing mass of samples were recorded with the electronic scale with accuracy of 1 mg. The sorption equilibrium settled the longest at the relative humidity close to 100%. The carried out measurements provided quantitative data regarding sorption moisture content, depending on material type, material density and hygrothermal conditions. Influence of the factors in question on the value of sorption moisture content was evaluated. With the increase of air relative humidity the increase of sorption moisture content was observed. Merely in case of ceramic brick no distinct differences of this parameter was noted. The highest values were obtained for autoclaved aerated concretes.

**Keywords:** sorption, humidity, autoclaved aerated concrete, ceramic brick, silica brick, cement mortar, cement-lime mortar

DOI:10.7862/rb.2014.114

*Przesłano do redakcji: 27.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 22.12.2014 r.*

Ryszard SKIBA<sup>1</sup>  
Teresa ZYCH<sup>2</sup>

## NOWOCZESNE MATERIAŁY I TECHNOLOGIE DO WYKONYWANIA PODŁÓG PRZEMYSŁOWYCH

W artykule przedstawiono nowoczesne rozwiązania materiałowo-technologiczne, pozwalające na wykonanie bezspoinowych (bezdylatacyjnych, beznacięciowych) podłóg przemysłowych. Metoda tradycyjna wykonania betonowych podkładów podłogowych wymaga zastosowania gęstej siatki nacięć dylatacyjnych, stanowiących zabezpieczenie przed zarysowaniami płyty betonowej, wynikającymi ze skurczu betonu, zmian temperatury itd. Niekorzystne skutki nacięć dylatacyjnych na właściwości wytrzymałościowe i użytkowe betonowej płyty podkładu zainicjowały poszukiwania rozwiązań bezdylatacyjnych. Redukcję skurczu betonu, a przez to możliwość rezygnacji z nacięć dylatacyjnych osiągnięto dzięki zastosowaniu dodatku włókien stalowych do betonu, przejmujących naprężenia rozciągające lub poprzez sprężenie betonu za pomocą kabli sprężających, które nie dopuszczają do powstawania rys skurczowych przez wprowadzenie dodatkowej siły ściskającej do przekroju. Zastosowanie włókien stalowych jako zbrojenia rozproszonego, a także sprężenia betonu jako zbrojenia aktywnego pozwala nie tylko na zabezpieczenie podkładu przed zarysowaniami skurczowymi, ale również powoduje polepszenie właściwości mechanicznych betonu, zwiększając wytrzymałość na rozciąganie, zginanie, wytrzymałość zmęczeniową, odporność na uderzenia i odporność na ścieranie. W artykule scharakteryzowano dwa rodzaje podkładów bezdylatacyjnych: fibrobetonowe i betonowe sprężone. Zaprezentowano również najczęściej stosowane technologie i materiały do wykonania posadzek bezspoinowych na podkładach betonowych: metodę DST (Dry Shake Topping) - przez utwardzanie powierzchniowej górnej warstwy wiążącego betonu za pomocą suchej posypki oraz przez wykorzystanie niskoskurczowych żywic syntetycznych. W artykule zawarto także informacje dotyczące aktualnych kierunków zastosowania bezspoinowych podkładów i posadzek przemysłowych.

**Słowa kluczowe** podkład bezspoinowy, posadzka bezspoinowa, podkład fibrobetonowy, podkład zbrojony aktywnie, posadzka żywiczna, włókna stalowe, żywice syntetyczne

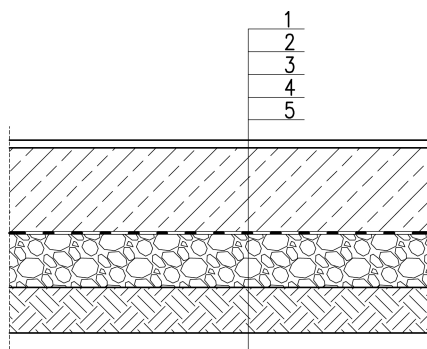
<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Ryszard Skiba, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. 12 628 23 06, e-mail: rskiba@pk.edu.pl.

<sup>2</sup> Teresa Zych, Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Lądowej, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24, tel. 12 628 21 55, e-mail: tzych@pk.edu.pl.

## 1. Wprowadzenie

Współczesne możliwości materiałowe i technologiczne pozwalają na wykonanie nowoczesnych podłóg, w których zarówno posadzka, jak i podkład (Rys. 1) [3, 10, 13, 18, 19] mogą być realizowane jako warstwy bezspoinowe (bezdylatacyjne, beznacięciowe [6]), czyli warstwy nie zawierające dylatacji (przeciwskurczowych /pozornych/, termicznych).

Dylatacje stanowią zabezpieczenie przed zarysowaniami posadzki/podkładu, spowodowanymi naprężeniami rozciągającymi, powstającymi m.in. w wyniku skurczu materiału posadzkowego, zmian temperatury [8, 10, 13]. Materiałem, który charakteryzuje się wysokim skurczem i często jest stosowany do wykonania podkładu (jastrychu /<hebraj.> Astryoh, <niem.> Estrich/) (elementu nośnego w konstrukcji podłogi, przenoszącego obciążenia statyczne i dynamiczne na podłoże, np. grunt) oraz pełniącego czasami także rolę posadzki (wierzchniej, użytkowej warstwy podłogi) (Rys. 1) jest beton. Ze względu na jego skurcz mogą wystąpić rysy i pęknięcia płyty podkładu.



Rys. 1. Układ warstw typowej podłogi przemysłowej: 1. posadzka, 2. płyta betonowa, 3. warstwa poślizgowa, 4. podbudowa, 5. podłoże gruntowe

Fig. 1. Layer system of typical industrial floor: 1. floor, 2. concrete slab, 3. sliding layer, 4. substructure, 5. subsoil

Jednym ze sposobów, aby nie dopuścić do zarysowania płyty betonowej, której powierzchnia w przypadku obiektów przemysłowych niejednokrotnie przekracza 20000 m<sup>2</sup>, jest wykonanie dylatacji. Szczeliny dylatacyjne nacinane są w płycie betonowej na głębokość około 1/3 grubości płyty [10, 13], przez co występuje kontrolowane pęknięcie płyty pod nacięciem i podział płyty na pola dylatacyjne. Dylatacje pozwalają na ruch pól w poziomie, a uniemożliwiają ruch w pionie, jak również nie dopuszczają do zarysowań płyty w miejscach przypadkowych [9, 14]. Stosunek boków pola roboczego powinien być mniejszy niż 1:1,5, aby kształt pola roboczego był jak najbardziej zbliżony do kwadratu. Dylatacje najczęściej tworzą układ pól 6m x 6m (długość boku pola nie powinna przekraczać 6m) [6, 10, 12, 13, 14].

Wykonanie siatki nacięć dylatacyjnych w płycie betonowej podkładu zapobiega zarysowaniom płyty, ale skutkuje również niekorzystnym wpływem na właściwości wytrzymałościowe i użytkowe płyty [1, 12, 14, 21]. Nacięcia dylatacyjne obniżają wytrzymałość statyczną i zmęczeniową płyty. Ponadto występowanie szczelin może być przyczyną uszkodzenia powierzchni płyty. Pęknięcia i wykruszenia betonu, zlokalizowane blisko nacięć dylatacyjnych są najczęściej spowodowane przez twarde koła wózków widłowych oraz innych pojazdów transportowych. Powstałe nierówności posadzki prowadzą do szybszego zużycia kół pojazdów transportowych i mniejszego komfortu pracy wózków widłowych. Powodem niszczenia krawędzi dylatacji jest także podnoszenie się naroży płyt, spowodowane zjawiskiem paczenia się (wygięcia) płyt (<ang.> "curling") (gdy wysychanie betonu nie jest jednakowe) oraz niewielkie przemieszczenia betonowych płyt, zwane "klawiszowaniem". Zniszczenie posadzki może być również spowodowane nieprawidłowym ustawieniem (na krawędzi bądź w narożniku naciętej płyty) słupów regałów wysokiego składowania, które zazwyczaj są mocno obciążone. Kolejnym problemem w przypadku posadzek dylatowanych jest utrzymanie czystości powierzchni wokół i w dylatacjach. Niekorzystny wpływ nacięć dylatacyjnych na cechy wytrzymałościowe i wygląd betonowych płyt podkładów/posadzek jest od kilkunastu lat powodem poszukiwania możliwości maksymalnego zwiększenia rozpiętości płyt.

Uzyskanie płyty wielkopowierzchniowej z betonu bez dylatacyjnych szczelin przeciwskurczowych (pozornych) i termicznych, czyli posadzki bezspoinowej (bez dylatacyjnej, beznacięciowej) jest możliwe przez modyfikację składu betonu, rozumianej przez zastosowanie dodatków i domieszek, np. włókien stalowych jako zbrojenia rozproszonego, superplastyfikatorów, itd., lub zmianę technologii jego wykonania, np. sprężenie betonu za pomocą kabli sprężających, czyli zastosowanie zbrojenia aktywnego betonu, prowadzących do redukcji skurczu betonu. Dylatacje obwodowe i konstrukcyjne muszą być zachowane. Włókna stalowe, charakteryzujące się wysoką wytrzymałością na rozciąganie (powyżej 1000 MPa) i wysokim modułem sprężystości (200 GPa), których zadaniem jest przejście naprężeń rozciągających w kruchym betonie, nie tylko zabezpieczają beton przed zarysowaniem skurczowym, ale także powodują polepszenie właściwości mechanicznych betonu, zwiększając wytrzymałość na rozciąganie, zginanie, wytrzymałość zmęczeniową, odporność na uderzenia, odporność na ścieranie [6, 20, 21]. Sprężenie betonu za pomocą kabli sprężających, poprzez wprowadzenie dodatkowej siły ściskającej do przekroju nie dopuszcza do powstawania rys skurczowych, jak również zamyka rysy powstałe w wyniku chwilowego przeciążenia przekroju.

Korzystne właściwości betonu zbrojonego włóknami stalowymi oraz betonu zbrojonego aktywnie pozwalają na zastosowanie tych materiałów do wykonania bezdylatacyjnych podkładów/posadzek betonowych w wielkopowierzchniowych obiektach różnego przeznaczenia (o powierzchniach niejednokrotnie przekraczających 20000 m<sup>2</sup>): obiektach przemysłowych (halach produkcyjnych,



magazynach wysokiego składowania z intensywnym ruchem wózków, itd.), obiektach sportowych i użyteczności publicznej (np. galeriach handlowych), itd. Płyty fibrobetonowe oraz sprężone spełniają wysokie wymagania dla podłóg przemysłowych odnośnie do płaskości powierzchni, dużej wytrzymałości statycznej i odporności na obciążenia dynamiczne (głównie typu udarowego).

Współcześnie płyty bezdylatacyjne z fibrobetonu wykonuje się o powierzchniach do 2500 m<sup>2</sup> (50m x 50m) (Rys. 2) [20, 21, 22], a płyty betonowe sprężane nie wymagają żadnych nacięć dylatacyjnych nawet na powierzchniach do 10000 m<sup>2</sup> [9]. Kilka lat temu powierzchnie monolitycznych płyt bezdylatacyjnych były znacznie mniejsze [17].

Wymagania dla podłóg przemysłowych dotyczące małej ścieralności, odpowiedniej szorstkości, odporności na chemikalia i duże gradienty temperatury powinna zapewnić posadzka, czyli ostatnia, wierzchnia warstwa podłogi, wykonywana na podkładzie (por. Rys. 1). Współcześnie do najczęściej stosowanych rodzajów posadzek przemysłowych należą: posadzka utworzona w górnej warstwie podkładu betonowego przez utwardzanie powierzchniowe betonu za pomocą posypki (produktu handlowego na bazie cementu, wypełniaczy syntetycznych, domieszek i pigmentów), czyli posadzka otrzymywana metodą DST (<ang.> Dry Shake Topping) [1, 2] oraz bezdylatacyjna posadzka żywiczna, złożona z kilku warstw żywic syntetycznych, o składzie projektowanym ze względu na wymagane właściwości posadzki, np. o dużej elastyczności i wytrzymałości, dużej odporności chemicznej, zdolności odprowadzania ładunków elektrostatycznych [15].

W artykule przedstawiono nowoczesne rozwiązania materiałowo-technologiczne stosowane przy wykonywaniu podłóg przemysłowych. Zaprezentowano bezdylatacyjne podkłady (fibrobetonowe /zbrojone włóknami stalowymi/ lub z betonu sprężonego /zbrojone aktywnie/) oraz posadzki (otrzymywane przez powierzchniowe utwardzanie podkładów betonowych oraz żywiczne warstwowe), które najczęściej wchodzi w skład podłóg przemysłowych realizowanych współcześnie.

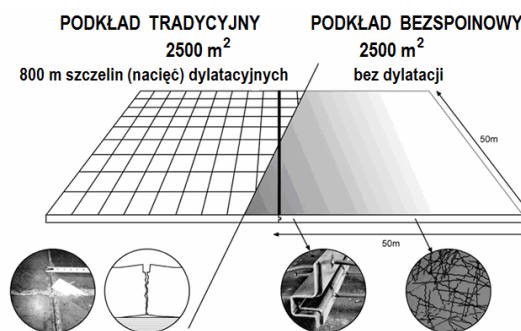
## **2. Podkłady betonowe bezspoinowe**

### **2.1. Podkłady podłogowe fibrobetonowe**

W celu redukcji skurczu w płycie betonowej (podkładzie) i nie dopuszczenia do tworzenia się rys oraz pęknięć można wykonać szczeliny dylatacyjne. Współcześnie, dla uniknięcia cięć dylatacyjnych w powierzchni płyty betonowej, stosowany jest beton z dodatkiem włókien stalowych, których zadaniem jest przejęcie naprężeń rozciągających w kruchym materiale. Jeżeli ilość dodanych włókien jest niewielka, efekt ograniczenia skurczu jest mały, bowiem większość zaczynu kurczy się swobodnie [12]. Włókna stalowe stosowane są jako dodatek do betonu nie tylko ze względu na zdolność do zabezpieczenia

betonu przed zarysowaniem skurczowym (co mogą zapewnić włókna polimerowe, np. włókna polipropylenowe [1]), ale także ze względu na możliwość poprawienia właściwości mechanicznych betonu. Włókna stalowe, charakteryzujące się wysoką wytrzymałością na rozciąganie (powyżej 1000 MPa) i wysokim modułem sprężystości (200 GPa) zwiększają wytrzymałość na rozciąganie, zginanie, wytrzymałość zmęczeniową, odporność na uderzenia, odporność na ścieranie [6, 20, 21]. Czasami jako uzbrojenie włókniste płyty stosowane są włókna hybrydowe, czyli włókna różnych rodzajów (najczęściej włókna stalowe wraz z polipropylenowymi) [6].

Włókna dozowane są do betonu w zależności od obciążeń oraz wielkości pola roboczego. Typowa ilość dodawanych włókien stalowych wynosi od  $25\text{kg/m}^2$  do  $50\text{kg/m}^2$  [6, 12, 20, 21]. Wymiary pola roboczego zależą od rozstawu słupów, kształtu posadzki, możliwości ułożenia pola roboczego w ciągu jednego dnia (nieprzerwanego dostarczenia mieszanki betonowej przez wytwórcę), itd. Wielkość powierzchni pola roboczego (wykonania płyty bez potrzeby nacinania szczelin przeciwskurczowych) niejednokrotnie w obecnych realizacjach wynosi  $2500\text{m}^2$  ( $50\text{m} \times 50\text{m}$ ) (Rys. 2) [6, 20, 22].



Rys. 2. Podkład ze szczelinami dylatacyjnymi i bezspoinowy [22]

Fig. 2. Screed with joints and jointless [22]

Ponieważ kształt włókien powinien zapewnić dobre zakotwienie włókien w matrycy cementowej, to najczęściej stosowane są włókna zakończone haczykami [6, 12, 16]. Włókna stalowe często charakteryzują się także wysoką smukłością (stosunkiem długości włókna do jego średnicy), wynoszącą minimum 65, która gwarantuje "zszycie" różnej wielkości pęknięć przez włókna. Aby umożliwić równomierne rozmieszczenie włókien w mieszance betonowej i nie dopuścić do powstania "jeży" (zbitych skupisk włókien), włókna (produkowane przez niektórych producentów) klejone są w pasma klejem rozpuszczalnym w wodzie [20].

Beton stosowany do wykonania płyty fibrobetonowej jest betonem towarowym, o klasie co najmniej C25/30. Współczynnik w/c powinien być nie

wiekszy od 0,5, a ilość cementu 300–360 kg/m<sup>3</sup> [10, 16, 21]. Konieczne jest także zastosowanie superplastyfikatora, aby zapewnić odpowiednią konsystencję mieszanki betonowej zawierającej włókna stalowe, pogarszające urabialność.

Podkład podłogowy betonowy bezspoinowy powinien być wykonany jako podkład pływający, czyli mający możliwość swobodnego przesuwu po podłożu (płyta nie może być przytwierdzona do ścian, kolumn, fundamentów) [7, 12, 21]. Dla zapewnienia poślizgu płyty należy ułożyć na podłożu dwie warstwy folii budowlanej o grubości co najmniej 0,2 mm [14, 16]. Grubość płyty powinna wynosić co najmniej 180 mm, nawet jeśli z obliczeń statycznych otrzymywana jest wartość mniejsza. Grubość ta wynika z wymagań dotyczących sztywności płyty, tj. stosunku jej grubości do wymiarów pola roboczego. Brak sztywności płyty powoduje podnoszenie się naroży pola, co w konsekwencji prowadzi do ich spękań. W miejscach, gdzie płyta ma tendencje do pęknięcia (np. w narożach, wokół słupów) należy dobroić ją dodatkowo siatkami lub/i prętami stalowymi [21]. Poprawne wykonanie płyty jest szczególnie istotne. Niedopuszczalne są przerwy w dostawie mieszanki betonowej, niedostateczna jakość betonu i włókien oraz brak pielęgnacji betonu (koniecznej z uwagi na jego skurcz), ponieważ wtedy posadzka może zdylatować się sama.

## 2.2. Podkłady podłogowe betonowe zbrojone aktywnie (sprężone)

Jedną z metod uzyskania bezdylatacyjnej posadzki betonowej jest wykorzystanie technologii betonu sprężonego [9]. W odróżnieniu od zbrojenia włóknami stalowymi lub siatkami, które zapobiega powstawaniu rys oraz ogranicza ich rozwarcie, sprężenie, poprzez wprowadzenie dodatkowej siły ściskającej do przekroju, nie tylko nie dopuszcza do powstawania rys skurczowych, ale także zamyka rysy powstałe w wyniku chwilowego przeciążenia przekroju. Dzięki zastosowaniu warstwy poślizgowej pomiędzy podłożem a podkładem oraz wstępnego sprężenia skurcz betonu nie jest tak istotnym zagadnieniem, jak w płytach zbrojonych tradycyjnie.

Wstępne sprężanie należy wykonać w momencie uzyskania przez beton wytrzymałości na ściskanie 8–10 MPa, a sprężanie ostateczne (drugi naciąg kabli sprężających), gdy beton posiada wytrzymałość na ściskanie minimum 30 MPa (sploty kabli naciągane są do docelowej siły sprężającej, pozwalającej na uzyskanie przez płytę projektowanej wytrzymałości) [9].

Metody projektowania oraz zasadnicze etapy wykonania bezdylatacyjnych posadzek zbrojonych aktywnie są analogiczne do prac prowadzonych w przypadku posadzek zbrojonych tradycyjnie.

Płyty betonowe sprężane nie wymagają żadnych nacięć dylatacyjnych (nawet na powierzchniach do 10000 m<sup>2</sup> [9]), co efektywnie skraca ostatnią fazę prac. Maksymalną powierzchnię wykonania podkładu sprężonego zazwyczaj ograniczają możliwości ciągłego układania mieszanki przez wykonawcę oraz

realizacji koniecznych dylatacji, wynikających z funkcji budynku lub przyjętego harmonogramu prac. Rozmieszczenie tych dylatacji jest zawsze poprzedzone analizą wielkości skurczu końcowego.

Płyty betonowe sprężane mają większą wytrzymałość na rozciąganie oraz są w stanie przetrwać bez zarysowania większe obciążenia skupione w stosunku do płyt zbrojonych konwencjonalnie, co daje możliwość optymalizacji grubości płyty. Ponadto są one szczelniejsze, odporniejsze na ścieranie oraz lepiej pracują przy przenoszeniu cyklicznych obciążeń przemysłowych [9].

### **3. Posadzki bezspoinowe**

#### **3.1. Posadzki otrzymywane przez powierzchniowe utwardzanie podkładów betonowych**

Do wykonania warstwy posadzkowej w górnej warstwie betonowego podkładu stosowane są następujące metody: utwardzanie powierzchni w fazie wiązania betonu przez stosowanie preparatów proszkowych lub ciekłych, impregnacja lub utwardzanie powierzchniowe stwardniałego betonu, itd.

Metodą najczęściej wykorzystywaną jest metoda utwardzania powierzchniowego w fazie wiązania betonu – DST (Dry Shake Topping) [1, 2, 10, 11]. W metodzie DST warstwa utwardzona, stanowiąca posadzkę powinna być związana z betonem podkładu i przylegać do podkładu całą powierzchnią. Do utworzenia takiej warstwy stosuje się suche posypki (utwardzacze powierzchniowe) dozowane w ilościach około 4–5 kg/m<sup>2</sup> lub większych, w zależności od zaleceń producenta i wymagań technicznych dla posadzki (stawianych w projekcie). Posypki te są zazwyczaj gotowymi do użycia mieszankami na bazie cementu, wypełniaczy syntetycznych, domieszek i pigmentów, o składzie zapewniającym odpowiednią urabialność i odporność mechaniczną, które po naniesieniu wnikają kilka milimetrów w powierzchnię betonu, wchodząc także w reakcję ze składnikami cementu. W trakcie zacierania i wygładzania mechanicznego dochodzi do utworzenia powierzchni o dużej twardości i odporności na ścieranie. Dodatkowymi zaletami tego procesu jest zmniejszenie nasiąkliwości posadzki, wyeliminowanie pylenia oraz łatwość utrzymania czystości [1, 2].

#### **3.2. Posadzki żywiczne wielowarstwowe**

Współcześnie stosowane bezdylatacyjne posadzki żywiczne są wielowarstwowymi systemami. Różnorodność wymagań stawianych posadzkom żywicznym oraz zmienność właściwości żywic powodują, że posadzka składa się nie z jednej, ale kilku warstw. Wykorzystując najlepsze cechy różnych rodzajów żywic syntetycznych uzyskuje się posadzki o wymaganych właściwościach, np. elastyczne o dużej wytrzymałości, odprowadzające ładunki elektrostatyczne, o dużej odporności chemicznej. Właściwości użytkowe posadzek zależą od

właściwości spoiw (żywic syntetycznych), rodzaju oraz zawartości dodatków (wypełniacza mineralnego, pigmentu, itd.).

Jako spoiwo używane są żywice epoksydowe (EP), poliuretanowe (PU), akrylowe (AC), polimetakrylan metylu (PMM) (Tab. 1) [1, 3].

Najczęściej stosowanymi posadzkami żywicznymi są posadzki na bazie żywic epoksydowych i poliuretanowych. Wykonanie posadzek bezspoinowych z tych materiałów jest możliwe, ponieważ wysokowypełnione kruszywem żywice epoksydowe oraz poliuretanowe charakteryzują się małym skurczem utwardzania oraz niewielkim współczynnikiem rozszerzalności cieplnej (skurcz liniowy w przypadku żywic epoksydowych: 0,2–0,4%, żywic poliuretanowych: 0,2–0,3%; dla porównania: w przypadku metakrylanu metylu: 2–3% [14]). Ponadto zarówno żywice epoksydowe, jak i poliuretanowe posiadają inne korzystne cechy użytkowe: wysoką odporność mechaniczną oraz chemiczną.

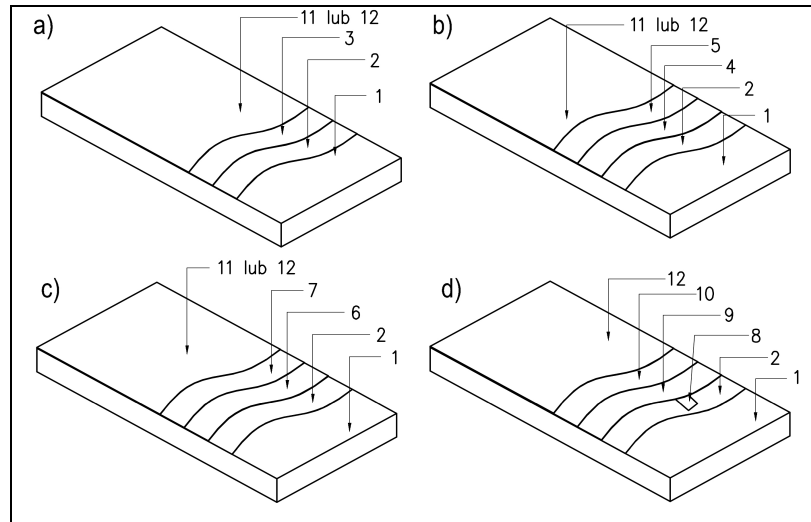
Ale oprócz podobieństw, występują także różnice we właściwościach żywic. Żywice epoksydowe tworzą powłoki sztywne, natomiast żywice poliuretanowe dają możliwość uzyskania posadzek elastycznych, o zdolności mostkowania rys podłoża. Żywice epoksydowe, w porównaniu do żywic poliuretanowych, charakteryzują się większą odpornością na ścieranie, a także mniejszą wrażliwością na wilgotność resztkową podłoża i wilgotność powietrza podczas wykonywania powłoki. Natomiast pozytywnymi cechami żywic poliuretanowych jest duża odporność na uderzenia (nawet w niskich temperaturach) oraz na starzenie (są niewrażliwe na promieniowanie UV) [1]. Wykorzystując najlepsze właściwości każdej z żywic tworzone są systemy wielowarstwowych posadzek bezspoinowych. Sztywne i kruche żywice epoksydowe są uelastyczniane żywicami poliuretanowymi, tworząc materiały epoksydowo-poliuretanowe.

