

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA

POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW
I TECHNIKÓW SANITARNYCH



MONOGRAFIE
„INŻYNIERIA ŚRODOWISKA – MŁODYM OKIEM”
TOM 35
EKOENERGETYKA
pod redakcją
Iwony Skoczko
Katarzyny Gładyszewskiej-Fiedoruk
Karoliny Weremijewicz
Agaty Witkowskiej



Białystok 2017

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA



POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW
I TECHNIKÓW SANITARNYCH



MONOGRAFIE
TOM 35
EKOENERGETYKA

MONOGRAFIE
TOM 35



*Patronat
Rektora Politechniki Białostockiej
prof. dr hab. inż. Lecha Dzienisa*



*Wydział Budownictwa
i Inżynierii Środowiska
Politechniki Białostockiej*



*Honorowy Patronat
Prezydenta
Miasta Białegostoku*

**Publikacja dofinansowana przez
Wojewódzki Fundusz Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej w Białymstoku**



Wojewódzki Fundusz
Ochrony Środowiska
i Gospodarki Wodnej
w Białymstoku

www.wfosigw.bialystok.pl

Serdecznie dziękujemy za pomoc w organizacji uroczystości
i wydaniu niniejszej publikacji.



Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych
w Białymstoku



IKEA Industry
Orla



POLSKI
instalator

Polskie Towarzystwo
Inżynierii Ekologicznej

P.V. PREFABET KLUCZBORK S.A.

P.V.®

wrotapodlasia.pl



INŻYNIERIA ŚRODOWISKA – MŁODYM OKIEM

TOM 35

EKOENERGETYKA

**pod redakcją
Iwony Skoczko
Katarzyny Gładyszewskiej-Fiedoruk
Karoliny Weremijewicz
Agaty Witkowskiej**

**Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej
Białystok 2017**

Redaktor tomu:

Iwona Skoczko
Katarzyna Gładyszewska-Fiedoruk
Karolina Weremijewicz
Agata Witkowska

Zespół redakcyjny:

Iwona Skoczko – Redaktor Naczelny
Katarzyna Gładyszewska-Fiedoruk – Redaktor Naczelny
Karolina Weremijewicz – skład monografii
Agata Witkowska – skład monografii

Redakcja językowa: Autorzy**Recenzenci monografii:**

dr hab. inż. Sławomir Obidziński
dr inż. Barbara Sadowska-Buraczewska

Zespół naukowy:

dr hab. inż. Iwona Skoczko
prof. dr hab. inż. Józefa Wiater
prof. dr. hab. inż. Rafał Miłaszewski
prof. Aleksey Ternovtsev
prof. Dmitry Spitsov
prof. Javier Bayo
prof. Jolanta Sadauskiene
prof. Antonio Roderio Serrano
prof. Manuel Ruiz de Adana Santiago
prof. dr hab. inż. Mirosław Żukowski
prof. dr hab. Tadeusz Łoboda
prof. dr hab. inż. Józef Jasieczak
dr hab. inż. Aleksander Kiryluk, prof. PB
dr hab. inż. Mariusz Dudziak, prof. PŚ
dr hab. inż. Urszula Filipkowska, prof. UWM
dr hab. inż. Marcin Dębowski, prof. UWM
dr hab. inż. Monika Żubrowska-Sudoł, prof. PW
dr hab. inż. Jacek Piekarski, prof. PK
dr hab. inż. Wiesława Głodkowska, prof. PK
dr hab. inż. Elżbieta Horszczaruk, prof. ZUT
dr hab. inż. Marek Ciak, prof. UWM

dr hab. inż. Alicja Siuta-Oлча, prof. PL
dr hab. inż. Andrzej Dylla, prof. UTP
dr hab. Aneta Dorota Petelska
dr hab. Izabella Jastrzębska
dr hab. Zenon Łotowski
dr hab. Ada Wróblewska
dr hab. Janina Piekutin
dr hab. inż. Katarzyna Ignatowicz
dr hab. inż. Wojciech Dąbrowski
dr hab. inż. Mirosław Skorbiłowicz
dr hab. inż. Elżbieta Skorbiłowicz
dr hab. inż. Katarzyna Gładyszewska-Fiedoruk
dr hab. inż. Mariusz Adamski
dr hab. inż. Andrzej Butarewicz
dr hab. inż. Sławomir Obidziński
dr n. tech. Joanna Szczykowska
dr inż. Anna Siemieniuk
dr inż. Elżbieta Grygorczuk-Petersons
dr inż. Dariusz Andraka
dr inż. Jacek Leszczyński
dr inż. Dorota Krawczyk

Wszystkie zamieszczone w monografii prace są recenzowane

Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2017

ISBN 978-83-65596-22-2