Typ i grubość posadzki dobiera się ze względu na wielkość i rodzaj obciążeń oraz inne wymagane cechy (np. chemoodporność). Grubość posadzek żywicznych nie powinna być mniejsza od 2,5mm, ponieważ w przypadku cienkich posadzek zarysowania i szczeliny dylatacyjne podkładu mogą być widoczne na powierzchni posadzki, powodując obniżenie jej estetyki.

Tabela 1. Klasyfikacja posadzek żywicznych na podstawie zaleceń FeRFA (The Resin Floor Association) i BS 8204-6, na podstawie [1], [3]

Table 1. Classification of resin floors based on the recommendation of FeRFA (The Resin Floor Association) and BS 8204-6, based on [1], [3]

Grubość	Rodzaj posadzki / charakterystyka	Żywica	Użytkowanie / zakres temperatur
< 0,15 mm	impregnująca/ uszczelniająca; rozpuszczalnikowa lub emulsja wodna	PU, EP, AC	poprawa czystości powierzchni betonowej w wyniku uszczelnienia, przeciwdziałanie pyleniu betonu; częste przemaalowywanie, możliwa śliskość powierzchni / do 40°C
0,15–0,3 mm	cienkopowłokowa/ 1÷2 warstwowa, bezrozpuszczalnikowa, ale również w wersji rozpuszczalnikowej i wodnej	PU, EP, AC	uszczelnienie i łatwość utrzymania powierzchni w czystości; śliskość gładkiej powierzchni, którą można zredukować przez zmatowienie lub posypkę kwarcową; nieodczuwalna poprawa odporności na uderzenia; zastosowanie: obiekty handlowe, przemysł lekki / do 40°C
0,3–1 mm	powłokowa/ 1÷2 warstwowa, w zasadzie bezrozpuszczalnikowa	PU, EP, PMM	gładka, szczelna powierzchnia, łatwo zmywalna; śliskość powierzchni, którą można zredukować przez zmatowienie lub posypkę kwarcową; dostępne wersje antyelektrostatyczne; zastosowanie: laboratoria, magazyny, miejsca użyteczności publicznej / od -5 do 40°C
> 2 mm	wielowarstwowa/ malowana lub wylewana; warstwy z posypkami z kruszyw między warstwami żywicy	PU, EP, PMM	łatwość utrzymania w czystości zależna od tekstury powierzchni; dostępne wersje antyelektrostatyczne, antypoślizgowe; ograniczenia w stosowaniu w warunkach stałego zawilgocenia; dobra odporność na ścieranie, obciążenia udarowe i krótkotrwałe zanieczyszczenia chemikaliami / od -5 do 40°C
2–3 mm	wylewana/ samopozjomująca, o gładkiej powierzchni	PU, EP, PMM	możliwość zachowania wysokich standardów czystości; śliskość powierzchni, którą można zredukować przez zmatowienie lub posypkę kwarcową; dostępne wersje antyelektrostatyczne; bardzo dobra odporność na chemikalia i obciążenia udarowe / od -5 do 40°C
> 4 mm	wysokowypełniona zacierana/ o wysokim stopniu wypełnienia kruszywem, często powierzchniuowo doszczelniana, aby zmniejszyć porowatość	PU, EP	łatwość utrzymania w czystości, gdy powierzchnia jest doszczelniona żywicą; średnia lub dobra odporność na poślizg; dostępne w wersji antyelektrostatycznej; zastosowanie: hale produkcyjne, warsztaty o suchym procesie produkcyjnym / od 0 do 40°C
4–6 mm	wysokowypełniona o wysokiej wytrzymałości/ samorozlewna z gładką powierzchnią	PU, EP, PMM	duża łatwość utrzymania powierzchni w czystości; śliskość gładkiej powierzchni, którą można zredukować przez zmatowienie lub posypkę kwarcową; dostępne w wersji antyelektrostatycznej; bardzo dobra odporność na uderzenia i chemikalia / od -10 do 60°C
> 6 mm	wysokowypełniona o wysokiej wytrzymałości, zacierana/ o podwyższonej szczelności i odporności ze względu na większą grubość	PU, EP	bardzo dobra odporność mechaniczna i chemiczna; bardzo duża łatwość utrzymania powierzchni w czystości, zalecane w obiektach przemysłu chemicznego i spożywczego; dostępne w wersji antyelektrostatycznej; z możliwością czyszczenia przegrzaną parą wodną i podwyższonym w porównaniu do podanego zakresem temperatur użytkowania (zależnie od grubości) / 6mm: od -20 do 70°C; 9mm: od -20 do 100°C



Rys. 3. Posadzki żywiczne - przykłady uwarstwień: (a) posadzka ze sztywnych żywic epoksydowych, (b) elastyczna posadzka poliuretanowa przekrywająca rysy, (c) posadzka o dużej odporności chemicznej, (d) posadzka odprowadzająca ładunki elektostatyczne; (1) podłoże, (2) warstwa gruntująca (pozostałe oznaczenia w tekście).

Fig. 3. Resin floors - the examples of layering: (a) floor of the rigid epoxy resins, (b) flexible polyurethane floor covering cracks, (c) floor with high chemical resistance, (d) electrostatically discharging floor; (1) support, (2) primer (other symbols in the text).

Przykłady bezspoinowych wielowarstwowych posadzek żywicznych (przedstawione poniżej) zilustrowano na Rys. 3:

a) posadzki ze sztywnych żywic epoksydowych (Rys. 3a):

- warstwa samorozlewnej żywicy epoksydowej gr. 2–3 mm (3),
- warstwa wykończeniowa (zamykająca) wykonana z żywicy syntetycznej, np. z dodatkiem pigmentu w celu podniesienia walorów estetycznych (11)

b) elastyczne posadzki poliuretanowe przekrywające rysy (Rys. 3b):

- warstwa membrany z elastycznej żywicy poliuretanowej grubości ok. 1,5 mm (4),
- warstwa ze sztywniejszej żywicy poliuretanowej lub epoksydowej grubości 1,5–2 mm (5)

c) posadzki o dużej odporności chemicznej (Rys. 3c):

- warstwa membrany z żywicy poliuretanowo-epoksydowej bądź poliuretanowej grubości ok. 1,5 mm (6),
- sztywna warstwa żywicy epoksydowej grubości 1,5–2 mm o dużej odporności chemicznej (7)

d) posadzki odprowadzające ładunki elektostatyczne (Rys. 3d)

- samoprzylepna taśma miedziana (8),
- warstwa żywicy przewodzącej (9),

- wierzchnia warstwa żywicy (np. epoksydowej z zawartością włókien węglowych) o odpowiedniej grubości, pozwalającej na uzyskanie oporności posadzki  $R < 106 \text{ Ohm}$  (10),
- warstwa antypoślizgowa (12).

Antypoślizgowość warstwy wykończeniowej można uzyskać poprzez wykonanie posypki (z piasku kwarcowego lub korundowego o uziarnieniu 0,6-1,2mm) na świeżo wylaną żywicę. Po związaniu i usunięciu nadmiaru piasku wymagane jest nałożenie jeszcze jednej warstwy żywicznej zamykającej (np. poliuretanowej, odpornej na promieniowanie UV).

W przypadku antypoślizgowych posadzek odprowadzających ładunki elektrostatyczne piasek oraz żywica użyta do warstwy zamykającej powinny przewodzić ładunki elektrostatyczne.

Szczelność bezspoinowych posadzek żywicznych wynika nie tylko z braku szczelin dylatacyjnych, ale także z wannowego wykończenia przyściennego.

Aby zachować trwałość posadzki żywicznej, wymagane jest prawidłowe wykonanie podkładu. Niewłaściwie przygotowany podkład, na którym układana jest posadzka jest powodem wielu uszkodzeń posadzek żywicznych, a w szczególności pęcherzy, odspojień, wytarć i zarysowań. Wymagania dla najczęściej stosowanego podkładu - podkładu betonowego dotyczą wilgotności (maksimum 4% masowo), wytrzymałości na ściskanie (minimum 25MPa), wytrzymałości na odrywanie mierzonej metodą „pull-off” (powyżej 1,5MPa), czystości (braku luźnych frakcji, mlecza cementowego), odpowiedniej chropowatości powierzchni [16]. W przypadku dylatowanego podkładu dylatacje skurczowe powinny być wypełnione kitem uszczelniającym (np. na bazie żywicy poliuretanowej), aby uzyskać równą powierzchnię, wolną od szczelin i rys.

#### 4. Podsumowanie

W ostatnich latach zastosowanie podłóg (posadzek) bezspoinowych staje się coraz powszechniejsze w wielu krajach europejskich (także w Polsce). Posadzki bezspoinowe zalecane są w przypadku, gdy występują wysokie wymagania dotyczące płaskości powierzchni posadzki, przenoszenia dużych obciążeń statycznych (np. regałami), jak i ruchem.

Ponieważ przy wyborze technologii wykonania podłogi należy brać pod uwagę użyteczność, koszty wykonania i utrzymania, a także okres użytkowania, to wybór podłogi (podkładu/posadzki) betonowej beznacięciowej jest korzystniejszy niż dylatowanej ze względu na następujące zalety podłogi bez dylatacji:

- brak pęknięć i pacywania płyt oraz uszkodzeń w rejonie krawędzi spoiny dylatacyjnej, a przez to większa trwałość posadzki oraz obniżenie kosztów utrzymania obiektu,
- brak uszkodzeń wózków widłowych, występujących w przypadku złego stanu technicznego posadzki (spowodowanego np. nierównościami blisko krawędzi



- nacięć dylatacyjnych), a przez to obniżenie kosztów eksploatacji sprzętu,
- możliwość uzyskania łatwej w utrzymaniu czystości (ze względu na brak dylatacji), płaskiej i estetycznej powierzchni,
  - większa swoboda w zagospodarowaniu powierzchni (np. w ułożeniu regałów w magazynach wysokiego składowania).

Dzięki tym cechom bezdylatacyjne podkłady/posadzki betonowe znajdują szerokie zastosowanie w obiektach przemysłowych (halach produkcyjnych, magazynach wysokiego składowania z intensywnym ruchem wózków, itd.), obiektach sportowych i użyteczności publicznej (np. galeriach handlowych), itd. Podkłady betonowe bezdylatacyjne wykonywane są najczęściej jako płyty fibrobetonowe z włóknami stalowymi lub płyty z betonu sprężonego (zbrojone aktywnie), choć także, ze względu na niższe koszty, jako płyty zbrojone tradycyjnie, bądź w sposób mieszany (np. włóknami i siatkami). Płyty zbrojone aktywnie są rozpowszechnione w Niemczech, Francji, Holandii [9].

Posadzkę w przypadku podkładów betonowych bezdylatacyjnych stanowi zazwyczaj albo wielowarstwowa posadzka żywiczna bezdylatacyjna, albo warstwa powstała w górnej części podkładu betonowego przez utwardzanie powierzchniowe betonu za pomocą posypki. Posadzki żywiczne są chętnie stosowane, ponieważ oprócz wysokiej odporności mechanicznej i chemicznej zapewniają także możliwość indywidualnego doboru kolorystyki oraz utrzymania wysokich standardów czystości. Posadzki o grubości powyżej 4mm (o szerokim zakresie temperatury użytkowania (patrz Tab. 1)) znajdują zastosowanie w halach i magazynach, w których występują średnie i duże obciążenia, w przemyśle spożywczym i chemicznym oraz w miejscach, gdzie wymagane jest czyszczenie powierzchni przegrzaną parą wodną lub zabezpieczenie przed przedostaniem się substancji szkodliwych do środowiska zewnętrznego. Posadzki antypoślizgowe, elektrostatyczne wykonywane są w obiektach użyteczności publicznej i służby zdrowia, laboratoriach oraz miejscach zagrożonych wybuchem.

Mimo, że wykonywanie podkładów i posadzek bez nacięć dylatacyjnych nie jest nowym rozwiązaniem i stosowane jest już od kilkunastu lat [6, 9, 11, 12, 16, 17], to wciąż nowe możliwości materiałowe (nowej generacji włókna do betonu oraz produkty chemii budowlanej, np. żywice syntetyczne, superplastyfikatory) i technologiczne pozwalają na ciągłą modyfikację rozwiązań podłogowych w obiektach przemysłowych.

## Literatura

- [1] Chmielewska B.: Rozwiązania materiałowo-technologiczne posadzek przemysłowych, I Seminarium Naukowo-Techniczne "Podłogi Przemysłowe", Warszawa, 25.10.2007, s. 58–63.
- [2] Chmielewska B., Adamczewski G.: Wady i naprawy posadzek przemysłowych utwardzanych powierzchniowo, XXVI Konferencja Naukowo-Techniczna "Awarie Budowlane 2013", Szczecin-Międzyzdroje, 21–24.05.2013, s. 777–786.

- [3] Chmielewska B., Czarnecki L.: Wymagania norm dotyczące posadzek przemysłowych, *Materiały Budowlane*, nr 2, 2012, s. 5–9.
- [4] Czarnecki L.: Posadzki przemysłowe – temat stale aktualny, *Materiały Budowlane*, nr 9, 2008, s. 2–4.
- [5] Czarnecki L.: Uszkodzenia i naprawy posadzek przemysłowych, *Materiały Budowlane*, nr 9, 2008, s. 20–27.
- [6] Glinicki M.A., Chibowski T.: Fibrobetonowe posadzki bezspoinowe – obliczanie i przykłady realizacji, II Seminarium Naukowo-Techniczne "Podłogi Przemysłowe", Warszawa, 6.10.2009, s. 41–48.
- [7] Grzegorek T.: Przygotowanie podłoża pod posadzki, *Materiały Budowlane*, nr 9, 2008, s. 45, 114.
- [8] Kiernożycki W., Lipski M.: Przerwy dylatacyjne w konstrukcjach żelbetowych, *Przegląd Budowlany*, nr 12, 2006, s. 33–44.
- [9] Masłowski D.: Aktywnie zbrojone, bezdylatacyjne posadzki betonowe, I Seminarium Naukowo-Techniczne "Podłogi Przemysłowe", Warszawa, 25.10.2007, s. 91–94.
- [10] Nowacki A.: Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych – Roboty wykończeniowe – Posadzki betonowe utwardzone powierzchniowo preparatami proskowymi, Część B, Zeszyt 8 (Instrukcja ITB nr 433/2010), Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2010.
- [11] Pająk Z.: Kształtowanie i konstrukcja współczesnych betonowych posadzek przemysłowych, III Konferencja Naukowa "Problemy Współczesnej Architektury i Budownictwa" ("ARCHBUD"), Zakopane, 7–10.09.2010, Oficyna Wydawnicza Wyższej Szkoły Ekologii i Zarządzania, Warszawa, s. 225–236.
- [12] Pepin R., Leinen R., Przybysz W., Nell W.: Doświadczenia w planowaniu i projektowaniu podłóg bezspoinowych metodą TAB-Floor, III Seminarium Naukowo-Techniczne "Podłogi Przemysłowe", Warszawa, 7.11.2011, s. 44–54.
- [13] Sokalska A., Ściślewski Z., Suchan M.: Warunki Techniczne Wykonania i Odbioru Robót Budowlanych – Roboty wykończeniowe – Posadzki mineralne i żywiczne, Część B, Zeszyt 3, Instytut Techniki Budowlanej, Warszawa, 2012.
- [14] Wołski Z.: Parkieciarz – Podstawy wiedzy i praktyki zawodowej, Stowarzyszenie "Parkieciarze Polscy", Warszawa, 2007.
- [15] Zając G.: Nowoczesne posadzki żywiczne, *Builder*, nr 10, 2010.
- [16] Zając G.: Podkłady betonowe pod bezspoinowe posadzki żywiczne w halach przemysłowych, *Nowoczesne Hale*, nr 2, 2010, s. 31–32, 34.
- [17] Betonowe posadzki bezspoinowe zbrojone włóknem stalowym Dramix, *Materiały Budowlane*, nr 9, 2000, s. 52–53.
- [18] PN-EN 13318:2002 Podkłady betonowe oraz materiały do ich wykonania – Terminologia.
- [19] PN-EN 13813:2003 Podkłady betonowe oraz materiały do ich wykonania – Materiały – Właściwości i wymagania.
- [20] <http://www.bekaert.com> [dostęp: 5 maja 2014r.].
- [21] <http://www.constructalia.com> [dostęp: 5 maja 2014r.].
- [22] <http://warehousenews.co.uk/2013/02/twintec-jointless-flooring-specialists-at-imhx/> [dostęp: 5 maja 2014r.].

## MODERN MATERIALS AND TECHNOLOGIES FOR INDUSTRIAL FLOOR CONSTRUCTION

### Summary

Modern material and technological solutions that allow to construct jointless (seamless) industrial floors are presented in the paper. The traditional method of concrete subfloors implementation requires the application of dense grid of joint cuts, being the protection against cracking of a concrete slab, resulting from the shrinkage of concrete, temperature changes, etc. The negative effects of joint cuts on the strength and functional properties of a concrete screed slab have led to search for jointless solutions. The reduction of the shrinkage of concrete, and thus the opportunity to resign from joint cuts have been achieved by the application of the addition of steel fibres to the concrete matrix, taking over the tensile stresses or by the compression of concrete by prestressing cables, that prevents the formation of shrinkage cracks by the insertion of an additional compressive force into the section. The use of steel fibers as a distributed reinforcement, as well as the prestressing of concrete as an active reinforcement not only allows to protect a screed against cracking, but it also results in the improvement of the mechanical properties of concrete, increasing tensile strength, flexural fatigue strength, impact resistance and resistance to abrasion.

Two types of jointless screeds: fibre reinforced concrete and prestressed concrete ones are characterized in the paper. The most commonly used technologies and materials for the jointless floors on concrete screeds: DST method (Dry Shake Topping) – by the surface hardening of the top layer of setting concrete with dry chippings and by the application of low shrinkage synthetic resins are presented.

The information concerning current trends of the application of jointless industrial floors and screeds is also included in the paper.

**Keywords:** jointless screed, jointless floor, fibre reinforced concrete screed, actively reinforced screed, resin floor, steel fibres, synthetic resins.

DOI:10.7862/rb.2014.115

*Przesłano do redakcji: 02.12.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 22.12.2014 r.*

Izabela SKRZYPCZAK<sup>1</sup>  
 Lidia BUDA-OŻÓG<sup>2</sup>  
 Marta SŁOWIK<sup>3</sup>

## PROJEKTOWANIE ELEMENTÓW ŻELBETOWYCH Z ZAŁOŻONĄ NIEZAWODNOŚCIĄ

Wartości docelowych poziomów niezawodności zalecane w różnych normatywach krajowych i zagranicznych nie są spójne i mogą prowadzić do różnej oceny niezawodności, bezpieczeństwa konstrukcji czy określenia prawdopodobieństwa zniszczenia. W artykule zestawiono zalecane docelowe wartości wskaźników niezawodności według różnych normatywów i zaleceń normowych, które odniesiono do poziomu niezawodności projektowanych elementów żelbetowych według podejścia probabilistycznego. Zalecane wartości wskaźników niezawodności są zazwyczaj podawane w przypadku dwóch okresów odniesienia: 1 roku oraz 50 lat (zgodnie z PN-EN 1990 czy z MC 2010) lub z uwzględnieniem zależności między docelowym poziomem niezawodności a konsekwencjami zniszczenia i kosztami zapewnienia bezpieczeństwa (zgodnie z ISO 2394 oraz zaleceniami JCSS). Prezentowane zalecenia normowe proponują różne wartości docelowego poziomu niezawodności. Wybór docelowego poziomu niezawodności to uwzględnienie możliwych skutków awarii w zakresie ryzyka dla życia lub uszkodzenia ciała, potencjalnych strat ekonomicznych, ekologicznych czy stopnia niedogodności społecznych. Wybór docelowego poziomu niezawodności uzależniony jest też od uwzględnienia kosztów i nakładów w celu zapewnienia wymaganego poziomu niezawodności i zmniejszenia ryzyka zagrożenia. Przedmiotem analiz był żelbetowy słup ściskany, przyjęty jako wewnętrzny element wydzielony, usztywniony za pośrednictwem belki wieloprzęsłowej. Ze względu na duże różnice w wynikach przeprowadzonych rozważań, zwrócono szczególną uwagę na zróżnicowanie poziomu niezawodności konstrukcji, szczególnie dla konstrukcji, które mają być zrealizowane z betonu o niejednorodności większej niż 4 MPa.

**Słowa kluczowe:** beton, wskaźnik niezawodność, odchylenie standardowe, konstrukcje żelbetowe

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Izabela Skrzypczak, Politechnika Rzeszowska, ul. Poznańska 2, izas@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Lidia Buda-Ożóg, Politechnika Rzeszowska, ul. Poznańska 2, lida@prz.edu.pl

<sup>3</sup> Marta Słowik, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40, m.slowik@pollub.pl

## 1. Wprowadzenie

Docelowe poziomy niezawodności zalecane w różnych dokumentach krajowych i międzynarodowymi są niespójne w zakresie zalecanych wartości i kryteriów, według których odpowiednie wartości mają być przyjmowane. Optymalne poziomy niezawodności można uzależnić zarówno od kosztów konstrukcji i przewidywanych kosztów usunięcia awarii oraz okresu odniesienia czy projektowanego okresu użytkowania. Projektowany okres użytkowania to przyjęty w projekcie przedział czasu, w którym konstrukcja lub jej część ma być użytkowana zgodnie z zamierzonym przeznaczeniem i przewidywanym utrzymaniem bez potrzeby większych napraw.

Wartości zalecanych okresów użytkowania ( 10 do 100 lat dla różnych rodzajów konstrukcji) są podane w EN 1990 [1]. Zalecane wartości wskaźników niezawodności podano dla dwóch referencyjnych okresów odniesienia 1 rok i 50 lat (tabela 1), bez wyraźnego rozróżnienia projektowanego okresu użytkowania, który na ogół różni się od rzeczywistego okresu odniesienia. Należy podkreślić, że okres odniesienia to wybrany przedział czasu przyjęty jako podstawa do oceny statystycznej określenia oddziaływań zmiennych w czasie i jeśli to możliwe oddziaływań wyjątkowych. Projektowany okres użytkowania rozumiany jest jako zakładany w projekcie okres czasu, w którym konstrukcja ma być eksploatowana zgodnie z jej przeznaczeniem bez większych napraw. Pojęcie okresu odniesienia jest więc zasadniczo różne od projektowanego okresu użytkowania. W analizach różnica między tymi dwoma pojęciami jest pomijana i traktowana marginalnie.

## 2. Minimalne wartości wskaźników niezawodności według różnych zaleceń normowych

Wartości miar niezawodności powinny być ustalane tak, aby minimalizować zagrożenie życia i zdrowia ludzi przebywających w rozważanym obiekcie i otoczeniu oraz ekonomiczne, społeczne i ekologiczne straty spowodowane zniszczeniem tego obiektu [5].

Wartości miar niezawodności w Eurokodach zostały określone na podstawie praktyki i tradycji budowlanej oraz na podstawie statystycznej analizy wyników badań. Kalibracje współczynników częściowych opiera się na wykorzystaniu metody wskaźnika niezawodności. Zadanie sprowadza się do takiego doboru zestawu współczynników częściowych, aby zachować docelową wartość wskaźnika niezawodności, którą dla stanów granicznych nośności uzależniono od klasy niezawodności konstrukcji i okresu odniesienia (tabela 1) [1].

Tabela 1. Rekomendowane wartości wskaźników niezawodności wg PN-EN 1990

Table 1. Recommended values of reliability index according to PN-EN 1990

Klasy niezawodności	Minimalne wartości wskaźnika niezawodności / prawdopodobieństwa zniszczenia	
	Okres odniesienia 1 rok	Okres odniesienia 50 lat
RC3	5,2 / 9,96E-08	4,3 / 8,54E-06
RC2	4,7 / 1,30E-06	3,8 / 7,23E-05
RC1	4,2 / 1,33E-05	3,3 / 0,00048

Należy zauważyć, że wartości prawdopodobieństwa zniszczenia w przypadku (1 roku i 50 lat), podane w tabeli 1, dla każdej klasy niezawodności odpowiadają tym samym poziomom niezawodności. Praktyczne zastosowanie tych wartości jest jednak znaczące dla określenia bezpieczeństwa i niezawodności konstrukcji i jest uzależnione od rozpatrywanego w okresie odniesienia, który może być związany z dostępnymi informacjami dotyczącymi statystycznego określenia oddziaływań zmiennych i wyjątkowych podstawowych (przyjęte obciążenia np. wiatr, trzęsienie ziemi itp.). Na przykład, biorąc pod uwagę konstrukcję klasy niezawodności RC2 i okres odniesienia 50 lat zalecany minimalny wskaźnik niezawodności to 3,8 i ta wartość może być stosowana pod warunkiem, że probabilistyczne modele zmiennych podstawowych są dostępne dla tego okresu odniesienia. Poziom niezawodności RC2 może być również osiągnięty, gdy okres odniesienia przyjęto dla 1 roku i minimalnej wartości wskaźnika niezawodności 4,7 przy założeniu modeli teoretycznych.

Rekomendowane wartości wskaźników niezawodności wg Model Code 2010 [2] dla projektowanych konstrukcji według stanów granicznych nośności są zbieżne z zaleceniami PN-EN 1990 [1].

Tabela 2. Rekomendowane wartości wskaźników niezawodności wg MC 2010

Table 2. Recommended values of reliability index according to MC2010

Koszty zapewnienia bezpieczeństwa	Wartość wskaźnika niezawodności 1rok / 50 lat
Wysokie	5,1/4,3
Średnie	4,7/3,8
Niskie	4,1/3,1

Wybór docelowego poziomu niezawodności to uwzględnienie możliwych skutków awarii w zakresie ryzyka dla życia lub uszkodzenia ciała, potencjalnych strat ekonomicznych, ekologicznych czy stopnia niedogodności społecznych. Wybór docelowego poziomu niezawodności uwzględnia koszty i nakłady

w celu zapewnienia wymaganego poziomu niezawodności i zmniejszenia ryzyka zagrożenia. Ze względu na duże różnice w wynikach takich rozważań, należy zwrócić należytą uwagę na zróżnicowanie poziomu niezawodności konstrukcji, w zależności czy mają być projektowane czy modernizowane. Należy podkreślić, że wymagania i postulaty zrównoważonego rozwoju (np. recyklingu i ponownego wykorzystania materiałów, zmniejszenia ilości odpadów) mogą być lepiej spełnione w przypadku projektowania nowych konstrukcji.

Bardziej szczegółowe zalecenia dotyczące przyjmowania docelowych wartości wskaźnika niezawodności zawarto w PN ISO 2394 [3] gdzie wartości docelowej niezawodności są odniesione do całego projektowanego okresu użytkowania (bez ograniczeń) i wiążą się nie tylko ze skutkami zniszczenia, ale również z względnymi kosztami środków zabezpieczających (tabela 2).

Tabela 3. Rekomendowane wartości wskaźników niezawodności wg ISO 2394

Table 3. Recommended values of reliability index according to ISO 2394

Koszty zapewnienia bezpieczeństwa	Konsekwencje zniszczenia			
	małe	zauważalne	umiarkowane	duże
Wysokie	0,0	1,5	2,3	3,1
Średnie	1,3	2,3	3,1	3,8
Niskie	2,3	3,1	3,8	4,3

Szczególnie trudnym i ważnym zagadnieniem jest ocena skutków katastrofy konstrukcji, a próby jej wyceny w jednostkach monetarnych budzi wiele kontrowersji. W szczególności dotyczy to oceny wartości życia potencjalnych ofiar katastrofy budowlanej [5, 6].

Podobne wymagania do prezentowanych powyżej znajdują się w zaleceniach JCSS (Joint Committee on Structural Safety) i normie probabilistycznej [4] (tabela 3). Podane docelowe wskaźniki niezawodności związane są zarówno z konsekwencjami jak i ewentualnymi kosztami środków zapewnienia bezpieczeństwa, jednak są one ustalone dla okresu odniesienia 1 rok. Konsekwencje zniszczenia sformułowane w [4] są spójne z zaleceniami zawartymi w EN 1990 [1]). Oznaczane są symbolem  $p$  i zdefiniowane jako stosunek całkowitych kosztów (koszt konstrukcji powiększony o bezpośrednie koszty usunięcia awarii) do kosztów konstrukcji np:

- Klasa 2: Umiarkowane konsekwencje,  $p$  wynosi od 2 do 5 ; w przypadku wystąpienia awarii nastąpi przeciętne zagrożenie życia ludzkiego lub wystąpią znaczne konsekwencje ekonomiczne (np. budynki biurowe, budynki przemysłowe, budynki mieszkalne);
- Klasa 3: Duże konsekwencje:  $p$  wynosi od 5 do 10 ; biorąc pod uwagę awarię zagrożenie dla życia ludzkiego jest wysokie, lub konsekwencje ekonomiczne są znaczące ( np. głównie mosty, teatry, szpitale, budynki wysokie).

Zalecane wartości wskaźników niezawodności w normatywach [3] i [4] są niższe niż podane w EN 1990 [1] oraz MC 2010 [2], nawet dla "małych kosztów względnych" zapewnienia bezpieczeństwa. Należy zauważyć, że w PN-EN 1990 [1] podane są minimalne wartości wskaźników niezawodności dla dwóch okresów odniesienia 1 i 50 lat, które mogą być przyjęte jako wartości wskaźnika niezawodności dla projektowanego okresu użytkowania.

W ISO 2394 [3] zalecane są wartości wskaźników niezawodności, które powiązane są z projektowanym okresem użytkowania projektowania oraz badaniami i analizami probabilistycznymi. W zaleceniach JCSS [4] wartości wskaźnika niezawodności są zależne od okresu odniesienia 1 rok.

Tabela 4. Rekomendowane wartości wskaźników niezawodności wg JCSS (Probabilistic Model Code - Part 1)

Table 4. Recommended values of reliability index according to JCSS (Probabilistic Model Code - Part 1)

Koszty zapewnienia bezpieczeństwa	Konsekwencje zniszczenia		
	małe	zauważalne	duże
Wysokie	3,1	3,3	3,7
Średnie	3,7	4,2	4,4
Niskie	4,2	4,4	4,7

W zaleceniach normowych brak jest jednak wyraźnego rozróżnienia między projektowanym okresem użytkowania i okresem odniesienia dla jednoznacznego przyjęcia docelowego poziomu niezawodności. Powstaje zatem pytanie jaki docelowy wskaźnik niezawodności należy stosować dla projektowanego okresu użytkowania innego niż 50 lat (na przykład 20 lat).

### 3. Przykład obliczeniowy

Przedmiotem analiz jest żelbetowy słup ściskany, przyjęty jako wewnętrzny element wydzielony, usztywniony za pośrednictwem belki wieloprzęsłowej, wysokości  $l = 2,8$  m. Słup obciążony jest podłużną siłą ściskającą pochodzącą od obciążeń stałych i zmiennych, o następujących parametrach:

**Obciążenia stałe:** współczynnik zmienności  $v_g = 5\%$ , obciążenie charakterystyczne -  $P_k = 2222$  kN, obciążenie średnie -  $\bar{P} = g_k/(1+1,645 \times v_g) = 2053$  kN, obciążenie obliczeniowe -  $P_d = 1,35 \times 2222 = 3000$  kN, odchylenie standardowe  $\sigma_p = 102,65$  kN.

**Obciążenia zmienne:** współczynnik zmienności  $v_q = 30\%$ , obciążenie charakterystyczne -  $Q_k = 952$  kN, obciążenie średnie -  $\bar{Q} = q_k/(1+1,645 \times v_q) = 637$  kN, obciążenie obliczeniowe -  $Q_d = 1,5 \times 0,7 \times 952 = 1000$  kN, odchylenie standardowe  $\sigma_Q = 191$  kN/m.



Ciężar własny słupa: współczynnik zmienności  $v_g = 5\%$ ,  $\bar{g} = g_k/(1+1,645 \times v_g) = 23,1 \text{ kN/m}$ ,  $g_k = 25 \text{ kN/m}$ ,  $g_d = 1,35 \times 25 = 33,75 \text{ kN/m}$ ,  $\sigma_g = 1,1 \text{ kN/m}$ .

Wymiar geometryczny: współczynnik zmienności  $v_d = 5\%$ ,  $h = h_m$ ,  $d = d_m$ ,  $b = b_m$ .

Cechy materiałowe:

Stal zbrojeniowa: współczynnik zmienności  $v_y = 8\%$ ,  $f_{ym} = f_{yk}/(1-1,645 \times v_y) = 575 \text{ MPa}$ ,  $f_{yk} = 500 \text{ MPa}$ ,  $f_{yd} = 435 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_y = 46 \text{ MPa}$ .

Beton: C20/25,  $f_{cm} = 28 \text{ MPa}$ ,  $f_{ck} = 20 \text{ MPa}$ ,  $f_{cd} = 14,29 \text{ MPa}$ ,  $\sigma_c = 1,5 \text{ do } 5 \text{ MPa}$

W obliczeniach probabilistycznych posłużono się programem komputerowym Matlab. Z uwagi na smukłość słupa  $\lambda \leq \lambda_{lim}$ , pominięto wpływ efektów II rzędu a zdefiniowana funkcja stanu granicznego Z przyjmuje postać:

$$Z = N - N_d \quad (1)$$

gdzie:  $N_d = Q_{ds} + P_d + Q_d$

$Q_{ds} = b \times h \times l \times g_d$  - siła ściskająca wywołana ciężarem własnym słupa.

$N$  - nośność słupa określona przy założeniu ściskania „technicznie osiowego”.

Wg [7] przy mimośrodku  $e_0 = 0$  wzór na nośność słupa zmierza do wartości brzegowej określonej wzorem:

$$N = 0,98 \times b \times d \times f_{cm} + 2 \times A_s \times f_{ym} \quad (2)$$

Otrzymane wartości wskaźnika niezawodności, zestawiono w tabeli 5.

Tabela 5. Wartość wskaźnika niezawodności  $\beta$  dla słupa żelbetowego

Table 5. Reliability index  $\beta$  for reinforced concrete column

Odchylenie standardowe (MPa)	Wartość wskaźnik niezawodności
1,5	7,61
2	6,83
3	5,49
4	4,48
4,86	3,84
5	3,76

Przyjęta klasa niezawodności zgodnie z PN-EN 1990 to RC2. Przyjęto średnie koszty zapewnienia bezpieczeństwa oraz zauważalne konsekwencje zniszczenia.

Tabela 6. Wartość wskaźnika niezawodności dla słupa ściskanego a spełnienie wymagań dla przyjętych poziomów niezawodności

Table 6. Reliability index  $\beta$  for reinforced concrete column and the requirements for the adopted reliability levels

Odchylenie standardowe [MPa]	C20/25 b=h=50 cm	Spełnienie wymagań dla niezawodności i różnych zaleceń normowych			
		PN-EN 1990 $\beta = 3,8$	MC 2010 $\beta = 3,8$	PN-ISO 2394 $\beta = 2,3$	JCSS-PMC $\beta = 4,2$
1,5	7,61	+	+	+	+
2	6,83	+	+	+	+
3	5,49	+	+	+	+
4	4,48	+	+	+	+
4,86	3,84	+	+	+	-
5	3,76	-	-	+	-

W zależności od funkcji i przeznaczenia budynku czy konstrukcji, konsekwencje jak i koszty zniszczenia mogą być różnie zdefiniowane.

Prezentowane zalecenia normowe proponują różne wartości docelowego poziomu niezawodności. Wybór docelowego poziomu niezawodności uzależniony jest od uwzględnienia kosztów i nakładów w celu zapewnienia wymaganego poziomu niezawodności i zmniejszenia ryzyka zagrożenia. Ze względu na duże różnice w wynikach przeprowadzonych rozważań (Tabela 6), należy zwrócić szczególną uwagę na zróżnicowanie poziomu niezawodności konstrukcji, dla konstrukcji, które mają być zrealizowane z betonu o niejednorodności większej niż 4 MPa.

#### 4. Wnioski

Projektowanie elementów żelbetowych z założoną niezawodnością wiąże się z określeniem klasy niezawodności konstrukcji (tzn. dopuszczalnego prawdopodobieństwa zniszczenia), liczby potencjalnych ofiar i konsekwencji finansowych, społecznych i ekologicznych. Szczególnie trudnym i ważnym zagadnieniem jest ocena skutków katastrofy konstrukcji, a próby jej wyceny w jednostkach monetarnych budzi wiele kontrowersji.

W zaleceniach normowych brak jest wyjaśnienia zależności między projektowanym okresem użytkowania, okresem odniesienia i poziomem niezawodności oraz nie ma wytycznych pozwalających na sprecyzowanie poziomu niezawodności dla przyjętego projektowanego okresu użytkowania innego niż 50 lat.

Metody probabilistyczne umożliwiają praktyczne i efektywne projektowanie i ocenę niezawodności konstrukcji, zwłaszcza, gdy zachowanie konstrukcji jest opisane funkcją nieliniową gdyż wówczas metoda linearyzacji statystycznej może prowadzić do znacznych błędów.

## Literatura

- [1] PN-EN 1990:2004 Eurokod . Podstawy projektowania konstrukcji.
- [2] Model Code 2010, Volume 1, March 2010.
- [3] PN-ISO 2394:kwiecień 2000, Ogólne zasady niezawodności konstrukcji budowlanych.
- [4] Probabilistic Model Code - Part 1, Basis of Design, JCSS, [http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic\\_Model\\_Code.aspx](http://www.jcss.byg.dtu.dk/Publications/Probabilistic_Model_Code.aspx)
- [5] Woliński Sz., Projektowanie elementów z założoną zawadnością, XLVI Krynica-Wrocław 2000, s. 159-166.
- [6] Woliński Sz., Ryzyko w projektowaniu konstrukcji z betonu, ZN PG, LII Krynica-Gdańsk 2000, s. 55-61.
- [7] Pawlikowski J: Podstawy projektowania probabilistycznego konstrukcji z betonu, Prace naukowe ITB, WITB, Warszawa 2004.

## DESIGN OF REINFORCED CONCRETE MEMBERS WITH ASSUMED RELIABILITY

### Summary

The target values of reliability levels recommended in various domestic and foreign standards are not consistent and they may lead to a different assessment of the reliability of structures. The paper summarizes the recommended target values for indicators of reliability according to different standards which refer to the level of reliability of reinforced concrete members according to the probability approach. Recommended values of reliability indicators are usually applied for two reference periods: 1 year and 50 years (in accordance with PN-EN 1990, or MC, 2010) or with regard to the relationship between the target level of reliability, the consequences of the damage and the cost of safety-security (according to ISO 2394 and recommendations JCSS). Presented standard recommendations proposed the different target values of reliability levels. The selection of the target values of reliability levels is connected with taking into account the possible consequences of damage connected with life injury, potential economic losses, as well as the degree of inconvenience. When selecting the target values of reliability levels, the costs and inputs are also taken into account in order to ensure the required values of reliability levels and to reduce the risk. In the performed analysis, a concrete column was considered. The column was defined as the separated, internal element, stiffened by a multi-span continuous beam. Due to the large differences in the obtained results of the analysis, the particular attention has been paid for the diversity of reliability levels for concrete structures, especially when standard deviation of concrete is greater than 4 MPa.

**Keywords:** concrete, reliability index, standard deviation, reinforced concrete structures

DOI:10.7862/rb.2014.116

*Przesłano do redakcji: 26.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 22.12.2014 r.*

**Robert TOMASZEWSKI<sup>1</sup>**  
**Jan M. OLCHOWIK<sup>2</sup>**  
**Jerzy ADAMCZYK<sup>3</sup>**

## **BADANIA NAD EFEKTYWNOŚCIĄ KONWERSJI FOTOWOLTAICZNEJ (PV) DLA WARUNKÓW LUBELSZCZYZNY**

W artykule przedstawiono zagadnienia związane z 10-cio letnią analizą pracy układu słonecznego zainstalowanego w południowo-wschodniej Polsce. Analizie porównawczej poddano układ nadążny i stacjonarny z wykorzystaniem chłodzenia modułów PV i modułów PV bez chłodzenia. Porównanie energii uzyskanej z poszczególnych fotomodułów pozwoli w przyszłości na wybranie najbardziej optymalnej konfiguracji dla warunków Lubelszczyzny. W badaniach uwzględniono wymiar godzin słonecznych w województwie lubelskim. Kryzys energetyczny i rosnące ceny energii oraz coraz surowsze normy emisji spalin są głównym powodem zainteresowania alternatywnymi źródłami energii. Energia czerpana ze słońca jest najbardziej pierwotną formą pozyskiwania energii. Naturalne jest bezpośrednio wykorzystanie energii Słońca. Zastosowanie systemów PV jest najbardziej przyjazną formą wytwarzania zarówno prądu elektrycznego, jak i energii cieplnej. Obecnie w Polsce nie jest możliwe całkowite wyeliminowanie energetyki konwencjonalnej. System elektrowni słonecznych jako przyszłościowe źródło energii jest w stanie skutecznie uzupełnić niedobory w okresie największego zapotrzebowania na prąd elektryczny w ciągu dnia. Zastosowanie źródeł rozproszonych nie wpływa negatywnie na infrastrukturę sieci przesyłowych. Systemy PV z powodzeniem można stosować na obszarach o słabo rozbudowanej sieci przesyłowej. Warunki klimatyczne w Polsce są porównywalne z warunkami Niemiec, gdzie systemy PV są rozwijane od wielu lat. Przeprowadzone badania na obszarze polski południowo-wschodniej (Lublin) potwierdziły efektywność tej formy pozyskiwania energii. Analiza godzin słonecznych, jak i badania przeprowadzone na Politechnice Lubelskiej w okresie 10-cio letnich badań układów PV pozwalają jednoznacznie potwierdzić celowość rozwijania technologii fotowoltaicznych.

**Słowa kluczowe:** fotowoltaika, efektywność energetyczna, energia słoneczna, układy nadążne

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Robert Tomaszewski Państwowa Szkoła Wyższa Im. Papieża Jana Pawła II, Instytut Informatyki, ul. Sidorska 95/97 Biała Podlaska

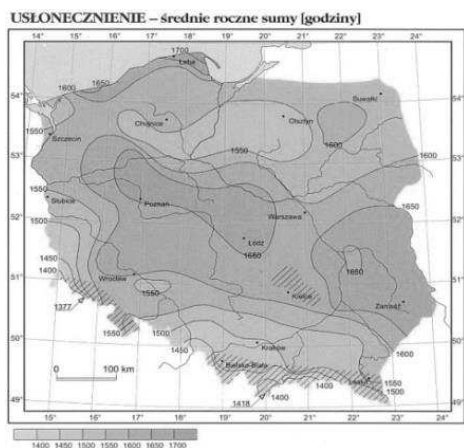
<sup>2</sup> Jan M. Olchowik, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 38, 30-618 Lublin; Państwowa Szkoła Wyższa Im. Papieża Jana Pawła II, Instytut Informatyki, ul. Sidorska 95/97 Biała Podlaska

<sup>3</sup> Jerzy Adamczyk, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 38, 30-618 Lublin; Państwowa Szkoła Wyższa Im. Papieża Jana Pawła II, Instytut Informatyki, ul. Sidorska 95/97 Biała Podlaska

## 1. Wstęp

W obliczu realnego zagrożenia kryzysem energetycznym konieczna jest dywersyfikacja dotychczasowych źródeł pozyskiwania energii. Wzrost konsumpcji energetycznej, przy jednoczesnym wyczerpywaniu się paliw kopalnych i coraz ostrzejszych normach emisji spalin oraz wprowadzane uregulowania prawne skłaniają ludzkość do sięgania po alternatywne źródła energii. Obecnie w warunkach Polski nie jest możliwe całkowite wyeliminowanie paliw kopalnych jako źródła wytwarzania energii. Jednakże, w warunkach europejskich i światowych, wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w bilansie paliwowo-energetycznym świata, przyczynia się do poprawy efektywności wykorzystania i oszczędzania klasycznych zasobów surowców energetycznych oraz poprawy jakości środowiska naturalnego.

W warunkach Polski, przy obecnym stanie sieci elektroenergetycznych może okazać się błędem inwestowanie w wielkoskalową energetykę, w tym w energetykę atomową. Alternatywą jest energia pozyskiwana z rozproszonych źródeł odnawialnych. Energię użyteczną dla człowieka można pozyskiwać na wiele sposobów. Najbardziej pierwotną formą pozyskiwania energii jest konwersja energii słonecznej. Jej wykorzystanie jest jednak determinowane przez warunki klimatyczne (nasłonecznienie i usłonecznienie). Obszar Polski południowo-wschodniej charakteryzuje się bardzo dobrymi warunkami nasłonecznienia i usłonecznienia w skali kraju. Parametry pracy układów PV są analogiczne do warunków innych państw Europy zachodniej (rys.1-2), gdzie od wielu lat z powodzeniem rozwija się technologie pozyskiwania energii z wykorzystaniem konwersji PV.

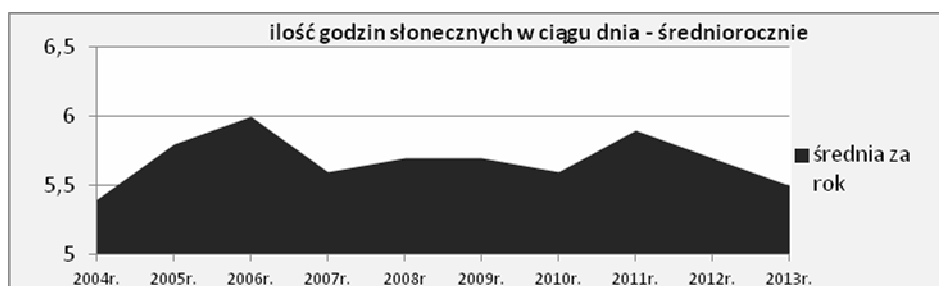


Rys. 1. Średnie usłonecznienie dla Polski [1]  
Fig. 1. Insolation of Poland



Rys. 2. Średnie usłonecznienie dla Europy [2]  
Fig. 2. Insolation of Europe

Potwierdzeniem możliwości wykorzystania energii promieniowania słonecznego na terenie Lubelszczyzny są pomiary zarejestrowane przez pobliską stację meteo w Radawcu k. Lublina (rys.3), jak również badania przeprowadzone na Politechnice Lubelskiej.



Rys. 3. Średnia dzienna ilości godzin słonecznych w ujęciu rocznym [3]

Fig. 3. The chart of the average daily amount of sunny hours within one year

Uśredniona wartość godzin słonecznych zarejestrowana przez stację meteo w Radawcu k. Lublina w okresie 10-cio letniej analizy wyniosła średnio 5,69 godzin dziennie. Wartości średnie uzyskiwane w poszczególnych latach są na zbliżonym poziomie. Pomiary godzin słonecznych, jak również wyniki uzyskane w badaniach własnych potwierdzają możliwość efektywnego wykorzystania konwersji PV jako alternatywnego źródła energii w warunkach Polski południowo-wschodniej.

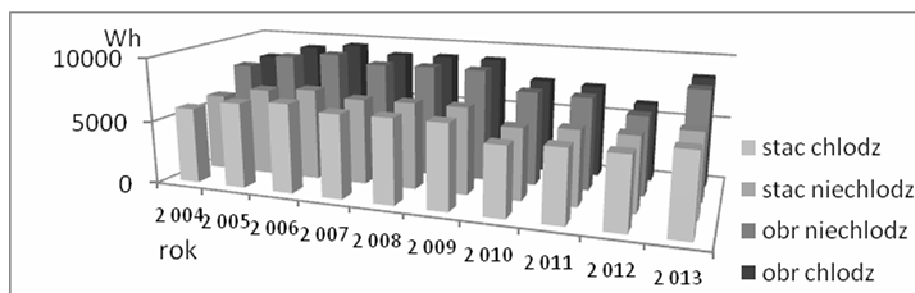
## 2. Prognozy rozwoju energii odnawialnej

Zbyt mały udział OZE w bilansie energetycznym na terenie kraju i Lubelszczyzny wynika z dotychczasowych uregulowań prawnych. Szansą na zmianę jest program wsparcia rozwoju alternatywnych źródeł energii realizowany przez Unię Europejską. Eliminacja dotychczasowych barier prawnych związanych z OZE służy realizacji działań w ramach np. projektu „Odnawialne Źródła Energii na Lubelszczyźnie – promocja i możliwości rozwoju”. Projekt ten jest projektem pilotażowym w ramach Regionalnej Strategii Innowacji Województwa Lubelskiego zakładającej rozwój sektora produktów ekologicznych i w konsekwencji do osiągnięcia celu operacyjnego 3.1 – RSI dotyczącego wzrostu produkcji jak i znaczenia alternatywnych źródeł energii. Jest on realizowany w ramach Działania 2.6 – Regionalne Strategie Innowacji i transfer wiedzy, Zintegrowanego Programu Operacyjnego Rozwoju Regionalnego. Działanie 1.4b realizowane przez Lubelską Agencję Wspierania Przedsiębiorczości w postaci bezzwrotnej dotacji do rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE) spotkało się z bardzo szerokim zainteresowaniem społecznym, przekraczającym możliwości finansowe dotacji. Program ten wspiera rozwój OZE

o mocy około 1MW (obecnie jedyna w Polsce elektrownia fotowoltaiczna o tej mocy działa w Wierchosławicach). Dzięki tym programom w najbliższych latach na terenie województwa lubelskiego powstanie wiele małych elektrowni (o mocy około 1MW) wykorzystujących OZE, a w szczególności konwersję fotowoltaiczną.

### 3. Analiza stanowiska badawczego

Analizie porównawczej poddano układy PV pracujące w systemie nadążnym i stacjonarnym przy wykorzystaniu dodatkowego chłodzenia fotomodułów oraz dla fotomodułów niechłodzonych [4-16]. W pracy dokonano analizy pracy modułów o mocy 100Wp, stanowiących składową systemu fotowoltaicznego, zainstalowanego na dachu jednej z auli Politechniki Lubelskiej, w okresie 10 ostatnich lat. Otrzymane wyniki badań pozwolą na dobranie optymalnego rozwiązania dla warunków klimatycznych panujących w Polsce południowo-wschodniej. Uzyskane rezultaty przedstawione są na rys.4.

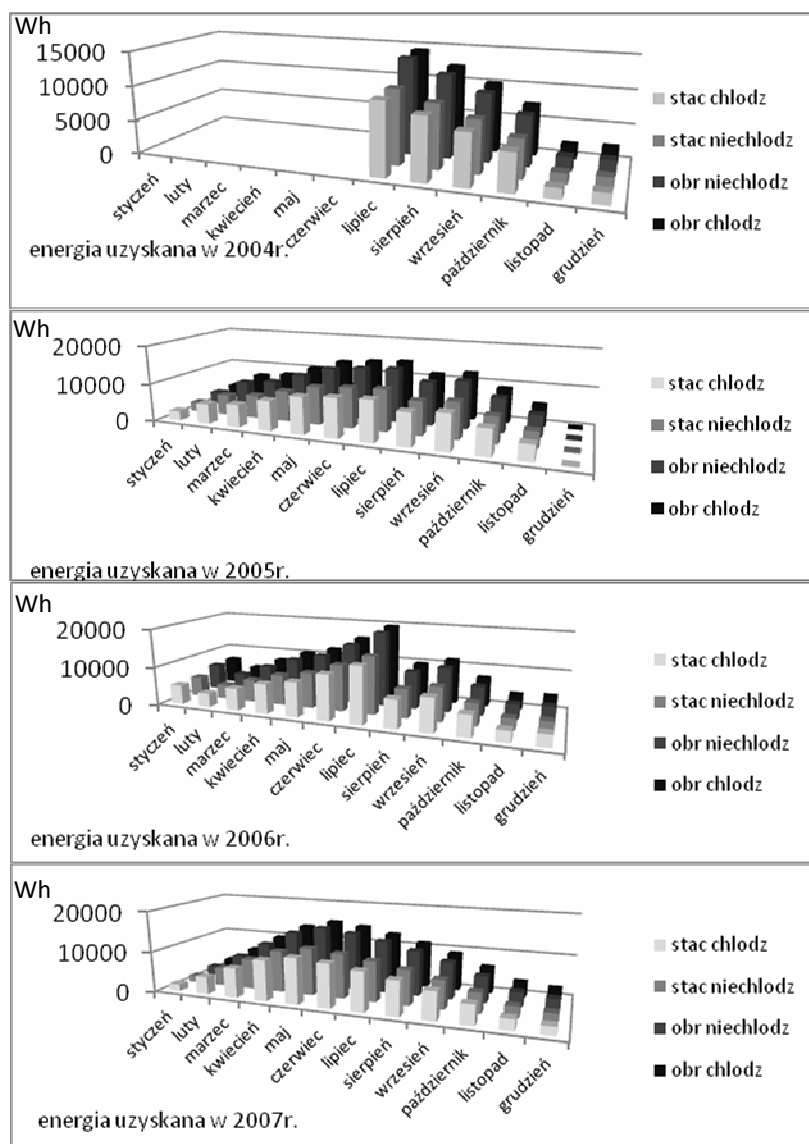


Rys.4. Energia uzyskana z poszczególnych konfiguracji układów PV w latach 2004 r – 2013 r.

Fig. 4. The energy gained from particular configuration sets in 2004-2013 year

W wyniku przeprowadzonej analizy stwierdzono niewielkie wahania w uzyskanej energii w poszczególnych latach dla układu stacjonarnego. W układzie nadążnym w poszczególnych latach wystąpiły większe dysproporcje uzyskanej energii. Wynika to z faktu, że układy nadążne charakteryzują się większym uzyskiem energii w godzinach porannych i popołudniowych. Przy pochmurnej pogodzie, przy wykorzystaniu promieniowania rozproszonego zastosowanie układu nadążnego nie przynosi wymiernych korzyści (rok 2012). W układzie stacjonarnym chłodzonym w okresie od 2004 r. do 2013 r. uzyskano średnio o 3% więcej energii niż w układzie bez chłodzenia. Porównując analogiczny układ nadążny w systemie z chłodzeniem zysk energii był wyższy o 1%. Zastosowany układ nadążny w stosunku do układu stacjonarnego wykazał wyższy zysk energii odpowiednio o 28% dla układu niechłodzonego i 29% dla układu chłodzonego.

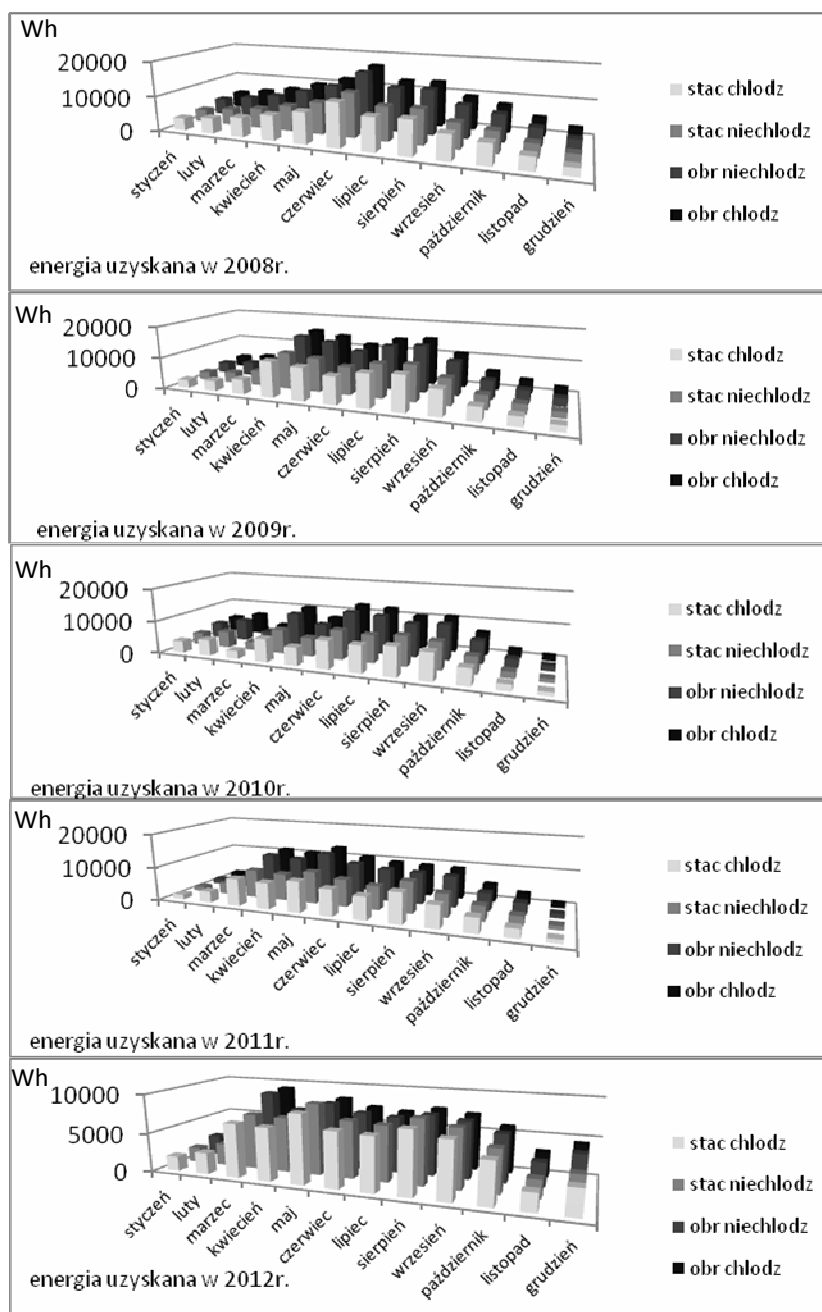
Analiza szczegółowa dla poszczególnych lat pracy układów została przedstawiona poniżej (rys.5a,b,c).



Rys.5a. Energia uzyskana w poszczególnych układach PV w okresie od 2004 r. do 2013 r.

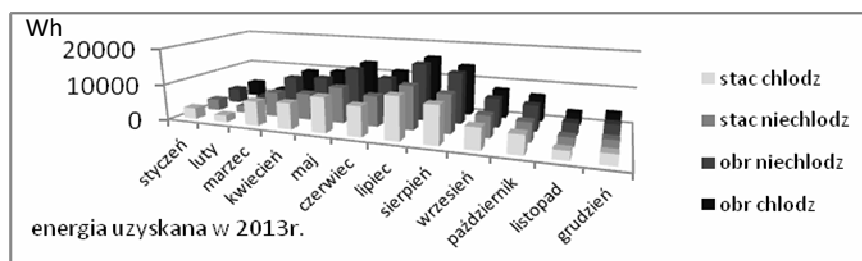
Fig. 5a. The energy gained from particular configuration sets every year





Rys.5b. Energia uzyskana w poszczególnych układach PV w okresie od 2004 r. do 2013 r.

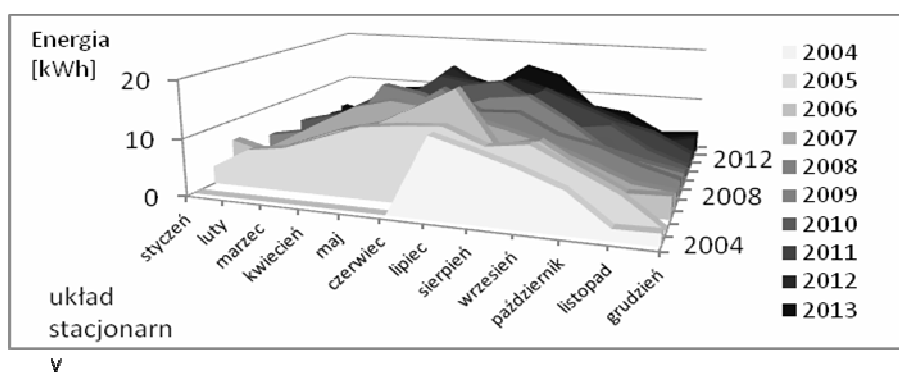
Fig. 5b. The energy gained from particular configuration sets every year



Rys.5c. Energia uzyskana w poszczególnych układach PV w okresie od 2004 r. do 2013 r.

Fig. 5c. The energy gained from particular configuration sets every year

Rozkład uzyskanej energii dla poszczególnych systemów fotowoltaicznych w ujęciu miesięcznym przedstawiono na rys.6.



Rys.6. Rozkład uzyskanej energii dla poszczególnych lat w ujęciu miesięcznym

Fig. 6. The energy gained from particular configuration sets by months.

Rozkład uzysku energii w poszczególnych latach kształtuje się analogicznie dla poszczególnych okresów. Największy zysk energii można zaobserwować w miesiącach letnich - w okresie od maja do września.

#### 4. Podsumowanie

Rezultaty badań wskazują na duży potencjał energetyki słonecznej jako alternatywnego źródła energii Polski Południowo-wschodniej. Największym uzyskiem energetycznym charakteryzował się układ nadążny. Dla tego rozwiązania największe różnice występują w godzinach po wschodzie i przed zachodem słońca. Wpływ chłodzenia fotomodułów w bilansie rocznym nie ma znaczącego wpływu na wytworzoną energię. Przedstawione w pracy wyniki badań modułów fotowoltaicznych mogą stanowić podstawę do analizy ekonomicznej opłacalności zastosowań poszczególnych rozwiązań technicznych w instalacjach fotowoltaicznych.

## Literatura

- [1] <http://www.mae.com.pl/odnawialne-zrodla-energii-energia-sloneczna.html> {dostęp 12.05.2014 r.}
- [2] [http://www.watt.pl/konfigurator-nowy/index.php?step=1&sub\\_step=0&1\\_0=0](http://www.watt.pl/konfigurator-nowy/index.php?step=1&sub_step=0&1_0=0) {dostęp 12.05.2014 r.}
- [3] dane stacji METEO z Radawca k. Lublina <http://www.weatheronline.pl/> {dostęp 12.05.2014 r.}
- [4] J. Banaś, R. Tomaszewski, J.M. Olchowik, Komputerowe sterowanie układem „follow the sun” modułów PV Politechniki Lubelskiej, W monografii: „Rachunek Globalny a Przyszłość Informatyki” (red. J.M. Olchowik), Wydawnictwa Naukowe Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Białej Podlaskiej, Biała Podlaska 2004, str. 188
- [5] J.M. Olchowik, I. Józwik, D. Szymczuk, K. Zabielski, J. Mucha, R. Tomaszewski, J. Banaś, S. Olchowik, J. Adamczyk, T. Cieplak, A. Zdyb, Analysis of solar cells efficiency in hybrid solar system under conditions of Southeast Poland, Proceedings of the 19<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference, Paris, France, 7-11 June 2004, vol. III, p. 3294.
- [6] S. Olchowik, J.M. Olchowik, DELPHI jako środowisko monitoringu pracy ogniw fotowoltaicznych, W monografii: „Rachunek Globalny a Przyszłość Informatyki” (red. J.M. Olchowik), Wydawnictwa Naukowe Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej w Białej Podlaskiej, Biała Podlaska 2004, str. 180
- [7] J.M. Olchowik, I. Józwik, R. Tomaszewski, D. Szymczuk, J. Adamczyk, T. Cieplak, K. Zabielski, J. Mucha, Optimization of work conditions of solar cells in hybrid solar system under conditions of Southeast Poland, Technical Digest of the International PVSEC-14, Bangkok, Thailand 26-30 January 2004, vol. I, p.495.
- [8] J.M. Olchowik, I. Jozwik, K.J. Cieslak, D. Szymczuk, K. Zabielski, J. Mucha, J. Banas, J. Adamczyk, T. Cieplak, A. Zdyb, Response of the Solar Cells in Hybrid System to Insolation Conditions of South-Easterly Poland, Proc. of 20<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 6-10 June 2005, Barcelona (Spain), (CD) p. 2974.
- [9] J.M. Olchowik, S. Gułkowski, K. Cieślak, I. Józwik, J. Adamczyk, R. Tomaszewski, D. Szymczuk, J. Banaś, K. Zabielski, J. Mucha, Monitoring i optymalizacja wykorzystania energii solarnej w Politechnice Lubelskiej, Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej 229 (2006) 371.
- [10] J.M. Olchowik, K.Cieslak, S. Gulkowski, I. Jozwik, J. Banas, G. Olchowik, K. Zabielski, J. Adamczyk, R. Tomaszewski, Comparative analysis of solar cells efficiency in stationary and navigated hybrid systems under southeast Poland conditions, IEEE 2006 Proc. of 4<sup>th</sup> World Conference on Photovoltaic Energy Conversion, Waikoloa, Hawaii, 7-12 May 2006, 2506.
- [11] J.M. Olchowik, S. Gulkowski, K. Cieslak, I. Jozwik, J. Banas, S. Olchowik, A. Zdyb, D. Szymczuk, J. Adamczyk, R. Tomaszewski, K. Zabielski, J. Mucha, T. Cieplak, Comparative study of the solar modules performance in the hybrid system in South-easterly Poland during first two years of exploitation, Proc. of 21<sup>th</sup>

- European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 4-8 September 2006, Dresden (Germany), 3049.
- [12] J.M.Olchowik, S.Gulkowski, K.Cieslak, S.Olchowik, K.Zabielski, I.Jozwik, D.Szymczuk, J.Adamczyk, R.Tomaszewski, analysis of the influence of diffuse solar radiation on the efficiency of photovoltaic conversion at south-eastern Poland conditions, Proc. of 21th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 3-7 September 2007, Milan (Italy), 3238.
- [13] Jan Marian Olchowik, Robert Tomaszewski, Jerzy Adamczyk, Sławomir Gulkowski, Krystian Cieslak, Krzysztof Zabielski, Four years exploitation analysis of the hybrid solar system in South-eastern Poland conditions, Proc. of 23th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 1-5 September 2008, Valencia (Spain) 3084.
- [14] Jan Marian Olchowik, Krystian Cieslak, Michał Sordyl, Sławomir Gulkowski, Analysis of the photovoltaic development under south-east Poland conditions, Proc. of 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 21-25 September 2009, Hamburg (Germany) 4458.
- [15] Jan Marian Olchowik, Robert Tomaszewski, Krystian Cieslak, Sławomir Gulkowski, Jerzy Adamczyk, Comparison analysis of the photovoltaic modules efficiency working in a hybrid system after five years of exploitation under south-east Poland conditions, Proc. of 24th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition, 21-25 September 2009, Hamburg (Germany) 4042.
- [16] J. M. Olchowik, K. Cieslak, S. Gulkowski, J.Mucha, M. Sordyl, K. Zabielski, D.Szymczuk, A. Zdyb, Progress of development of PV systems in south-eastern Poland, Proc. 35PVSEC Conf. Honolulu, Hawaii, 20-25 Jun 2010, p. 002397.

## **STUDY ON THE EFFICIENCY OF THE PV CONVERSION FOR LUBLIN REGION**

### **S u m m a r y**

The study presents problems connected with the decennial analysis of the solar system working that was installed in the south-east of Poland. The follow the sun system and the land-based one with using the module PV cooling and the module PV without cooling have been submitted for comparative analysis. The comparison of the energy gained from particular photomodules will allow choosing the most optimal configuration for the Lublin region. conditions in the future. The amount of sunny hours in the Lublin region has been taken into account in the research. The energy crisis and rising energy prices and increasing rigor of emission standards are a major reason for interest in alternative energy sources. Energy derived from the sun is the most primary form of energy generation. Natural is the direct use of the solar energy. Use of PV systems is the most environmentally friendly form of the production of both electric and thermal energy. Currently in Poland is not possible to completely eliminate the conventional energy. The solar power plants as a future source of energy is able to effectively complement the shortages in the peak demand for electricity during the day. The use of diffuse sources does not affect the transmission network infrastructure. PV systems can be successfully used in areas with poorly developed transmission network. The climatic conditions in Poland are comparable with those of Germany, where PV systems are developed for many years. The research in the area of south-eastern Polish (Lublin) confirmed the effectiveness of this form of energy production. Analysis of hours of sunshine, as well as research carried out at the Technical University of Lublin during the

10-year study of PV systems allow you to clearly confirm the desirability of developing photovoltaic technologies.

**Keywords:** photovoltaics, energy efficiency, solar energy, follow the sun system

DOI:10.7862/rb.2014.117

*Przesłano do redakcji: 25.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 22.12.2014 r.*

Henryk WACHTA<sup>1</sup>  
Krzysztof BARAN<sup>2</sup>  
Marcin LEŚKO<sup>3</sup>

## ILUMINACYJNE, BEZPRZEWODOWE OŚWIETLENIE DYNAMICZNE

Współczesne instalacje iluminacyjne coraz częściej wyposaża się w oprawy oświetleniowe ze źródłami LED. Cechuje je, obok niskiego poboru energii oraz dużej trwałości, zaletą możliwości sterowania barwą i wartością strumienia emitowanego w oświetlaną przestrzeń. Pozwala to tworzyć bardzo atrakcyjne sekwencje gry światłocienia przez przemyślane rozświetlanie lub przyciemnianie wybranych stref iluminowanego obiektu. Nowością jest możliwość rezygnacji z niekiedy kłopotliwego prowadzenia instalacji sterującej do grup opraw iluminacyjnych. Zastosowanie systemu bezprzewodowego umożliwia z jednej strony rezygnację z tworzenia sieci sterującej a z drugiej pozwala sterować całością instalacji z poza iluminowanego obiektu. Jako obiekt do zastosowania tego typu dynamicznej instalacji iluminacyjnej został wybrany Ratusz Rzeszowski. W przygotowanym referacie autorzy zestawili najważniejsze etapy realizacji instalacji iluminacyjnej, pozwalającej na bezprzewodowe sterowanie oprawami oświetleniowymi, wyposażonymi w źródła światła typu LED. Instalacja została skonfigurowana z uwzględnieniem obowiązujących wytycznych iluminacyjnych, odpowiadających formie przestrzennej Ratusza Rzeszowskiego. Zostały skonfigurowane dwie zasadnicze grupy opraw oświetleniowych: oprawy iluminujące konturowo dedykowane do oświetlenia elewacji oraz oprawy do iluminacji punktowej. Zrealizowana instalacja zawiera elementy sterowania bezprzewodowego na etapie komunikacji baterii opraw oświetleniowych z jednostką zarządzającą oraz sterownikiem TCP. Odpowiednio do wybranego rozlokowania sprzętu oświetleniowego, przygotowano system sterowania bezprzewodowego. Korzystając z narzędziowej aplikacji PHAROS wykonano etap informatycznej identyfikacji opraw oświetleniowych, założono dla nich tryby pracy (ściemniania lub rozjaśniania oraz zmiany barwy), a także synchronizację z zaproponowaną ścieżką dźwiękową. Finalnie zaproponowano szereg dynamicznych sekwencji typu „obraz-dźwięk”. Przykładowe statyczne dwa ujęcia uruchomionej instalacji iluminacyjnej zamieszczono w referacie.

**Słowa kluczowe:** iluminacje architektoniczne, oświetlenie dekoracyjne, sterowanie oświetleniem, źródła światła LED

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Henryk Wachta, dr inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, email: hwachta@prz.edu.pl

<sup>2</sup> Krzysztof Baran, mgr inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, email: kbaran@prz.edu.pl

<sup>3</sup> Marcin Leško, mgr inż., Politechnika Rzeszowska, Katedra Energoelektroniki i Elektroenergetyki, ul. W. Pola 2, 35-959 Rzeszów, email: mlesko@prz.edu.pl

## 1. Wprowadzenie

Zagadnienie iluminacji dynamicznej ściśle wiąże się z możliwością kreowania zmiennego, nocnego wizerunku obiektu [12]. U podstaw tego typu działań leżą praktyczne możliwości realizacji zmiany sposobu iluminacji, w ramach zamontowanego sprzętu oświetleniowego. Prosty sposób realizacji tego zadania jest sekcjonowanie instalacji zasilającej oprawy iluminacyjne na niezależne obwody. Powala to stworzyć „pseudo dynamikę” iluminacyjną dla np. wariantu świątecznego (uruchomienie wszystkich obwodów iluminacji) oraz wariantu codziennego (włączenie tylko tych zespołów opraw oświetleniowych, które wydobywają z mroku nocy charakterystyczne elementy architektoniczne obiektu).

Wprowadzenie na rynek oświetleniowy źródeł światła o regulowanym strumieniu świetlnym i możliwością zmiany barwy emitowanego światła, stworzyło warunki pozwalające na niezależne sterowanie każdej oprawy oświetleniowej (rys.1).



Rys. 1. Oprawy oświetleniowe typu LED z regulacją barwy i strumienia świetlnego (od lewej: iColor Cove MX Powercore BCX450, Color Blast Powercore BCP 470, eW Burst Powercore BCP 463) [4], [5], [6]

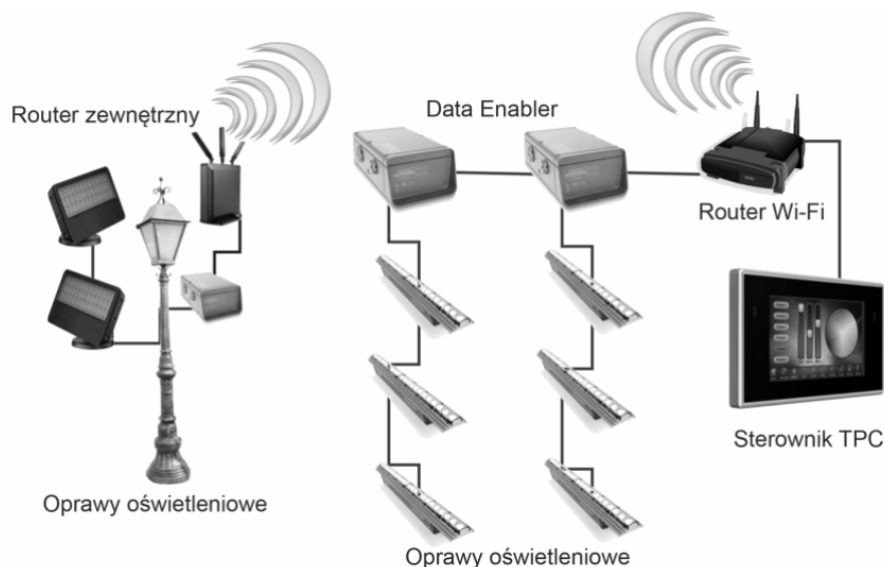
Fig. 1. LED luminaires with adjustable color and luminous flux (from left: iColor Cove MX Powercore BCX450, Color Blast Powercore BCP470, eW Burst Powercore BCP 463) [4], [5], [6]

Dzięki temu projektowane współcześnie instalacje iluminacyjne, obok funkcji statycznego oświetlenia dekoracyjnego, są przystosowane do realizacji krótkich, dynamicznych sekwencji świetlnych typu światło-dźwięk. Oferta sprzętowa obejmuje często oprawy ze źródłami typu LED oraz układy optyczne formujące strumień świetlny o cechach: rozsyłu obrotowo-symetrycznego (akcentowanie świetlne), rozsyłu z dwoma płaszczyznami symetrii (uzyskana rozciągnięta plama świetlna, pożądana np. do iluminacji pilastrów) oraz rozsyłu linii świetlnych [11], [14].

Idea nowego podejścia do sposobu sterowania tego typu oprawami polega na wyeliminowaniu ze struktury instalacji iluminacyjnej części obwodów sterujących. Transmisja sygnałów sterujących może się odbywać na drodze radiowej. Jest to bardzo korzystne dla takich uwarunkowań miejsc montażu baterii opraw iluminacyjnych, gdzie planując prowadzenie sieci zasilająco-sterującej nie można ingerować w środowisko (np. demontaż zabytkowej kostki brukowej) [12]. W tym wypadku oprawy oświetleniowe mogą być montowane na istniejących już słupach oświetleniowych (łatwy, nieinwazyjny dostęp do zasilania elektrycznego). Możliwość korzystania z bezprzewodowego sterowania instalacją iluminacyjną umożliwia również przeniesienie sterownika systemowego poza obiekt i zarządzanie iluminacją np. z biura urzędu administrującego iluminowanym obiektem.

## 2. Struktura systemu iluminacyjnego

Istotą prawidłowej pracy bezprzewodowego oświetlenia dynamicznego jest jego skład i konfiguracja. Zrealizowany system został dedykowany do opracowanej koncepcji iluminacji Ratusza Rzeszowskiego (rys.2) .



Rys. 2. Schemat strukturalny sterowanej bezprzewodowo dynamicznej instalacji iluminacyjnej, na podstawie [7]

Fig. 2. Structural diagram of wireless controlled floodlight/illumination installation, based on [7]

Zakładała ona instalację pięćdziesięciu jeden opraw oświetleniowych w bezpośrednim otoczeniu obiektu. Funkcję zarządzania systemem zlecono zaawansowanemu sterownikowi firmy Pharos Controls, pozwalającemu na ste-



rowanie dowolnymi urządzeniami za pomocą protokołu DMX. Do synchronizacji iluminacji ze ścieżką dźwiękową (pliki formatu mp3) zaimplementowano do systemu sterownik zewnętrzny PX154.

Grupa opraw iluminacji konturowej, rozlokowanych na pobliskich trzech latarniach podłączona została do koncentratorów (data enabler), te zaś z routerami zewnętrznymi, komunikującymi się drogą radiową ze sterownikiem. Druga grupa liniowych opraw iluminacyjnych (instalacja w obrębie elewacji obiektu) została w podobny sposób skojarzona z koncentratorami. One już bez potrzeby wykorzystania komunikacji radiowej zostały podłączone instalacją wewnątrz budynku do sterownika.

### 3. Przyjęta koncepcja iluminacji

Po analizie cech architektonicznych obiektu i poziomu luminancji tła zdecydowano się na iluminację mieszaną [2].



Rys. 3. Fragment zewnętrznego pierścienia iluminującego strefowo wschodnią elewację obiektu architektonicznego [1], [3]

Fig. 3. A fragment of the outer ring zonally illuminating eastern elevation of architectural object [1], [3]

Rozświetlenie konturowe elewacji zlecono sześciu naświetlaczom LED typu Color Blast Powercore BCP 470, oraz sześciu naświetlaczom akcentującym LED typu eW Burst Powercore BCP 463 [8]. Ich rozmieszczenie i nacelowanie

na jednej z latarni zilustrowano na rysunku nr 3 (op.1, op.2, op.3 i op.4). Groty wektorów wskazują miejsca nacelowania naświetlaczy, a ich początki miejsca lokalizacji opraw. Poszczególne obszary przewidziane do iluminacji zaznaczono konturowo. W podobny sposób rozwiązano metodę iluminacji elewacji północnej Ratusza (dwie latarnie uliczne jako baza do montażu opraw iluminacyjnych). Wszystkie te oprawy przewidziano do sterowania radiowego.



Rys. 4. Fragment instalacji iluminacyjnej, rozlokowanej na elewacjach wschodniej i północnej Ratusza Rzeszowskiego [1]

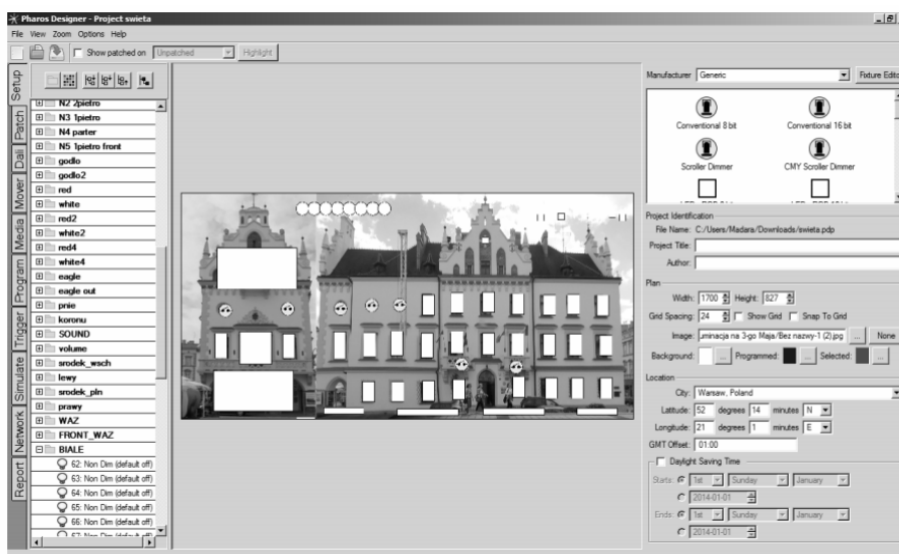
Fig. 4. A fragment of illumination installation located on eastern and northern elevation of Rzeszów town hall [1]

Nieco inaczej zaproponowano iluminować poszczególne ościeżnice okien ratusza (spełnienie zasady wzmacniania głębi). Oprawy zostały zamontowane wewnątrz obiektu na parapetach wewnętrznych i skierowane ku górze ościeżnic (rys.4). Sumarycznie zastosowano tutaj trzydzieści cztery oprawy liniowe LED typu iColor Cove MX Powercore BCX450 oraz pięć punktowych do wewnętrznej iluminacji okrągłych okien (op.23, op.24, op.25, op.26 i op.27) [8]. Na rys.4 miejsca montażu opraw liniowych oznaczono początkami wektorów. Przyjęty sposób iluminacji okien pozwala uzyskać interesujący efekt optyczny po zasunięciu żaluzji okiennych. Sumaryczne oddziaływanie świetlne wszystkich opraw iluminacyjnych pozwoliło atrakcyjnie przedstawić formę przestrzenną Ratusza Rzeszowskiego w porze nocnej.

Całkowity pobór mocy przez instalację iluminacyjną wynosi 1800W, co odpowiada mocy standardowej frytkownicy lub pralki automatycznej. Żywotność całego systemu, przy średnim czasie uruchomienia równym 8h/dobę, wyniesie około 12500 dni czyli ponad 35 lat. Należy dodać, iż po tym czasie oprawy będą emitować 50% strumienia nominalnego.

#### 4. Zastosowany system sterowania iluminacją dynamiczną

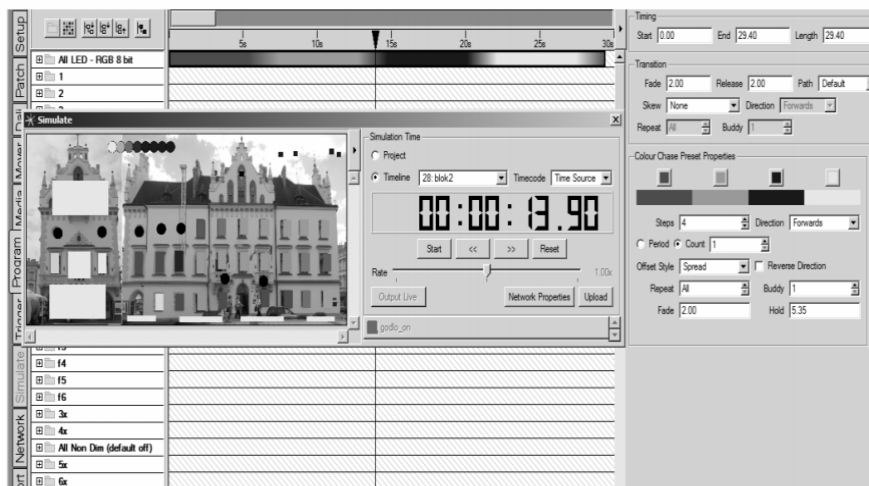
W pracach nad tworzeniem sekwencji iluminacji dynamicznej wykorzystana została aplikacja Pharos Designer, dedykowana dla sterownika TPC, stworzona przez firmę Pharos Controls [9], [10]. Program służy do programowania pokazów iluminacji, opisywania zachowania i automatyzacji budowanych systemów oświetleniowych, a także do oprogramowania wyświetlacza dotykowego oraz udostępnianej przez sterownik strony internetowej. Kluczowym elementem tego etapu pracy było stworzenie „wirtualnych opraw”, zgodnych z ich rzeczywistymi odpowiednikami pod względem położenia i ilości pól adresowych (rys.5).



Rys. 5. Okno aplikacji programowej PHAROS etapu adresowania opraw oświetleniowych [9], [10]

Fig. 5. The PHAROS application window of luminaires addressing stage [9], [10]

Aplikacja umożliwia korzystanie z szeregu gotowych efektów świetlnych (zmiana barwy, rozjaśnianie i przygaszanie strumienia świetlnego), które zostały adaptowane na potrzeby kreowanej koncepcji iluminacji. Kolejnym ważnym krokiem było połączenie efektów świetlnych, przyporządkowanych poszczególnym oprawom, z wybraną ścieżką dźwiękową (rys.6).



Rys. 6. Okno aplikacji programowej PHAROS etapu koordynacji ścieżki dźwiękowej ze ścieżką sterowania pracą opraw oświetleniowych [9], [10]

Fig. 6. The PHAROS application window of soundtrack and luminaires work coordination stage [9], [10]

Użytecznym dodatkiem aplikacyjnym, wykorzystanym w pracy, był Program Pharos Interface Editor, drugi z programów służących do konfiguracji systemu zbudowanego na bazie sterownika Pharos TPC. Jest to narzędzie służące do projektowania interfejsów panelu dotykowego sterownika. Program umożliwia tworzenie wielu stron wykorzystujących przyciski, suwaki czy też panele kolorów do sterowania systemem. Można także tworzyć własne ustawienia za pomocą plików XML czy też modyfikować całe grupy schematów kolorów i dostępnych efektów świetlnych.

## 5. Realizacja praktyczna sekwencji iluminacyjnych

Po zainstalowaniu systemu zrealizowano kilka programów iluminacji dynamicznej. Pierwszym był program “stały codzienny”, wykorzystujący paletę ciepłych barw oraz dominującą barwę niebieską - jako charakterystyczną barwę Rzeszowa. Program jest uruchamiany przez najdłuższy zdefiniowany okres czasowy, z tego powodu jego dynamika została ograniczona do wolnozmiennych manipulacji iluminacją konturową (rys.7).

Kolejnym programem był program “hejnał”, stworzony do akompaniamentu “Hejnału Miasta Rzeszowa”. W trakcie tworzenia tego pokazu wykorzystywane były funkcje synchronizacji z programem AIMP, odtwarzającym utwór Hejnału oraz użycie dodatkowych opraw wysyłających polecenia do sterownika PX154, który uruchamiał utwór MP3 odtwarzany przez głośniki lokowane na



Rys. 7. Fazy pracy instalacji iluminacyjnej z realizacją zmiany barwy oraz intensywności świecenia opraw oświetleniowych [1]

Fig. 7. Work phases of illumination installation with adjustable color and light intensity of luminaires [1]

Ratuszu. Iluminacja wraz z akompaniamentem uruchamiana jest o godzinie osiemnastej (tylko w okresie zimowym) oraz o godzinie dwudziestej pierwszej (w ciągu całego roku). "Nalepa", to trzeci program stworzony na specjalne okazje, odtwarzany przy akompaniamentcie utworu "I co?" Tadeusza Nalepy.

## 6. Podsumowanie

Wymownym dowodem atrakcyjności tego typu rozwiązań iluminacyjnych, łączących światło i dźwięk jest wyróżnienie przyznane w ubiegłym roku przez Prezydenta RP Bronisława Komorowskiego Miastu Rzeszów, uczestniczącemu w konkursie Miast Metropolitalnych (konkurs „Majówka z Polską”). Stworzona okazjonalna iluminacja dynamiczna, nawiązująca do Święta 3 Maja, została bardzo przychylnie przyjęta przez komitet oceniający nadesłane do konkursu z całego kraju iluminowane obiekty.

Na bazie wykonanej instalacji także w roku ubiegłym przeprowadzony został pierwszy ogólnopolski konkurs iluminacyjny, w którym uczestniczyło kilkanaście zespołów studenckich z krajowych uczelni wyższych. System sterujący został udostępniony studentom, aby wykorzystując swoją kreatywność, stworzyli propozycje krótkich spektakli iluminacji dynamicznej.

## Literatura

- [1] Henryk Wachta - Autorska dokumentacja fotograficzna. Rzeszów 2013.
- [2] CIE Technical Report, nr 94 – Guide for Floodlight.
- [3] Henryk Wachta – wytyczne mocowania i nacelowania baterii reflektorów iluminacyjnych, Rzeszów 2012.
- [4] <http://www.colorkinetics.com/ls/rgb/covemx/> 2014 r –iColor Cove MX Powercore [dostęp 5 maja 2014 r].
- [5] [http://www.ecat.lighting.philips.com/l/entertainment/architainment/colorblast-powercore-bcp470/910503700717\\_eu/](http://www.ecat.lighting.philips.com/l/entertainment/architainment/colorblast-powercore-bcp470/910503700717_eu/) - Color Blast Powercore BCP 470 [dostęp 5 maja 2014 r].
- [6] [http://www.ecat.lighting.philips.com/l/new-products/new-led-products/ew-burst-powercore/910503701123\\_eu/](http://www.ecat.lighting.philips.com/l/new-products/new-led-products/ew-burst-powercore/910503701123_eu/) eW Burst Powercore BCP 463 [dostęp 5 maja 2014 r].
- [7] Kołodziejczyk M., Iluminacja dynamiczna w oświetleniu. Praca dyplomowa inżynierska. Politechnika Rzeszowska, Rzeszów 2014.
- [8] LED Lighting Explained. Understanding LED Sources, Fixtures, Applications and Opportunities. Philips Lighting 2010.
- [9] Pharos Designer User Manual v1.2.3, Pharos Architectural Controls Ltd. 2012.
- [10] Pharos Interface Editor User Manual v1.1, Pharos Architectural Controls Ltd. 2011.
- [11] PN-90/E-01005. Technika świetlna. Terminologia.
- [12] Żagan W., „Iluminacja obiektów”, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2003.
- [13] Żagan W., Podstawy techniki świetlnej. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.

*Praca została wykonana z wykorzystaniem aparatury zakupionej w wyniku realizacji Projektu: „Budowa, rozbudowa i modernizacja bazy naukowo-badawczej Politechniki Rzeszowskiej”, współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Regionalnego Projektu Operacyjnego Województwa Podkarpackiego na lata 2007-2013, Oś priorytetowa 1 – Konkurencyjna i innowacyjna gospodarka.*

## WIRELESS DYNAMIC ILLUMINATION LIGHTING

### Summary

Modern illumination systems are increasingly equipped with luminaires based on LED light sources. In addition to low power consumption and high durability, they are characterized by another advantage, the ability to control the color and value of the luminous flux emitted in the illuminated space. It allows to create very attractive sequences of light play through the thought brightens or darken the selected zones of illuminated object. A new feature is the ability for renouncement of sometimes troublesome conducting of control installation for illumination luminaire groups. Use of the wireless system allows on the one hand resignation from the creation of the control network and on the other hand allows to control the whole installation from outside the illuminated object. As an application object for presented type of dynamic illumination was chosen Rzeszow town hall. In this paper authors combined the most important stages of installation, which allows for wireless control of luminaires equipped with LED light sources. The installation was set up, according to existing illumination guidelines, corresponding to a spatial form of town hall. There was configured two main groups of luminaires: contour illuminating lamps, dedicated to illuminate facades and point illuminating lamps. Installation contains wireless control elements for communication between TPC control unit and battery of luminaires. Respectively to chosen equipment location there was prepared wireless control system using PHAROS application. There was specified work modes of lamps, like dimming or brightening, color change and synchronization with soundtrack. Finally authors proposed a series of dynamic "image-sound" sequences.

**Keywords:** architectural illuminations, decorative lighting, lighting control, LED light sources

DOI:10.7862/rb.2014.118

*Przesłano do redakcji: 21.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 22.12.2014 r.*

Anna ZASTAWNA-RUMIN<sup>1</sup>

Kinga ZĘBALA<sup>2</sup>

## IZOLACYJNOŚĆ AKUSTYCZNA ŚCIAN W SALACH DO PRÓB W SZKOLE MUZYCZNEJ

**Streszczenie:** W artykule zawarto wyniki badań izolacyjności akustycznej przegród w salach do prób w szkole muzycznej. Analiza wyników przeprowadzona została w odniesieniu do aktualnych przepisów oraz w aspekcie odczuwania komfortu. Aby sprawdzić, czy ujęte w normach wymagania dotyczące izolacyjności przegród w szkołach są wystarczające, aby komfortowo uczyć się gry na instrumentach, dokonano pomiarów izolacyjności akustycznej ścian i drzwi w salkach do prób w jednej ze szkół muzycznych. Kolejnym elementem analizy w aspekcie izolacyjności akustycznej było określenie wpływu przedsionka na warunki akustyczne w salach prób. Izolacyjność akustyczna zarówno ścian pomiędzy salami jak i ścian z drzwiami prowadzącymi do przedsionka spełniają wymagania dotyczące izolacyjności od dźwięków powietrznych ale tylko w odniesieniu do szkół tradycyjnych. Pomimo spełnienia warunków dotyczących izolacyjności od dźwięków powietrznych dla ścian analizowanych pomieszczeń, komfort akustyczny w tych salach nie jest wystarczający. Obserwacje oraz wywiad z użytkownikami sal wskazuje na wzajemne zakłócenia dźwięków w przypadku jednoczesnego korzystania z sąsiadujących sal. Autorzy artykułu postulują zatem konieczność stworzenia takich wymagań normowych, aby szkoły muzyczne i inne temu podobne instytucje, zapewniały komfort nauki gry na instrumentach i śpiewu.

W analizowanym budynku szkoły muzycznej zaprojektowanie przedsionków było właściwym rozwiązaniem, skutkującym znacznym zwiększeniem izolacyjności od dźwięków powietrznych generowanych na korytarzu. Ochrona od dźwięków generowanych w sąsiedniej sali jest zbyt niska – nie stwarza warunków komfortowych do nauki muzyki. Sytuacja, w której każda sala posiadałaby oddzielny przedsionek, byłaby rozwiązaniem bardziej korzystnym.

**Słowa kluczowe:** izolacyjność akustyczna, ciśnienie akustyczne, decybel, pogłos

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: mgr inż. Anna Zastawna-Rumin, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej

<sup>2</sup> mgr inż. Kinga Zębala, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej



## 1. Wstęp

W ostatnich latach wiele uwagi poświęca się oszczędzaniu energii w sektorze budownictwa. Technologie wznoszenia budynków podporządkowane są idei energooszczędności. Idea ta znajduje również swoje odzwierciedlenie w przepisach: „Prawo Budowlane”, czy „Warunki Techniczne...”. Tym samym wiele mówi się o izolacyjności termicznej przegród budynku. Niestety nadal niewiele uwagi poświęca się izolacyjności akustycznej przegród, która w istotny sposób wpływa na komfort użytkowania budynków.

## 2. Izolacyjność akustyczna

Jak ważnym czynnikiem jest ochrona przed hałasem i związana z tym izolacyjność akustyczna ścian najlepiej wiedzą mieszkańcy budynków wielorodzinnych. Jednak równie ważny jest komfort w pracy i w szkole.

Izolacyjność akustyczna to miara określająca jak dobrze konstrukcja budowlana (przegroda) izoluje pomieszczenie od dźwięków przenikających z innych pomieszczeń lub z otoczenia.

Wyróżnia się izolacyjność akustyczną od dźwięków powietrznych (ściany, stropy, instalacje) oraz od dźwięków uderzeniowych (stropy, instalacje).

Przybliżoną izolacyjność od dźwięków powietrznych przegrody oznaczamy symbolem  $R'$  i przedstawiamy wzorem:

$$R' = 10 \lg \frac{W_1}{W_2 + W_3}, \text{ dB} \quad [5] \quad (1)$$

gdzie:

$W_1$  - moc akustyczna padająca na przegrodę, W

$W_2$  - moc akustyczna przeniesiona przez przegrodę, W

$W_3$  - moc akustyczna przenikająca między pomieszczeniami wszystkimi drogami pośrednimi, dB

W przypadku, gdy pole akustyczne w pomieszczeniach występujących po obu stronach przegrody można uznać jako przybliżone do rozproszonego, wówczas  $R'$  przedstawiamy wzorem:

$$R' = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{S}{A}, \text{ dB} \quad [5] \quad (2)$$

gdzie:

$L_1$  - poziom średniego ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu nadawczym, dB

$L_2$  - poziom średniego ciśnienia akustycznego w pomieszczeniu odbiorczym, dB

$S$  - powierzchnia przegrody (wspólna część przegrody występująca w obu pomieszczeniach),  $m^2$

A - równoważne pole powierzchni dźwiękochłonnej pomieszczenia odbiorczego, m<sup>2</sup>

Do określania izolacyjności akustycznej przegrody stosuje się również znormalizowaną różnicę poziomu ciśnienia akustycznego  $D_n$  oraz wzorcową różnicę poziomów ciśnienia akustycznego  $D_{nT}$ , obie wyrażone w dB i opisane wzorami:

$$D_n = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{A_0}{A}, \text{ dB} \quad [5] \quad (3)$$

gdzie:

$L_1, L_2, A$  - j.w.

$A_0$  - równoważne pole powierzchni dźwiękochłonnej odniesienia (chłonność akustyczna odniesienia), przyjmuje się  $A_0 = 10 \text{ m}^2$  (wartość chłonności akustycznej charakterystyczna dla pokoi mieszkalnych umeblowanych), m<sup>2</sup>

$$D_{nT} = L_1 - L_2 + 10 \lg \frac{T}{T_0}, \text{ dB} \quad [5] \quad (4)$$

gdzie:

$L_1, L_2, A$  - j.w.

T - czas pogłosu pomieszczenia odbiorczego, s

$T_0$  - czas pogłosu odniesienia; przyjmuje się  $T_0 = 0,5 \text{ s}$  (wartość czasu pogłosu dla pokoi mieszkalnych umeblowanych)

Zależność pomiędzy przybliżoną izolacyjnością akustyczną właściwą przegrody  $R'$  a znormalizowaną i wzorcową różnicą poziomów ciśnienia akustycznego kształtuje się następująco:

$$D_n = R' + 10 \lg \frac{A_0}{S}, \text{ dB} \quad [5] \quad (5)$$

gdzie:

$R', A_0, S$  - j.w.

$$D_{nT} = R' + 10 \lg V - 10 \log S - 5, \text{ dB} \quad [5] \quad (6)$$

gdzie:

$R', A_0, S$  - j.w.

V - objętość pomieszczenia odbiorczego, m<sup>3</sup>

Wskaźnik ważony izolacyjności akustycznej właściwej przegrody (np. ścian, okna, itp.)  $R_w$  (odnosi się do hałasu o równym poziomie w poszczególnych częstotliwościach) jest wyrażana w dB (decybel). Zgodnie z ISO 717-1 można w uproszczeniu przyjąć, że wykorzystujemy wskaźnik oceny izolacyjno-

ści akustycznej właściwej  $R_{A1}$  dla oceny ścian wewnętrznych i  $R_{A2}$  dla oceny ścian zewnętrznych. Zależności pomiędzy tymi wielkościami [6]:

$$R_{A1} = R_W + C \quad (7)$$

$$R_{A2} = R_W + C_{tr} \quad (8)$$

$$R_W(C, C_{tr})$$

gdzie:

$C$  - widmowy wskaźnik adaptacyjny - współczynnik korekcyjny dotyczący hałasów użytkowych (rozmowa, muzyka, zabawa dzieci)

$C_{tr}$  - widmowy wskaźnik adaptacyjny - współczynnik korekcyjny dotyczący transportu (ruch uliczny i kolejowy, samoloty itp.)

Wskaźniki  $C$  i  $C_{tr}$  przybierają wartości ujemne (w nielicznych przypadkach wynoszą 0)

Pozostałe wartości  $D_n$  i  $D_{nT}$  można przedstawić za pomocą tych samych wskaźników adaptacyjnych:

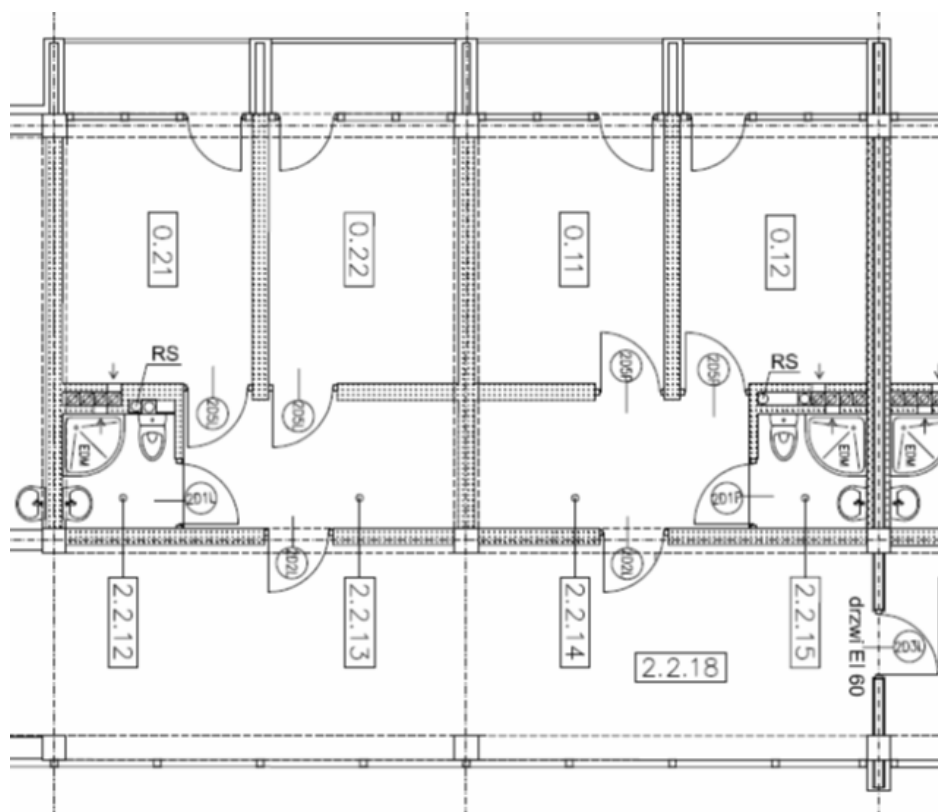
$$D_n(C, C_{tr}) \text{ oraz } D_{nT}(C, C_{tr}) \quad [5]$$

### **3. Pomiary izolacyjności akustycznej ścian w salach szkoły muzycznej.**

#### **3.1. Zakres pomiarów i opis przeprowadzonych pomiarów**

Pomiary przeprowadzono w celu weryfikacji, czy zawarte w normach wymagania dotyczące izolacyjności przegród w szkołach tradycyjnych są wystarczające w aspekcie komfortu nauczania gry na instrumentach w szkołach muzycznych. Przedmiotem pomiarów izolacyjności akustycznej były ściany i drzwi w salach do prób w jednej ze szkół muzycznych.

Pomiary wykonano na podstawie normy PN-EN ISO 140-4 [1]. Norma ta dokładnie określa pozycję mikrofonu, ilość pomiarów w zależności od rodzaju źródła dźwięku i mikrofonu, czas trwania pomiaru (dla mikrofonu ruchomego min.15 s) oraz pozycję głośnika. Do pomiarów wykorzystano źródło dźwięku wszechkierunkowe oraz mikrofon ruchomy. Czas prowadzenia pojedynczego pomiaru wyniósł 30 s.



Rys. 1 Rzut pomieszczeń (sale do prób indywidualnych)

Fig. 1. Ground plan of premises

Na rysunku nr 1 pokazano zakres przeprowadzonych badań: cztery sale do prób indywidualnych (0.21, 0.22 i 0.11, 0.12), pogrupowane po dwie, połączone przedsionkiem. Wymiary rzutu pomieszczenia 2,75m x 3,8m; wysokość 3,23 m.

Ściany pomiędzy poszczególnymi pomieszczeniami wykonane są z bloczków silikatowych grubości 24 cm. Wartość izolacyjności akustycznej deklarowana przez producenta bloczków silikatowych  $R_{AIR} = 54$  dB. Wartość ta nie uwzględnia przeniesienia bocznego dźwięku.

Drzwi z przedsionka do poszczególnych salek są o podwyższonej klasie izolacyjności akustycznej. Drzwi pomiędzy korytarzem a przedsionkiem to drzwi płytowe z prześwitem u dołu (brak progu).



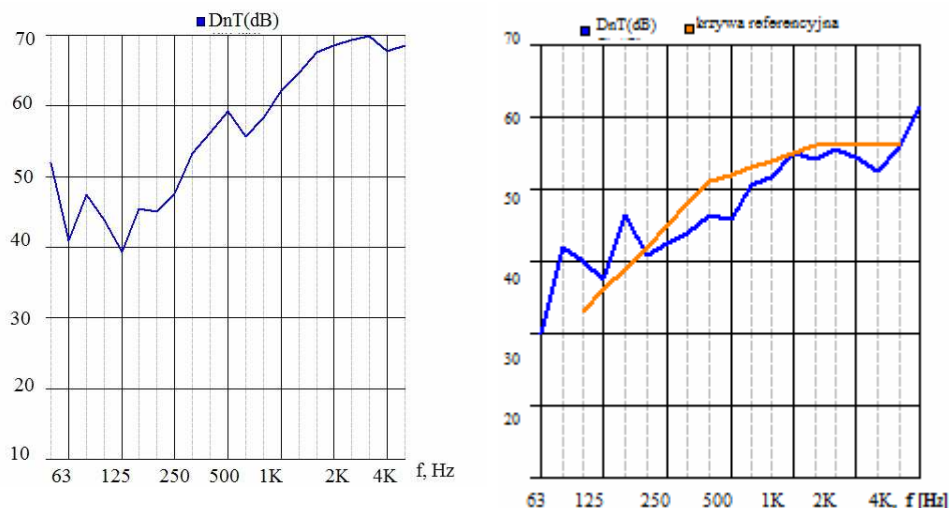
Rys. 2. Zdjęcie salki do prób indywidualnych nr 021

Fig. 2. Picture the individual rehearsal room 021

### 3.2. Wyniki pomiarów

Tablica 1 przedstawia wyniki pomiarów dla ścian pomiędzy pomieszczeniami do prób nauki muzyki. Pomieszczenia 011 i 022, w odróżnieniu od sal 021 i 022, nie są połączone wspólnym przedsionkiem.

Za pomocą programu dBbati wyznaczono wartość wskaźnika izolacyjności akustycznej ścian i drzwi. (Tabela 1)



Rys.3. Wyniki izolacyjności akustycznej przybliżonej dla ściany pomiędzy salami 022 i a) 011 i b) 021

Fig 3. The results of acoustic insulation for walls between rooms 022 i a) 011 i b) 021

Tabela. 1. Wyniki izolacyjności akustycznej przybliżonej

Table 1. The results of acoustic insulation for walls

Opis przegrody	Wynik pomiarów	Wskaźnik oceny izolacyjności akustycznej przybliżonej, dB	Wymagania normowe dla szkół tradycyjnych [2], dB
ściana pomiędzy salką 011 a 012	$R'_{w}(C;Ctr) = 52(-1,-4)$	$R'_{A1} = 51$	45
ściana pomiędzy salką 021 a 022	$R'_{w}(C;Ctr) = 52(-1,-4)$	$R'_{A1} = 51$	45
ściana pomiędzy salką 011 a 022	$R'_{w}(C;Ctr) = 60(-2,-6)$	$R'_{A1} = 58$	45
ściana z drzwiami pomiędzy przedsionkiem a salką 021	$D_{nT,w}(C;Ctr) = 35 (-1,-1)$	$D_{nT,A1} = 34$	25 (dla drzwi)
ściana z drzwiami pomiędzy przedsionkiem a salką 022	$D_{nT,w}(C;Ctr) = 34 (-1,-1)$	$D_{nT,A1} = 33$	25(dla drzwi)
ściana z drzwiami pomiędzy korytarzem głównym a przedsionkiem	$D_{nT,w}(C;Ctr) = 22 (-1,-1)$	$D_{nT,A1} = 21$	
dwie ściany z drzwiami pomiędzy korytarzem głównym a salką 022	$D_{nT,w}(C;Ctr) = 53 (-1,-3)$	$D_{nT,A1} = 52$	

### 3.3. Analiza wyników

Izolacyjność akustyczna dla ściany pomiędzy salą a przedsionkiem jest zdeterminowana przez izolacyjność od dźwięków powietrznych drzwi osadzonych w tej ścianie. Według wytycznych producenta są to drzwi o podwyższonej izolacyjności akustycznej. Pomiar wykazały, że są spełnione wytyczne dla sal lekcyjnych (minimum 25 dB) [2].

Izolacyjność akustyczna zarówno ścian pomiędzy salami jak i ścian z drzwiami prowadzącymi do przedsionka spełniają wszystkie wymagania dotyczące izolacyjności od dźwięków powietrznych zawartych w normie PN-B-02151-3 dla szkół tradycyjnych [2].

Pomimo spełnienia warunków dotyczących izolacyjności od dźwięków powietrznych dla ścian analizowanych pomieszczeń, komfort akustyczny w tych salach nie jest wystarczający. Obserwacje oraz wywiad z użytkownikami sal wskazuje na wzajemne zakłócenia dźwięków w przypadku jednoczesnego korzystania z sąsiadujących sal.

Norma zawiera jedynie wymagania dotyczące izolacyjności akustycznej w odniesieniu do sal lekcyjnych, w których dźwięki generowane są przez mówiącego nauczyciela. W salach lekcyjnych specjalistycznych np. do nauki gry na instrumentach lub nauki śpiewu generowane dźwięki mają zdecydowanie inny charakter i są znacznie głośniejsze,.

Przykładowe poziomy dźwięku emitowane przez poszczególne instrumenty [4]: pianino 60-90 dB, głośne pianino 70-105 dB, skrzypce 80-90 dB, wiolonczela 80-104 dB, kontrabas 70-94 dB, klarnet 68-82 dB, obój 74-102 dB, flet piccolo 96-112 dB, puzon 90-106 dB, bęben basowy 74-94 dB, śpiewak 70-85 dB.

Dopuszczalny poziom dźwięku A w pomieszczeniach typu klasy i pracowni szkolne zgodnie z normą PN-B-02151-2 [3] nie powinien przekraczać 40 dB (od wszystkich źródeł hałasu) [3]. To są warunki, w których można się komfortowo uczyć. Do sal przeznaczonych dla muzyki nie określono wymagań. Poziom natężenia dźwięku generowanego przez większość instrumentów muzycznych przekracza 90 dB. Biorąc pod uwagę izolacyjność ściany 51 dB (pomiędzy salami z tym samym przedsionkiem), w sąsiednim pokoju nie zostanie zapewniony komfort akustyczny odpowiedni dla nauki gry na instrumentach.

Inaczej wygląda sytuacja w przypadku salek 011 i 022 nie mających wspólnego przedsionka. Tam izolacyjność akustyczna ściany wynosi 58 dB. Wówczas warunki do gry na instrumentach można uznać za dobre.

Kolejnym elementem analizy w aspekcie izolacyjności akustycznej było określenie wpływu przedsionka na warunki akustyczne w salach prób. Ściana z drzwiami rozdzielająca salę od przedsionka ma izolacyjność na poziomie 33-34dB, która spełnia podstawowe wymagania. Izolacyjność od dźwięków powietrznych ściany z drzwiami pomiędzy przedsionkiem a korytarzem głównym jest na niskim poziomie (21dB). Pomimo tego uwzględnienie dodatkowej prze-

strzeni przed salami skutkuje znacznym zwiększeniem izolacyjności od dźwięków generowanych na korytarzu głównym (52dB).

#### 4. Wnioski

Izolacyjność akustyczna ścian i drzwi sal w przypadku badanej szkoły muzycznej spełnia warunki normowe w odniesieniu do tradycyjnych pomieszczeń lekcyjnych. Normy niestety nie podają minimalnej izolacyjności przegród w przypadku sal przewidzianych do nauki muzyki. Autorzy wskazują, że odniesienie wymagań izolacyjności akustycznej tego typu obiektów do wymagań normowych dla tradycyjnych sal lekcyjnych jest podejściem błędnym, nie wystarczającym do zapewnienia komfortu akustycznego. W związku z powyższym autorzy artykułu postulują konieczność stworzenia takich wymagań normowych, aby szkoły muzyczne i inne temu podobne instytucje, zapewniały komfort nauki gry na instrumentach i śpiewu.

Architekci nie mając wytycznych do projektowania sal przeznaczonych dla muzyki, projektują przegrody odnosząc się do sal lekcyjnych. Z przeprowadzonej analizy wynika, że nie jest to wystarczające.

W badanej szkole muzycznej zaprojektowanie przedsionków było właściwym rozwiązaniem, skutkującym znacznym zwiększeniem izolacyjności od dźwięków powietrznych generowanych na korytarzu. Ochrona od dźwięków generowanych w sąsiedniej sali jest zbyt niska – nie stwarza warunków komfortowych do nauki muzyki. Gdyby każda salka miała swój osobny przedsionek, sytuacja wyglądała by znacznie lepiej.

#### Literatura

- [1] PN-EN ISO 140-4 z 2000 r. Pomiar izolacyjności akustycznej w budynkach izolacyjności akustycznej elementów budowlanych - od dźwięków powietrznych.
- [2] PN-B-02151-3 z 1999 r. Ochrona przed hałasem w budynkach – Izolacyjność akustyczna przegród w budynkach oraz izolacyjność akustyczna elementów budowlanych.
- [3] PN-B-02151-2 z 1987 r. Dopuszczalne wartości poziomu dźwięku w pomieszczeniach.
- [4] mgr inż. Emil Kozłowski z Zakładu Zagrożeń Wibroakustycznych Centralnego Instytutu Ochrony Pracy <http://www.sprawynauki.edu.pl>
- [5] dr hab. inż. prof. ITB Barbara Szudrowicz „Budownictwo ogólne” tom 2 fizyka budowlanej rozdział 8.
- [6] ISO 717-1 z 2013 r. Acoustics - Rating of sound insulation in buildings and of building elements - Part 1: Airborne sound insulation



## ACOUSTIC TESTS OF THE INSULATION PROVIDED BY THE BARRIERS LOCATED IN A REHEARSAL ROOM OF THE MUSIC SCHOOL

### Summary

The article contains the results of acoustic tests of the insulation provided by the barriers located in a rehearsal room of the music school. The analysis of the results was carried out in relation to the current legislation and to the relative comfortable feeling. To check whether the requirements for the barrier insulation that are included in the standards are sufficient for the comfortable learning to play instruments, measurements were made of sound insulation of the walls and doors in the rehearsal hall in one of the music schools. Another element of the analysis in aspect of sound insulation was to determine the effect of the atrium on the acoustic rehearsal rooms. The sound insulation in both the walls between the rooms and the walls with a door leading to the vestibule meet all the requirements for airborne sound insulation but only in relation to traditional schools. Despite the fact that the airborne sound insulation of the walls in the rooms fulfilled the requirements of the standards, the acoustic comfort in these rooms was not preserved. The observations and the interview with room occupants have shown the presence of sound disruptions in cases where adjacent rooms are simultaneously used. Therefore, there is a need to define standards for music schools and other similar institutions, in order to provide comfort to learn to playing instruments and singing.

In the music school where the investigations were conducted, the creation of a vestibule in each room was the right solution that significantly increased the insulation from the airborne sound generated in the hallway. The protection against the sounds generated in the adjacent rooms is too low – it does not ensure comfortable conditions for learning music. If every room had its separate vestibule, the situation would look much better.

**Keywords:** acoustic insulation, sound pressure, sound intensity, decibel, reverb

DOI:10.7862/rb.2014.119

*Przesłano do redakcji: 19.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 22.12.2014 r.*

Agata ZDYB<sup>1</sup>  
Piotr LICHOGRAJ<sup>2</sup>

## ANALIZA MORFOLOGII ELEKTROD STOSOWANYCH W BARWNIKOWYCH OGNIWACH SŁONECZNYCH

W pracy przeprowadzono badania mikroskopowe warstw nanocząstek ditlenku tytanu ( $\text{TiO}_2$ ) osadzonych na szkle. Tego typu struktury stosowane są jako pokrycia oświetlanej elektrody w barwnikowych ogniwach słonecznych. W budowie i funkcjonowaniu ogniwa elektroda ta jest najważniejszym elementem. Składa się ona ze szkła z warstwą przewodzącą ITO (indium tin oxide) oraz naniesionych na nią nanocząstek  $\text{TiO}_2$  z zaadsorbowanymi na powierzchni cząsteczkami barwnika organicznego. Warstwa nanocząstek, dzięki temu, że jest mezoporowata, zwiększa powierzchnię czynną w absorpcji światła. Ditlenek tytanu absorbuje promieniowane słoneczne jedynie w nadfiolecie. Zastosowanie barwnika zapewnia absorpcję światła w szerszym zakresie widma. W pracy, warstwy ditlenku tytanu otrzymywano po rozproszaniu nanocząstek różnych rodzajów z dodatkiem kwasu octowego lub  $\alpha$ -terpineolu. Otrzymane struktury były wygrzewane w temperaturze  $450^\circ\text{C}$  w celu uzyskania lepszego kontaktu między nanocząstkami i poprawy trwałości warstwy. Do obrazowania warstw wykorzystany został mikroskop sił atomowych oraz skaningowy mikroskop elektronowy. Urządzenia te pozwalają uzyskać rozdzielczości odpowiednio: ok. 20 nm i  $0,2\ \mu\text{m}$ . Zastosowanie nanocząstek pochodzących z firmy Sigma Aldrich oraz EasyChem pozwoliło na otrzymanie jednorodnych warstw o rozmiarach aglomeratów  $0,2\text{-}0,3\ \mu\text{m}$ . Wykorzystanie nanocząstek z firmy Degussa, często opisywane w literaturze, nie dało zadowalających rezultatów przy zastosowaniu przedstawionych w pracy metod przygotowania zawiesiny. Naniesienie barwnika organicznego (alizaryny) na badane powierzchnie warstw nanocząstek nie zmienia w znaczącym stopniu uzyskanych obrazów mikroskopowych.

**Słowa kluczowe:** nanocząstki, ditlenek tytanu, mikroskopia sił atomowych, skaningowa mikroskopia elektronowa

<sup>1</sup> Autor do korespondencji: Agata Zdyb, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel./fax: (+081) 53 81 997, tel: (+081) 538 4747, a.zdyb@pollub.pl

<sup>2</sup> Piotr Lichograj, Państwowa Szkoła Wyższa im. Papieża Jana Pawła II w Białej Podlaskiej, Wydział Nauk Ekonomicznych i Technicznych, Biała Podlaska 21-500, ul. Sidorska 95/97, p.lichograj@gmail.com

## 1. Wstęp

Konwersja promieniowania słonecznego na energię elektryczną, możliwa dzięki technologiom fotowoltaicznym, posiada szeroki potencjał zastosowań, które mogą mieć w przyszłości znaczny udział w rozwiązywaniu problemów energetycznych na świecie. Obecnie rynek fotowoltaiczny zdominowany jest przez ogniwa oparte na półprzewodnikowym złączu p-n, które są ciągle zbyt drogie na szerokie rozpowszechnienie. Moduły wykorzystujące krystaliczny Si mają 80% udziałów w rynku, a cienkowarstwowe z CdTe i  $\text{CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$  – pozostałe 20%. Tanią i przyjazną środowisku alternatywę w stosunku do ogniw tradycyjnych stanowią barwnikowe ogniwa słoneczne (DSSC – dye sensitized solar cells) należące do ogniw fotoelektrochemicznych [1]. Badania prowadzone intensywnie w kilku ośrodkach na świecie doprowadziły ostatnio do osiągnięcia wydajności 15% przez ogniwa DSSC, w których ciekły elektrolit został wyeliminowany, a wprowadzono związek o strukturze perowskitu [4]. Ogniwa barwnikowe, zarówno te wykorzystujące elektrolit jak i te zbudowane wyłącznie z materiałów stałych, cechuje prosta konstrukcja. Zasadniczym elementem tych ogniw jest elektroda pokryta mezoporowatą warstwą nanocząstek ditlenku tytanu z zaadsorbowanymi na powierzchni cząsteczkami barwnika organicznego. Warstwa nanocząstek ma rozwiniętą powierzchnię czynną w absorpcji i pełni rolę w separacji nośników ładunku, a barwnik pełni rolę sensybilizatora absorbującego światło z zakresu widzialnego. Typowo warstwy  $\text{TiO}_2$  stosowane w ogniwach barwnikowych mają grubość 5-20  $\mu\text{m}$  i porowatość 50-65% przy rozmiarze nanocząstek 15-20 nm. Parametry tych warstw wpływają bezpośrednio na wydajność ogniw, w związku z tym rozwijane są różne metody nanoszenia nanocząstek, wygrzewania warstw i adsorpcji barwników [5].

W prezentowanej pracy przedstawiono kilka wariantów otrzymywania warstw nanocząstek ditlenku tytanu przeznaczonych do zastosowania w barwnikowych ogniwach słonecznych. Otrzymane struktury były analizowane przy wykorzystaniu metod mikroskopowych.

## 2. Metodyka badań

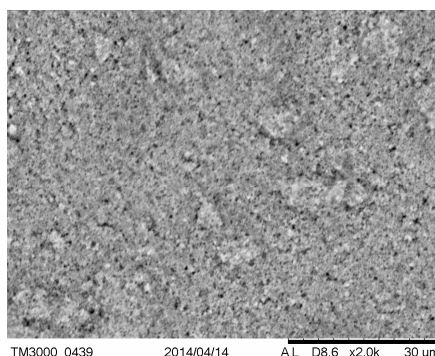
Nanocząstki  $\text{TiO}_2$  użyte do nanoszenia warstw pochodziły z trzech różnych firm: Sigma-Aldrich, Degussa oraz EasyChem (występują jako produkt spożywczy oznaczany symbolem E171). Nanocząstki we wszystkich trzech przypadkach miały postać białego proszku, który wymagał mechanicznego rozdrobnienia i utarcia w moździerzu. Do nanocząstek dodawany był spotykan w opisach literaturowych  $\alpha$ -terpineol [3] oraz kwas octowy, wybrany ze względu na wykazany we wcześniejszych badaniach udział w zapobieganiu agregacji nanocząstek oraz korzystny wpływ na przekaz ładunku elektrycznego w ogniwach DSSC [2]. Powstała po rozdrobnieniu masa była nakładana na szkło, a następ-

nie wygrzewana w temperaturze 450°C przez 45 min. w celu uzyskania dobrego kontaktu między nanocząstkami. Adsorbowanym na nanocząstkach barwnikiem organicznym była alizaryna zakupiona w Sigma Aldrich.

Obrazowanie warstw zostało przeprowadzone przy zastosowaniu mikroskopu sił atomowych (AFM – atomic force microscope) typ NT-MDT (Semi-contact, Tip NSG-03) oraz skaningowego mikroskopu elektronowego (SEM – scanning electron microscope) Hitachi TM3000 (15 kV, Tryb COMPO).

### 3. Morfologia warstw

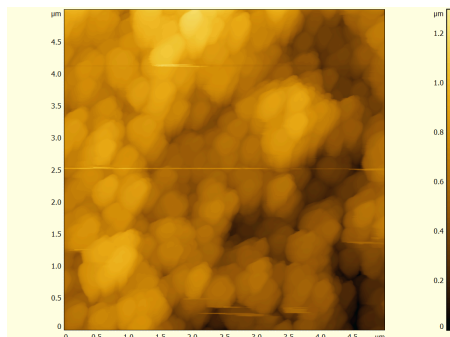
W pracy zaprezentowane są przykładowe obrazy mikroskopowe wybrane spośród wielu różnych uzyskanych przy pomocy AFM i SEM. Warstwy otrzymane z nanocząstek zakupionych w firmie Easychem oraz w Sigma Aldrich charakteryzuje jednorodna struktura, która jest makroskopowo dość równa, ale złożona jest z aglomeratów nanocząstek o tym samym rozmiarze i dość równomiernym rozkładzie porów. Obrazy otrzymane przy pomocy SEM są niemal takie same dla warstw wytworzonych z tych dwóch rodzajów nanocząstek (rys. 1). Wszystkie warstwy przedstawione na obrazach zostały otrzymane po nanieśieniu nanocząstek TiO<sub>2</sub> rozproszonych w kwasie octowym. Próby z  $\alpha$ -terpineolem nie dały zadowalających rezultatów ponieważ powstałe warstwy posiadały wiele grudek o makroskopowych rozmiarach i nie były jednorodne.



Rys. 1. Obraz SEM warstwy nanocząstek TiO<sub>2</sub> z firmy EasyChem

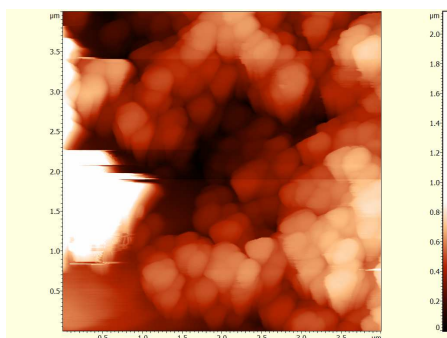
Fig. 1. SEM image of layer consisting of TiO<sub>2</sub> nanoparticles from EasyChem

W obrazowaniu przy pomocy AFM, które pozwala uzyskać lepszą rozdzielczość, widoczne są różnice w strukturze powierzchni warstw nanocząstek firmy EasyChem i Sigma Aldrich. W pierwszym przypadku na powierzchni widoczne są aglomeraty o rozmiarze ok. 300 nm, których kształt i wielkość nie ulega zmianie także po adsorpcji barwnika – alizaryny (rys. 2, 3). W przypadku drugim aglomeraty są nieco mniejsze, ok. 200 nm, a po adsorpcji barwnika widoczne są pojedyncze nanocząstki o rozmiarze ok. 30 nm (rys. 4, 5).



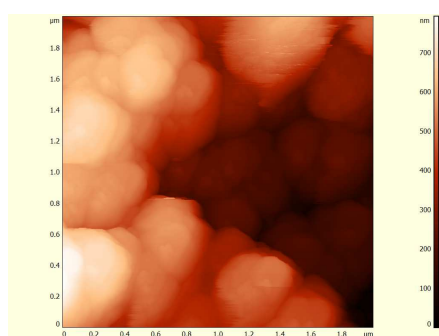
Rys. 2. Obraz AFM warstwy nanocząstek  $\text{TiO}_2$  z firmy EasyChem

Fig. 2. AFM image of layer consisting of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles from EasyChem



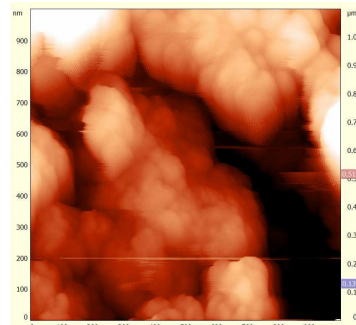
Rys. 3. Obraz AFM warstwy nanocząstek  $\text{TiO}_2$  z firmy EasyChem z zaadsorbowanymi cząsteczkami alizaryny

Fig. 3. AFM image of layer consisting of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles from EasyChem with adsorbed alizarin molecules



Rys. 4. Obraz AFM warstwy nanocząstek  $\text{TiO}_2$  z firmy Sigma Aldrich

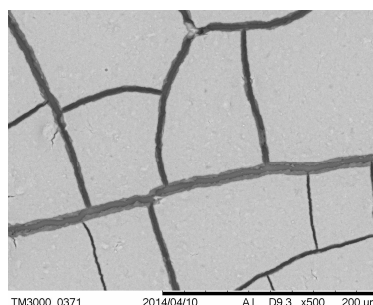
Fig. 4. AFM image of Sigma Aldrich  $\text{TiO}_2$  nanoparticles layer



Rys. 5. Obraz AFM warstwy nanocząstek  $\text{TiO}_2$  z firmy Sigma Aldrich z zaadsorbowanymi cząsteczkami alizaryny

Fig. 5. AFM image of Sigma Aldrich  $\text{TiO}_2$  nanoparticles layer with adsorbed alizarin molecules

Nanocząstki pochodzące z firmy Degussa nie sprawdziły się dobrze w naszych eksperymentach z powodu trudności w uzyskaniu gładkiej masy podczas rozpuszczania w rozpuszczalniku. W tym przypadku, po wygrzaniu, warstwy  $\text{TiO}_2$  były popękane (rys. 6) i wskutek tego powstały wyraźnie oddzielone od siebie obszary nie mające ze sobą kontaktu elektrycznego. Otrzymana struktura nie jest więc odpowiednia do zastosowań w ogniwach barwnikowych i nie była dalej badana.



Rys. 6. Obraz SEM warstwy nanocząstek  $\text{TiO}_2$  z firmy Degussa

Fig. 6. SEM image of layer consisting of  $\text{TiO}_2$  nanoparticles from Degussa

#### 4. Podsumowanie i wnioski

Obrazowanie przy pomocy mikroskopii AFM i SEM pozwala stwierdzić, że nanocząstki  $\text{TiO}_2$  pochodzące z firmy Sigma Aldrich oraz EasyChem po zmieszaniu z kwasem octowym dają jednorodną, nie popękaną warstwę o mikroporowatej strukturze (podobne do siebie w obu przypadkach), złożone z obiektów o rozmiarach 0,2-0,3  $\mu\text{m}$ , które są aglomeratami nanocząstek. Adsorpcja barwnika na powierzchni nanocząstek nie zmienia znacząco porowatej struktury. Elektrody pokryte tego typu warstwami są odpowiednie do zastosowań w ogniwach barwnikowych.

Warstwy nanocząstek TiO<sub>2</sub> z firmy Degussa, w przeprowadzonych eksperymentach miały, po wygrzaniu, popękaną strukturę, co wyklucza wykorzystanie ich w ogniwach typu DSSC.

### Literatura

- [1] Grätzel M.: Photoelectrochemical cells, *Nature*, 414, 2001, pp. 338-344.
- [2] Krawczyk S., Zdyb A.: Electronic Excited States of Carotenoid Dyes Adsorbed on TiO<sub>2</sub>, *J. Phys. Chem. C* 115, 2011, pp. 22328-22335.
- [3] Negishi N., Takeuchi K.: Preparation of photocatalytic TiO<sub>2</sub> transparent thin film by thermal decomposition of Ti-alkoxide with  $\alpha$ -terpineol as a solvent, *Thin Solid Films* 392, 2001, pp. 249-253.
- [4] Snaith H.J., Perovskites: The Emergence of a New Era for Low-Cost, High-Efficiency Solar Cells, *J. Phys. Chem. Lett.*, 4, 2013, pp. 3623-3630.
- [5] Syrokostas G., Giannouli M., Yianoulis P.: Effects of paste storage on the properties of nanostructured thin films for the development of dye-sensitized solar cells, *Renewable Energy* 34, 2009, pp. 1759-1764.

## THE ANALYSIS OF MORFOLOGY OF ELECTRODES USED IN DYE-SENSITIZED SOLAR CELLS

### Summary

The paper presents microscopic study of the titanium dioxide nanoparticles layers deposited on glass plates. This type of structures finds application as illuminated electrode coatings in dye-sensitized solar cells. Dye-sensitized solar cells (DSSC) have many advantages and their efficiency reached 12%, the same value as for amorphous silicon cells that are very popular in the photovoltaic market. The main part of the structure of DSSC that influences the performance of the cell is illuminated electrode which consists of glass plate with conducting ITO (indium tin oxide) layer and titanium dioxide nanoparticles covered by dye molecules. The mesoporous nanoparticle layer has high surface to volume ratio and enhances the process of light absorption. Titanium dioxide, which absorbs only ultraviolet part of solar radiation is sensibilized by dye to visible light. In this work, titanium dioxide layers were obtained by spreading of different kinds of nanoparticles (coming from various sources) in acetate acid or  $\alpha$ -terpineol. The obtained structures were annealed in the temperature of 450°C in order to achieve better contact between nanoparticles and increase durability of the layers. The atomic force microscope and scanning electron microscope were used to obtain images of the surface. These two devices allow gaining resolution of 20 nm i 0,2  $\mu$ m respectively. The homogenous layers of 0,2-0,3  $\mu$ m agglomerates were obtained by using edible nanoparticles and the ones from Sigma Aldrich. Using of nanoparticles from Degussa, often described in the literature, and applying presented in this work methods of colloid preparation did not provide satisfactory results

**Keywords:** nanoparticles, titanium dioxide, atomic force microscopy, scanning electron microscopy

DOI:10.7862/rb.2014.120

*Przesłano do redakcji: 22.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 22.12.2014 r.*

Kinga ZĘBALA<sup>1</sup>

## KOMPENSACJA MOCY BIERNEJ SPOSOBEM NA OBNIŻENIE RACHUNKÓW ZA ENERGIĘ ELEKTRYCZNĄ

W niniejszym artykule podjęto temat energooszczędności w zakładach pracy, w których wykorzystywane są maszyny, a co za tym idzie, bardzo duże zużycie energii. Cena energii elektrycznej jest coraz wyższa, a kolejne regulacje prawne i wzrost kosztów paliw nie wróżą zmiany tej sytuacji, dlatego warto już dziś zastanowić się czy można obniżyć ilość zużywanej energii elektrycznej i jej koszty. Rozwiązaniem tego problemu mogą stać się baterie kondensacyjne, dzięki którym można będzie mocno ograniczyć opłaty za energię bierną. Moc bierną pobierają wszystkie urządzenia indukcyjne. Jednak najwięcej: silniki asynchroniczne (zwłaszcza te pracujące na biegu jałowym), słabo obciążone transformatory, spawarki, zgrzewarki. Niestety przepływ mocy biernej ma też ujemne skutki. Jej przepływ od źródła do odbiornika obciąża prądowo kable i linie, zmniejszając ich przepustowość, wywołując dodatkowe spadki napięć i powodując straty mocy czynnej. Dlatego też dostawcy energii elektrycznej wymagają ograniczania poboru mocy biernej.

Istotna jest również kompensacja mocy biernej polegająca na jej wytworzeniu w miejscu zapotrzebowania przy pomocy kompensatora synchronicznego lub baterii kondensatorów. Dzięki temu nie trzeba jej przesyłać od wytwórcy do odbiorcy, dzięki czemu tymi samymi liniami elektroenergetycznymi można przesłać większą moc czynną.

Najistotniejszą sprawą przy zakupie baterii jest jej właściwy dobór. Od właściwego doboru baterii zależy jak długo będzie ona prawidłowo pracować. Źle dobrana bateria szybko ulegnie awarii, a nawet może stanowić zagrożenie, dlatego ważne jest, aby doborem baterii zajęli się specjaliści. Aby prawidłowo dobrać baterię najpierw przeprowadzany jest pomiar profilu mocy oraz odkształceń. Na jego podstawie określa się moc urządzenia, typ i inne istotne parametry.

**Słowa kluczowe:** kompensacja, moc bierna, moc czynna, kondensator, energooszczędność

---

<sup>1</sup> mgr inż. Kinga Zębala, Instytut Materiałów i Konstrukcji Budowlanych, Wydział Inżynierii Lądowej Politechniki Krakowskiej.



## 1. Wstęp

W ostatnich latach tematem przewodnim w budownictwie stało się budownictwo energooszczędne, pasywne czy wręcz zeroenergetyczne. Pojawiły się nowe technologie budowania domów. Idea ta znajduje również swoje odzwierciedlenie w przepisach prawnych. Wiele mówi się o tym jak powinny być skonstruowane ściany budynku, aby straty ciepła były jak najmniejsze, i aby jak najmniej energii zużyć na ogrzanie budynku. Niewiele jednak mówi się do tej pory o tym, w jaki sposób oszczędzać energię w zakładach pracy, zwłaszcza w tych, w których wykorzystuje się maszyny i dużo oświetlenia, a co za tym idzie, zużywa się bardzo dużo energii. Praktycznie w każdym przedsiębiorstwie, zakładzie produkcyjnym i biurcu możliwe jest ograniczenie zużycia energii elektrycznej bez szkody dla normalnego funkcjonowania obiektu. Cena energii elektrycznej jest coraz wyższa, a kolejne regulacje prawne i wzrost kosztów paliw nie wróżą zmiany tej sytuacji, dlatego warto już dziś zastanowić się czy można obniżyć ilość zużywanej energii elektrycznej i jej koszty. Warto, zatem poruszyć tu temat kompensacji mocy biernej.

## 2. Kompensacja mocy biernej [3] [4]

Moc, czyli energia bierna indukcyjna występuje tylko w obwodach prądu zmiennego. Przepływa ona między źródłem a odbiornikiem. Potrzebna jest do wzbudzania zmiennych pól magnetycznych silników, magnesowania rdzeni transformatorów oraz ładowania pojemności linii przesyłowych napowietrznych i kablowych. Energia bierna nie jest zamieniana na pracę, jednak jest ona często niezbędna do jej wykonania i urządzenia muszą ją pobierać.

Moc bierną pobierają wszystkie urządzenia indukcyjne. Jednak najczęściej: silniki asynchroniczne (zwłaszcza te pracujące na biegu jałowym), słabo obciążone transformatory, spawarki, zgrzewarki. Energię bierną mogą pobierać również urządzenia elektryczne zasilane napięciem przemiennym poza energią czynną. Energia bierna potrzebna jest do wytworzenia pola magnetycznego w silnikach, transformatorach, dławikach, lub pola elektrycznego w kondensatorach i innych pojemnościach, np. kabli. Pobierają ją również odbiorniki nieliniowe, np. świetlówki kompaktowe, których prąd przesunięty jest w czasie względem napięcia zasilającego lub nie jest sinusoidą.

Niestety przepływ mocy biernej ma też ujemne skutki. Jej przepływ od źródła do odbiornika obciąża prądowo kable i linie, zmniejszając ich przepustowość, wywołując dodatkowe spadki napięć i powodując straty mocy czynnej. Dlatego też dostawcy energii elektrycznej wymagają ograniczania poboru mocy biernej. Ponieważ zarabiają oni na dostarczonej do odbiorcy energii czynnej zależy im, aby mogli przesyłać jak największą ilość tej energii, przy jednocześnie jak najmniejszych jej stratach i zachowaniu wymaganych parametrów. O ilości strat decyduje prąd, jaki płynie przez elementy sieci, a jego wartość zależy od parametru zwanego mocą pozorną i oznaczanego jako  $S$ .

$$S = \sqrt{3} * U * I \quad (1)$$

gdzie:

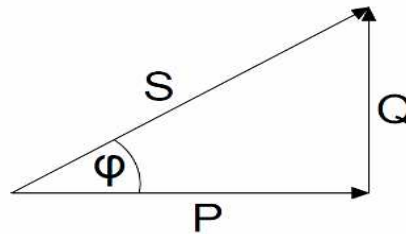
U - wartość skuteczna napięcia

I - wartość skuteczna natężenia prądu

Moc pozorna jest sumą geometryczną mocy czynnej P i mocy biernej Q:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2)$$

Na rysunku nr 1 pokazano graficzną interpretację zależności pomiędzy mocami, tzw. trójkąt mocy:



Q - moc bierna  
S - moc pozorna  
P - moc czynna  
φ - kąt przesunięcia fazowego

Rys. 1. Trójkąt mocy [3]

Fig. 1. The triangle of powers [3] where:

Q - reactive power;

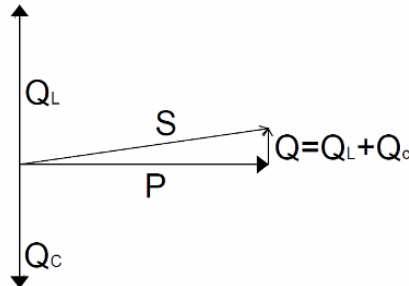
S - apparent power;

P - real power;

φ - the angle of difference (in degrees) between current and voltage

Optymalnie byłoby, gdyby moc pozorna S była równa mocy czynnej P, czyli moc bierna Q miałaby wartość 0. Aby to uzyskać stosuje się kompensację mocy biernej, polegającą na zrównoważeniu pobieranej przez odbiorniki mocy biernej, mocą bierną o tej samej lub zbliżonej wartości, lecz przeciwnym znaku.

Na rysunku nr 2 pokazano graficzną ilustrację kompensacji mocy biernej. W efekcie kompensacji, wypadkowa moc bierna pobierana z sieci jest o wiele niższa niż bez zastosowania kompensacji.



$Q_L$  - moc bierna indukcyjna pobierana, np. przez silniki  
 $Q_C$  - moc bierna pojemnościowa pobierana przez kondensatory  
 $S$  - moc pozorna  
 $P$  - moc czynna

Rys. 2. Kompensacja mocy biernej [3]

Fig. 2. Reactive power compensation [3] where:

$Q$  – reactive power;  
 $Q_L$  – induction reactive power consumed eg. by engines;  
 $Q_C$  – capacity reactive power absorbed by capacitor;  
 $S$  - apparent power;  
 $P$  – real power

W praktyce, nie ma konieczności kompensacji mocy biernej aż do zera, ponieważ przy małej wartości kąta przesunięcia fazowego  $\varphi$  wzrost prądu jest niewielki w stosunku do sytuacji, gdy pobierana byłaby tylko moc czynna. Straty mocy w liniach w tym przypadku rosną nieznacznie. Wraz ze wzrostem kąta prąd narasta coraz szybciej. Dlatego przyjęto umowną granicę, przy której straty są stosunkowo niewielkie i akceptowalne, i określono ją tangensem kąta przesunięcia fazowego  $\varphi$  równym 0,4 [1].

Ważne staje się ograniczenie poboru mocy biernej przez odpowiedni dobór obciążenia dla transformatorów, ograniczenie pracy silników na biegu jałowym, ograniczenie pracy spawarek i zgrzewarek na biegu jałowym oraz właściwy remont silników.

Istotna jest również kompensacja mocy biernej polegająca na jej wytworzeniu w miejscu zapotrzebowania przy pomocy kompensatora synchronicznego lub baterii kondensatorów. Dzięki temu nie trzeba jej przesyłać od wytwórcy do odbiorcy, dzięki czemu tymi samymi liniami elektroenergetycznymi można przesłać większą moc czynną.

### 3. Baterie kondensatorów [3]

Bateria kondensatorów jest urządzeniem służącym do kompensacji mocy biernej indukcyjnej. Zazwyczaj składa się ona z kilku członów kondensatorowych, regulatora oraz osprzętu pomocniczego. W zależności od zapotrzebowania na moc bierną regulator automatycznie załącza odpowiednią ilość członów, aby utrzymać współczynnik mocy cosinus  $\phi$  (cos  $\phi$ ) na wymaganym poziomie. Człon kondensatorowy składa się z kondensatora energetycznego, stycznika, zabezpieczeń oraz dławika odstrajającego (w niektórych typach baterii).



Rys. 3. Człony kondensatorowe (o różnej pojemności), będące "sercem" każdej baterii do kompensacji mocy biernej.

Fig. 3. Modules of capacitors (with various capacity) which are the 'heart' of each battery used for reactive power compensation.

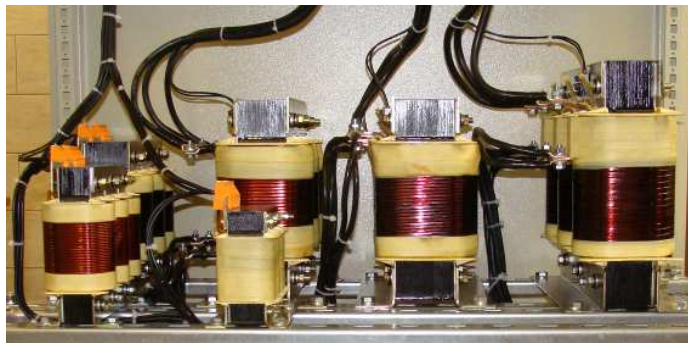
Baterie kondensatorów "wytwarzają" moc bierną pojemnościową (kompensującą moc bierną indukcyjną), której jednostką jest "kilowar" (kVAr).

Zastosowanie baterii kondensatorów jest sprawdzonym rozwiązaniem, jednak stosowanym do niedawna tylko w średnich i dużych zakładach przemysłowych, co wynikało z faktu, że tylko tacy odbiorcy byli rozliczani za ponad umowny pobór energii biernej. Pojawienie się nowoczesnych elektronicznych liczników energii elektrycznej spowodowało, że rozliczeniem za energię bierną indukcyjną zostali objęci również mniejsi odbiorcy. Skuteczność baterii jest w 100% sprawdzona, a warunkami sukcesu są prawidłowy dobór urządzenia i jego poprawna instalacja. Tak więc baterię kondensatorów (lub kompensator) może zastosować każdy odbiorca, który jest rozliczany za ponad umowny pobór energii biernej indukcyjnej i ponosi z tego tytułu opłaty. Należy jedynie sprawdzić, po jakim czasie inwestycja się zwróci i czy będzie to ekonomicznie opłacalne.

#### 3.1. Rodzaje kondensatorów

Z uwagi na różną charakterystykę sieci i odbiorników w poszczególnych zakładach, stosuje się cztery podstawowe rodzaje baterii kondensatorów:

- Baterie zwykłe - baterie o najprostszej konstrukcji, które mogą być stosowane wyłącznie tam gdzie odkształcenia napięcia i prądu są niewielkie i nie występuje zjawisko rezonansu z siecią. W przypadku zastosowania tego typu baterii w środowisku gdzie te wymagania nie są spełnione bateria bardzo szybko ulega zniszczeniu.
- Baterie wzmocnione - baterie o podobnej konstrukcji jak baterie zwykłe jednak zastosowano w nich kondensatory o podwyższonej wytrzymałości. Dzięki temu można je stosować w środowisku o podwyższonym poziomie odkształceń, nie nadają się jednak do stosowania tam gdzie występuje rezonans baterii z siecią.
- Baterie z łącznikami tyrystorowymi - baterie, w których w miejsce styczników zastosowano łączniki tyrystorowe, dzięki czemu reagują one bardzo szybko na zmiany obciążenia. Ze względu na ich znaczny koszt stosowane wyłącznie tam, gdzie następują bardzo duże zmiany mocy biernej w krótkim czasie i baterie tradycyjne nie dają zadowalających efektów.
- Baterie dławikowe (z dławikami odstrajającymi) - baterie z dodatkowymi dławikami, które chronią kondensatory przed zniszczeniem na skutek odkształceń prądu i napięcia. Można je stosować wszędzie tam gdzie występują znaczne odkształcenia prądu i napięcia oraz istnieje ryzyko wystąpienia rezonansu z siecią.



Rys. 4. Dławiki odstrajające, podłączone w szafie baterii, zmniejszają ilość odkształceń prądu wpływających do poszczególnych członów baterii.

Fig. 4. Batteries with additional glands which protect capacitors from destruction due to deformation of current and voltage

### 3.2. Dobór baterii

Najistotniejszą sprawą przy zakupie baterii jest jej właściwy dobór. Istnieje wiele rodzajów baterii, przeznaczonych do pracy w różnych warunkach, które różnią się zarówno konstrukcyjnie jak i cenowo. Od właściwego doboru baterii zależy jak długo będzie ona prawidłowo pracować. Źle dobrana bateria szybko ulegnie awarii, a nawet może stanowić zagrożenie, dlatego ważne jest, aby do-

borem baterii zajęli się specjaliści. Aby prawidłowo dobrać baterię najpierw przeprowadzany jest pomiar profilu mocy oraz odkształceń. Na jego podstawie określa się moc urządzenia, typ i inne istotne parametry.

Wykonanie pomiaru jest jedyną metodą gwarantującą, że urządzenie będzie pracować bezawaryjnie przez wiele lat i jego moc będzie dobrana optymalnie do potrzeb konkretnego zakładu. Faktura za energię elektryczną może służyć jedynie do określenia orientacyjnych kosztów urządzenia. Nie uzyskamy natomiast na jej podstawie żadnych informacji odnośnie odkształceń prądu, napięcia, zagrożenia rezonansem oraz wymaganego stopniowania.

Zainstalowanie baterii nie wymaga zgody dostawcy energii elektrycznej. Nie ma żadnego wymogu informowania dostawcy o montażu urządzenia. Baterie są całkowicie legalne i nie zaburzają pomiaru energii elektrycznej.

Baterie są całkowicie zautomatyzowane i nie wymagają obsługi. Regulator na podstawie pomiaru łączy człony kondensatorowe o odpowiedniej mocy w taki sposób, aby zapewnić utrzymanie wymaganego współczynnika mocy  $\cos \varphi$  (regulator baterii operuje  $\cos \varphi$ , natomiast fakturze za energię elektryczną podaje się  $\tan \varphi$ ), ze względu na łatwiejsze jego wyliczenie i większą obrazowość). Konieczna jest oczywiście okresowa konserwacja urządzenia polegająca na wymianie filtrów w nawiewach szafy.

Zainstalowanie baterii nie zwiększy poboru energii czynnej. Bateria wytwarza jedynie energię bierną pojemnościową, kompensując tym samym energię bierną indukcyjną pobieraną przez urządzenia odbiorcy. Bateria pobiera niewiele energii czynnej, jednocześnie zmniejszając straty energii w przewodach i transformatorach. Należy więc oczekiwać ze zużycie energii czynnej nie zmieni się lub nieznacznie zmaleje.

W większości przypadków zastosowanie baterii kondensatorów całkowicie eliminuje opłaty za energię bierną indukcyjną. W pozostałych przypadkach uzyskuje się redukcję tych opłat o około 90%.

Wydatki poniesione na zakup i montaż takiej baterii zwracają się często już po kilku miesiącach. Biorąc pod uwagę, że żywotność prawidłowo dobranego urządzenia wynosi co najmniej kilkanaście lat jest to pewna i świetna inwestycja, która w ciągu swojej pracy zwróci się nawet 20-krotnie.

#### **4. Kary za ponad umowny pobór mocy biernej [1] [2]**

W przypadku ponad umownego poboru energii biernej indukcyjnej podstawą do obliczenia kary jest wartość rzeczywistego współczynnika mocy  $\tan \varphi$  (tangens  $\varphi$ ) obliczonego jako iloraz energii biernej do czynnej pobranej w okresie rozliczeniowym. Jeżeli współczynnik mocy jest wyższy niż wymagany współczynnik  $\tan \varphi_0$  (najczęściej 0,4) wówczas opłatę za ponad umowny pobór mocy biernej indukcyjnej oblicza się z następującej zależności [2]:

$$O_b = k \times C_{rk} \times \sqrt{\frac{1 + tg^2\varphi}{1 + tg^2\varphi_0}} - 1 \times A \quad (3)$$

gdzie:

$O_b$  - opłata za nadwyżkę energii biernej w złotych

$k$  - ustalona w taryfie krotność ceny  $C_{rk}$ . Dla odbiorców zasilanych z niskiego napięcia wynosi ona najczęściej 3, a dla odbiorców zasilanych średnim napięciem 1.

$C_{rk}$  - średnia cena sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym na dzień zatwierdzenia taryfy operatora

$tg \varphi_0$  - umowny współczynnik mocy (najczęściej 0,4) [1]

$tg \varphi$  - współczynnik mocy wynikający z pobranej energii biernej

$A$  - energia czynna pobrana całodobowo lub dla strefy czasowej, w której jest prowadzona kontrola poboru energii biernej w okresie rozliczeniowym.

Opłaty za nadmierny pobór energii biernej:

- zwiększają koszty usług dystrybucyjnych energii elektrycznej powodując wzrost średniej ceny;
- mają skłonić odbiorców do podjęcia działań mających na celu skompensowanie pobieranej energii biernej indukcyjnej;
- mając na uwadze szczególnie wysokie opłaty dla odbiorców przyłączonych do sieci nN oraz coraz niższe ceny liczników elektrycznych, które dokonują pomiaru energii biernej indukcyjnej, opłaty za energię bierną będą ponosić coraz mniejsi odbiorcy. (U odbiorców tych dominują odbiorniki indukcyjne jednofazowe, lamy chłodnicze, wentylatory, klimatyzatory itp.).

## 5. Faktyczne oszczędności

Baterie kondensatorów stosuje się w prawie wszystkich rodzajach obiektów. Niegdyś były to urządzenia stosowane wyłącznie w przemyśle, dzisiaj są powszechne w większych sklepach, budynkach komunalnych, biurach, hotelach, oczyszczalniach ścieków itd. - ogólnie mówiąc wszędzie tam, gdzie dystrybutor energii rozlicza za ponadumowny pobór energii biernej, a odbiorca posiada znaczącą ilość silników, pomp, starego typu oświetlenia wyładowczego etc. Przykładem takich odbiorców mogą być firmy produkujące podeszwy do butów, doniczki, zajmujące się obróbką metali, produkcją mebli. W każdym przypadku po montażu urządzeń kontrolujemy efekt, jaki uzyskuje klient i w 90% opłaty za energię bierną są eliminowane, a w 10% pozostała do zapłaty kwota nie przekracza 10% kwoty płaconej za energię bierną przed montażem urządzenia. Większość baterii zwraca się w okresie 6-10 miesięcy. Na podstawie informacji uzyskanych od jednej z firm zajmującej się doбором i montażem

baterii, jako przykład można podać basen miejski na Śląsku, gdzie opłaty przed zamontowaniem baterii wynosiły 1800 zł netto miesięcznie. Po zastosowaniu baterii kondensatorów (w tym wypadku dławikowej, gdyż pomiary wykazały rezonans z falownikami zasilającymi pompy) opłaty całkowicie wyeliminowano. Koszt urządzenia z montażem i dobozem wyniósł 9600 zł netto. Tak, więc koszt inwestycji zwrócił się po niespełna 6 miesiącach. Jak wspomniano powyżej z zasady prawidłowo dobrane baterie eliminują opłatę za energię bierną. Wysokość takiej opłaty zależy od współczynnika mocy i stanowi od 10% do 60% opłaty za dystrybucję, co biorąc pod uwagę cały rachunek za energię może stanowić od 5% do 30% łącznej kwoty płaconej za energię.

## 6. Wnioski

1. Zainstalowanie baterii nie wymaga zgody dostawcy energii elektrycznej.
2. Baterie są całkowicie zautomatyzowane i nie wymagają obsługi. Konieczna jest tylko wymiana filtrów.
3. Zainstalowanie baterii nie zwiększy poboru energii czynnej.
4. Zastosowanie baterii kondensatorów całkowicie eliminuje opłaty za energię bierną indukcyjną lub redukuje je o około 90%.
5. Dzięki zastosowaniu baterii nie ma zagrożenie kary za ponad umowny pobór mocy biernej.

*Prezentowana praca zrealizowana w ramach tematu nr L-1/115/2013/DS. pt. „Budownictwo spełniające warunki zrównoważonego rozwoju”, została sfinansowana z dotacji na naukę przyznanej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.*

## Literatura

- [1] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 18 sierpnia 2011 r. Dz.U. nr 189 w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną
- [2] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 27 kwietnia 2012 r. Dz.U. nr 535 zmieniające rozporządzenie w sprawie szczegółowych zasad kształtowania i kalkulacji taryf oraz rozliczeń w obrocie energią elektryczną
- [3] <http://www.korporacjasystem.pl/> [dostęp 15.04.2014 r.]
- [4] <http://www.elektroinstalacje.info/> [dostęp 15.04.2014 r.]
- [5] Materiały Vattenfall
- [6] Zdjęcia i konsultacja *Syntra.pl*



## COMPENSATION OF REACTIVE POWER WAY TO DECREASE THE ACCOUNTS FOR ELECTRICITY.

### Summary

Subject of energy savings in the workplaces, where the machines requiring high energy consumptions are used, were described in this article. Prices of electric energy are higher and higher, further legal acts and the increase of fuel costs are not going to change this situation, which is why we must consider all ways of lowering the quantity of electric energy use and its costs. Usage of the condensing batteries could significantly reduce the reactive power losses and solve the problem. All induction machines consume reactive power. But, these that use the most are: asynchronous engines (especially those working on the idling), not much burdened convertors, welders. Unfortunately, the flow of reactive power has also disadvantages. Its flow from the source to the receiver burdens electrically cables and lines, lowering their flow capacity and leading to additional voltage fall and loss of real power. That is why the suppliers of electrical energy require limitation of reactive power consumption.

Reactive power compensation plays also an important role. Where necessary, it is created by means of synchronic capacitor. Thanks to it there is no need of sending it from the supplier to the receiver, which is why greater real power can be sent by the same electrical power lines.

While buying batteries it is important to know which one to choose. When chosen properly, it will work correctly, but badly chosen the one will suffer from destruction very quickly, and it may also set danger, which is why only specialists should be responsible for choosing batteries. In order to choose a battery properly, the power profile and any deformation must be measured at first. When it is done the power of device and other parameters are taken into consideration. Only above mentioned measurement guarantee proper and long work of the device. On the basis of the invoice for electrical power we may only approximately assess the cost of device, but it will not give us any information about deformation of current and voltage, danger of resonance and required gradation.

**Keywords:** Compensation, reactive power, active power, energy efficiency

DOI:10.7862/rb.2014.121

*Przesłano do redakcji: 21.05.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 22.12.2014 r.*

Agnieszka ŻELAZNA<sup>1</sup>  
Agata ZDYB<sup>2</sup>  
Artur PAWŁOWSKI<sup>3</sup>

## PORÓWNANIE WYBRANYCH PANELI FOTOWOLTAICZNYCH NA PODSTAWIE BILANSU MATERIAŁOWO-ENERGETYCZNEGO W ICH CYKLU ŻYCIA

W pracy dokonano porównania dwóch wybranych rodzajów paneli fotowoltaicznych na podstawie danych otrzymanych przy zastosowaniu metody oceny cyklu życia (Life Cycle Assessment - LCA). Przedstawione zostały główne założenia metodologii LCA, której celem jest badanie wpływu środowiskowego i zrównoważoności. Analizy poświęcone najbardziej popularnym modułom krzemowym (Si) i cienkowarstwowym z tellurku kadmu (CdTe) wykazują, że zużycie materiałów i energii jest mniejsze w przypadku CdTe. Ocena cyklu życia jest to technika zarządzania środowiskowego, która pozwala określić wpływ produktów (dóbr i usług) na środowisko. W pracy, główne założenia tej metody przedstawione są w kontekście fotowoltaiki. Wśród wielu rodzajów modułów fotowoltaicznych, najbardziej rozpowszechnione są moduły Si oraz CdTe i właśnie one zostały porównane. W oby tych przypadkach największe znaczenie w ocenie cyklu życia ma ich produkcja i możliwości recyklingu. Montaż i utrzymanie w czasie eksploatacji ma niewielkie znaczenie w kontekście zużycia materiałów i energii. Analiza pokazuje, że zapotrzebowanie na energię i materiały jest mniejsze w przypadku CdTe niż Si. Oba typy modułów są natomiast jednakowo dobre w kontekście recyklingu ze względu na to, że możliwe jest odzyskanie 90-99% zużytych materiałów. Tak wysoki wynik jest bardzo istotny ponieważ czas życia modułów fotowoltaicznych wynosi 20-30 lat i przeprowadzanie recyklingu jest koniecznością. Analiza cyklu życia systemów fotowoltaicznych pozwala na ocenę ich zrównoważoności.

**Słowa kluczowe:** moduł PV, LCA, fotowoltaika, zrównoważony rozwój

<sup>1</sup> Agnieszka Żelazna, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel./fax: (+081) 53 81 997, tel: (+081) 538 4406, a.zelazna@wis.pol.lublin.pl

<sup>2</sup> Autor do korespondencji: Agata Zdyb, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel./fax: (+081) 53 81 997, tel: (+081) 538 4747, a.zdyb@pollub.pl

<sup>3</sup> Artur Pawłowski, Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Lubelska, ul. Nadbystrzycka 40B, 20-618 Lublin, tel./fax: (+081)5381997, tel: (+081)5384409, a.pawlowski@wis.pol.lublin.pl

## 1. Wstęp

Rosnące zapotrzebowanie na energię skłania naszą cywilizację do zainteresowania nowymi źródłami energii. Szczególną uwagę zwracają odnawialne źródła energii, które charakteryzują się tym, że eksploatacja nie zubaża ich zasobów. Promieniowanie słoneczne wyróżnia się wśród nich ponieważ ilość energii jaka dociera do Ziemi od Słońca w ciągu jednego dnia mogłaby zaspokoić potrzeby naszej planety przez cały rok, przy zastosowaniu odpowiednich metod gromadzenia jej i magazynowania. W ostatnich latach obserwowany jest dynamiczny rozwój technologii fotowoltaicznych (PV - Photovoltaics) związany ze spadkiem cen systemów o 52% w latach 2006 – 2011. Należy pamiętać, że obniżenie cen energii wytwarzanej w systemach fotowoltaicznych możliwe jest nie tylko poprzez usprawnienie produkcji efektu finalnego, czyli modułów, ale także wszystkich potrzebnych komponentów. Na rynku obecnie dominują moduły złożone z ogniw krzemowych (ok. 80% rynku), ale coraz bardziej powszechne stają się również moduły cienkowarstwowe (ok. 20% rynku), w których stosowany jest tellurek kadmu CdTe. W pracy wybrano te właśnie dwa rodzaje modułów do porównania na podstawie metody oceny cyklu życia (LCA – Life Cycle Assessment).

## 2. Metoda LCA

Analiza cyklu życia (LCA) to technika zarządzania środowiskowego, która pozwala na określenie wpływu danych produktów (dóbr i usług) na środowisko. W metodzie tej uwzględniane są wszystkie etapy powstawania, eksploatacji i utylizacji związane z wykorzystywaniem badanego produktu przy czym analizowane jest zużycie materiałów i energii oraz inne efekty środowiskowe. Przy pomocy tej metody można prognozować o ile ograniczona zostanie emisja gazów cieplarnianych dzięki zastosowaniu przyjaznych środowisku technologii słonecznych jak np. moduły fotowoltaiczne i kolektory słoneczne [12].

Analiza cyklu życia w zastosowaniu do systemów fotowoltaicznych pozwala na ich ocenę w kontekście problematyki zrównoważonego rozwoju w trzech powiązanych ze sobą zasadniczych aspektach, takich jak: dostępność materiałów, koszty i wpływ na środowisko. W metodzie LCA wykorzystywane są informacje napływające z firm produkujących moduły fotowoltaiczne oraz pozostałe części systemów PV, dane dotyczące funkcjonowania tych systemów w różnych krajach i warunkach klimatycznych przez dłuższy czas oraz przeprowadzanego recyklingu.

Wczesne analizy wykonywane metodą LCA [1] dawały inne rezultaty niż obecnie. Przykładowo w latach 2005-2006 w literaturze pojawiły się opracowania informujące, że zużycie energii w cyklu życia modułu krzemowego (głównie na etapie produkcji i transportu) wynosi 3700-4200 MJ/ m<sup>2</sup>, a dla cienkowarstwowego CdTe 1200 MJ/m<sup>2</sup>. Oszacowanie ilości emitowanych gazów cie-

plarnianych wyrażonych w jednostce masy odpowiadającej ilości ditlenku węgla (g CO<sub>2</sub>-eq.) dawało następujący wynik: 37-45 g CO<sub>2</sub>-eq./kWh dla modułów krzemowych oraz 24 g CO<sub>2</sub>-eq./kWh dla cienkowarstwowych [4, 5]. Obecnie dane wykorzystywane w analizie cyklu życia są coraz bardziej wiarygodne i pochodzą ze znacznie większej liczby źródeł.

### 3. Rodzaje ogniw słonecznych

Rozwój fotowoltaiki zmierza do dwóch głównych celów: obniżenia kosztów i zwiększenia wydajności ogniw. Badania prowadzone w wielu ośrodkach naukowych na świecie doprowadziły do dużego zróżnicowania ogniw słonecznych, które obecnie można podzielić na cztery generacje: I- ogniwa krzemowe (monokrystaliczne i multikrystaliczne), II - cienkowarstwowe, III – organiczne i barwnikowe (DSSC – Dye Sensitized Solar Cells), IV – sensybilizowane kropkami kwantowymi. Wartości parametrów charakteryzujących ogniwa wykonane z różnych materiałów i należące do kilku generacji przedstawia tabela 1. Spośród zaprezentowanych w tabeli ogniw, największe znaczenie komercyjne mają ogniwa krzemowe, a od pewnego czasu również cienkowarstwowe wykorzystujące CdTe. Z tego właśnie względu analizy przeprowadzone w dalszej części pracy poświęcone są modułom złożonym z tych dwóch rodzajów ogniw.

### 4. Analiza danych dla modułów krzemowych i CdTe

W ocenie cyklu życia ważne są wszystkie etapy od początku powstawania produktu, poprzez eksploatację, aż do jego likwidacji. W przypadku modułów fotowoltaicznych największy udział w całym bilansie „życia” ma proces ich produkcji oraz późniejszego recyklingu, ponieważ montaż i demontaż jest jednorazowy, a nakłady związane z eksploatacją są znikome. W dalszej części pracy omówione jest zużycie materiałów i energii w procesie wytwarzania modułów krzemowych i cienkowarstwowych CdTe, a także recykling obu typów modułów.

Podstawowym surowcem do produkcji modułów krzemowych jest kwarc SiO<sub>2</sub>, który jest redukowany w atmosferze argonu do krzemu metalurgicznego (MG silicon – metallurgical grade silicon). W celu osiągnięcia czystości >99,9999% jest on poddawany tzw. procesowi Siemens, w którym bloki krzemowe rosną w atmosferze wodoru i trichlorosilanu (SiHCl<sub>3</sub>) o temperaturze 1100-1200°C. W zmodyfikowanej wersji tej procedury, zapewniającej mniejsze zużycie energii trichlorosilan jest zastąpiony silanem (SiH<sub>4</sub>), który razem z wodorem podgrzewany jest do ok. 800°C. Oczyszczanie w procesie Siemens daje, oprócz krzemu o odpowiedniej czystości, także krzem, który może być stosowany w elektronice (EG silicon – electronic grade silicon) oraz czterochlorek krzemu (SiCl<sub>4</sub>) wykorzystywany w produkcji silikonu. W celu otrzymania podłoży do monokrystalicznych ogniw słonecznych krzem klasy EG zostaje stopiony i użyty w procesie Czochralskiego. Powstałe monokryształy są następnie cię-

Tabela 1. Wartości parametrów charakteryzujących ogniwa słoneczne wykonane z różnych materiałów

Table 1. Characteristic parameters of solar cells made of different materials

Rodzaj ogniwa słonecznego	Wydajność komercyjna	Wydajność laboratoryjna	Gęstość prądu zwarcia [mA/cm <sup>2</sup> ]	Napięcie obwodu otwartego [V]
<b>Krzemowe</b>				
Si monokrystaliczny	15% <sup>a)</sup> 22% <sup>b)</sup>	23% <sup>a)</sup> 24,7% <sup>c)</sup> 25% <sup>f)</sup>	35 <sup>a)</sup> 42,2 <sup>c)</sup> 42,7 <sup>f)</sup>	0,55 <sup>a)</sup> 0,7 <sup>c)</sup> 0,706 <sup>f)</sup>
Si multikrystaliczny	13% – 15% <sup>a)</sup> 14% – 18% <sup>b)</sup>	20,3% <sup>c)</sup> 20,4% <sup>f)</sup>	37,7 <sup>c)</sup> 38 <sup>f)</sup>	0,6 <sup>c)</sup> 0,66 <sup>f)</sup>
<b>Cienkowarstwowe</b>				
Si amorficzny	6% – 8% <sup>a)</sup> 7,1% <sup>b)</sup>	10,4% <sup>b)</sup> 9,5% <sup>c)</sup>	15 <sup>a)</sup> 17,5 <sup>c)</sup>	0,8 <sup>a)</sup> 0,86 <sup>c)</sup>
CdTe	8% <sup>a)</sup> 11,2% <sup>b)</sup>	16% <sup>a)</sup> 16,5% <sup>b)</sup> 16,5% <sup>c)</sup>	25,9 <sup>c)</sup>	0,8 <sup>c)</sup>
CIS/CIGS	13% <sup>a)</sup> 12,1% <sup>b)</sup>	17% <sup>a)</sup> 20,3% <sup>b)</sup> 18,8% <sup>c)</sup>	34 <sup>c)</sup>	0,7 <sup>c)</sup>
GaAs	23,3% <sup>d)</sup>	24,5% <sup>c)</sup> 28,8% <sup>f)</sup>	28,8 <sup>c)</sup> 29,6 <sup>f)</sup>	1 <sup>c)</sup> 1,05 <sup>d)</sup> 1,12 <sup>f)</sup>
<b>Wielozłazkowe</b>				
GaInP/GaAs	30% – 38% <sup>b)</sup> 30,3% <sup>d)</sup>	30,3% <sup>c)</sup> 38% <sup>f)</sup>	14,22 <sup>c)</sup> 14,27 <sup>f)</sup>	2,48 <sup>c)</sup> 2,4 <sup>d)</sup> 3,06 <sup>f)</sup>
aSi/μcSi	9% <sup>b)</sup>	11,7% <sup>c)</sup>	2,99 <sup>c)</sup>	5,46 <sup>c)</sup>
<b>Organiczne</b>	6% <sup>b)</sup>	5,15% <sup>c)</sup> 8,5% <sup>f)</sup>	9,4 <sup>c)</sup> 15,87 <sup>f)</sup>	0,87 <sup>c)</sup> 0,8 <sup>f)</sup>
<b>DSSC</b>	2% – 4% <sup>b)</sup>	8% – 12% <sup>b)e)</sup> 10,4% <sup>c)</sup> 15% <sup>f)</sup>	21,8 <sup>c)</sup> 20 <sup>f)</sup>	0,729 <sup>c)</sup> 0,99 <sup>f)</sup>

Źródło: opracowanie własne na podstawie: a) – [10], b) – [9], c) – [7], d) – [11], e) – [3], f) – [8]  
 Source: own elaboration based: a) – [10], b) – [9], c) – [7], d) – [11], e) – [3], f) – [8]

te, trawione, czyszczone, domieszkowane fosforem, a następnie po ich obu stronach nanoszone są srebrne kontakty. Tak otrzymane ogniwa łączone są w warstwie EVA (kopolimer etylenu i octanu winylu), pokrywane szkłem i u-

mieszczane w aluminiowej ramie. Produkcja ogniw wykorzystujących krzem monokrystaliczny wiąże się z powstawaniem ścinków Si już na etapie przygotowywania podłoży. Odpady te w całości mogą być użyte powracając bezpośrednio do procesu wytwarzania monokryształów.

Materiały takie jak kadm i tellur, używane w postaci metalicznej do produkcji cienkowarstwowych modułów CdTe, otrzymywane są jako produkty uboczne przy wytapianiu miedzi i cynku i wymagają dalszego oczyszczania do uzyskania czystości na poziomie 99,999%. Warstwy CdTe, a na nich bardzo cienkie pokrycia CdS nanoszone są poprzez naporowanie na szkło w temperaturze 500-600°C, a następnie tworzone są ich połączenia i tylne kontakty. Dodatkowe zewnętrzne pokrycie szkłem zapewnia wystarczające umocnienie, co eliminuje w tym przypadku konieczność stosowania aluminiowej ramy.

Tabela 2 przedstawia ilościowe zużycie materiałów i energii w obu omawianych typach modułów. Dane liczbowe pokazują, że zarówno ilość materiałów, jak i energii wykorzystywana podczas produkcji jest mniejsza w przypadku modułów cienkowarstwowych.

Tabela 2. Ilość materiałów i energii zużytych podczas produkcji modułów Si i CdTe, na 1 m<sup>2</sup> modułu, na podstawie [6], [2]

Table 2. The amount of materials and energy consumed in fabrication process of Si and CdTe modules, based on [6], [2]

<b>Moduł CdTe</b>		
<b>Materiały [kg]</b>		<b>Energia [kWh]</b>
Cd	0,01054 *	28,5
Te	0,01154 *	
woda	219	
poliwęglan	0,05	
szkło	19,7	
azot	0,052	
przewody elektryczne	0,215	
<b>Moduł Si</b>		
<b>Materiały [kg]</b>		<b>Energia [kWh]</b>
polikrystaliczny Si	1,15	126,6
Ar	6,2	
zw. chemiczne do czyszczenia powierzchni krzemu np. glikol polietylenowy, NaOH, HCl	3,5	
woda	193	
Al	2,63	
szkło	10,6	
azot	1,52	
przewody elektryczne	0,13	

Moduły fotowoltaiczne są produkowane na skalę komercyjną od lat 80., a ich czas życia wynosi 20-30 lat. W związku z tym rozwój metod recyklingu modułów został wymuszony w sposób naturalny dopiero około roku 2000. W przypadku powszechnie stosowanych modułów krzemowych w recyklingu można odzyskać do 97% materiałów. Mechanicznie oddzielana jest aluminiowa rama modułu, elementy stalowe i miedziane oraz szkło. Najlepsze wyniki w porównaniu do manualnego rozdzielania elementów modułów dają procedury zautomatyzowane. Efektem ich stosowania jest materiał o wysokiej jakości, otrzymany przy niskim zużyciu energii i niskich kosztach. Warstwa kopolimeru EVA, w którym umieszczone są poszczególne ogniwa jest usuwana metodami chemicznymi i termicznymi.

Zużyte cienkowarstwowe moduły CdTe podlegają podobnej procedurze. Są one rozkładane na elementy, a następnie rozdrabniane na małe 5 mm kawałki. Rozdzielenie materiałów półprzewodnikowych wymaga zastosowania metod chemicznych i następuje po wstępnym mechanicznym rozdzielaniu elementów. Warstwy półprzewodników są wytrawiane ze szklanego podłoża, a po oczyszczeniu szkło i warstwa laminatu jest oddzielana. Osobno są usuwane elementy metalowe. Procedura ta pozwala na odzyskanie do 90% szkła i 95% zastosowanych półprzewodników. Przykładowo tellur odzyskiwany jest w 80% i ma on czystość 99.7%, wystarczającą do dalszej sprzedaży i wykorzystania ponownie w panelach [2].

W krajach, w których zastosowania fotowoltaiki są od dawna rozpowszechnione metody recyklingu są powszechnie stosowane, a ich wydajność zapewnia opłacalność zarówno w wymiarze ekonomicznym jak i ekologicznym. Moduły składające się z ogniw wyprodukowanych z całkiem nowych materiałów muszą pracować trzy razy dłużej niż moduły z materiałów z recyklingu o tej samej wydajności, aby wytworzyć energię zużytą na ich wyprodukowanie. Moduły oparte na materiałach z recyklingu są również tańsze.

Stosowanie recyklingu ma istotne zalety w kontekście ochrony środowiska i realizacji koncepcji zrównoważonego rozwoju:

- poprawia społeczny odbiór fotowoltaiki,
- stanowi dodatkowe źródło surowców,
- wpływa na obniżenie kosztów modułów,
- minimalizuje koszty zagospodarowania odpadów w postaci zużytych paneli.

## 5. Podsumowanie

Zgodnie z prognozami, dynamiczny rozwój rynku fotowoltaiki na świecie doprowadzi do produkcji terawatów mocy z odnawialnego źródła jakim jest Słońce. W związku z tym istotnego znaczenia nabiera ocena technologii fotowoltaicznych w kontekście zrównoważonego rozwoju obejmującego zarówno dostęp do surowców, jak również koszty i ocenę potencjalnych zagrożeń dla środowiska, które mogą być oszacowane przy zastosowaniu metody LCA.

Dane liczbowe dotyczące produkcji wybranych do analizy modułów CdTe i Si pozwalają stwierdzić, że zużycie materiałów i energii jest mniejsze w przypadku CdTe. Recykling obu typów modułów jest bardzo skuteczny i pozwala na odzyskanie 90-99% materiałów.

## Literatura

- [1] Alsema E.A.: Energy Payback time and CO<sub>2</sub> Emissions of PV Systems, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 8, 2000, pp. 17-25.
- [2] Anctil A., Fthenakis V.: Recyclability Challenges in “Abundant” Material Based Technologies, *Proc. of 27<sup>th</sup> European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition*, Germany 2012, pp. 4352-4358.
- [3] Chiba Y., Islam A., Watanabe Y., Komiya R., Koide N., Han L.Y.: Dye-sensitized solar cells with conversion efficiency of 11,1%, *Japanese Journal of Applied Physics Part 2-Letters and Express Letters*, vol. 45, 2006, pp. L638-L640.
- [4] Fthenakis V., Alsema E.: Photovoltaics Energy Payback Times, Greenhouse Gas Emissions and External Costs: 2004-early 2005 Status, *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 14, 2006, pp. 275-280.
- [5] Fthenakis V.M., Kim H.C., Alsema E.: Emissions from photovoltaic life cycles, *Environmental Science and Technology*, vol. 41, 2008, pp. 2168-2174.
- [6] Fthenakis V., Kim H.C., Frischknecht R., Rauei M., Sinha P., Stucki M.: Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems, *Report IEA-PVPS*, 2011.
- [7] Green M.A., Emery K., King D.L. Hishikawa Y., Warta W.: Solar Cell Efficiency Tables, *Prog. Photovolt: Res. Appl.*, vol. 16, 2008, pp. 61-67.
- [8] Green M.A., Emery K., Hishikawa Y., Warta W., Dunlop E.D.: Solar cell efficiency tables (version 43), *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, vol. 22, 2014, pp. 1-9.
- [9] Greenpeace and EPIA Report, *Solar Generation 6, Solar Photovoltaic Electricity Empowering the World*, 2011, <http://www.greenpeace.org> [dostęp: 10 marca 2014 r.].
- [10] Nofuentes G., Munoz J.V., Talavera D.L., Aguilera J., Terrados J.: *Technical Handbook*, in the framework of the PVs in Bloom Project, 2011, ISBN: 9788890231001.
- [11] Olson J.M., Friedman D.J., Kurtz S.: High-Efficiency III-V Multijunction Solar Cells, 360-411, in: *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Eds: Luque A., Hegedus S., Wiley 2003.
- [12] Żelazna A., Pawłowski A., Zdyb A.: Carbon footprint of solar systems working in Polish climate conditions, *Quaere*, vol. III, 2013, pp. 2689-2695.



## COMPARISON OF PHOTOVOLTAIC PANELS BASED ON THE MATERIAL-ENERGY BALANCE IN THE LIFE CYCLE

### Summary

Two types of photovoltaic modules are compared basing on data provided by Life Cycle Assessment (LCA) methodology, which main assumptions are also described. LCA for photovoltaic technologies aims at analysing the environmental impacts and sustainability. The research related to the most popular Si and CdTe modules show that the consumption of materials and energy is smaller in the case of CdTe

Life Cycle Assessment (LCA) is a technique of environmental management, which allows to determine the impact of the products (goods and services) on the environment. Main assumptions of such approach are presented in the paper in the context of photovoltaics. Among different types of photovoltaic modules two are the most popular: Si and CdTe, and they are compared in the paper. In both cases the highest share in the LCA is connected with production process and possibilities of recycling after dismantling the modules (since assembly, maintaining and further dismantling have little impact in the context of material and energy use). In the context of production process, the research shows that the consumption of materials and energy is smaller in the case of CdTe than in the case of Si. In the context of recycling both types of modules are very good, since it is possible to recycle about 90-99% of used materials. Such high factor is very important, because the life span of photovoltaic modules is about 20-30 years, so good recycling is a must.

**Keywords:** PV modules, LCA, sustainable development

DOI:10.7862/rb.2014.122

*Przesłano do redakcji: 26.11.2014 r.*

*Przyjęto do druku: 22.12.2014 r.*

## Informacje dodatkowe

1. Lista recenzentów współpracujących będzie opublikowana w czwartym numerze *Czasopisma Inżynierii Ładowej, Środowiska i Architektury*: 61(4/14) oraz na stronie internetowej:  
[www.oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/](http://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/](http://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/](http://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-autorow/](http://oficyna.portal.prz.edu.pl/informacje-dla-autorow/)
4. Formularz recenzji jest udostępniony na stronie internetowej:  
[www.oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/](http://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-autorow/](http://www.oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/instrukcja-dla-autorow/)  
oraz  
[www.oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/wzakladce „Instrukcja dla autorów”](http://www.oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/wzakladce-Instrukcja-dla-autorow)
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/](http://www.oficyna.portal.prz.edu.pl/pl/zeszyty-naukowe/czasopismo-inzynierii-ladowej-s/)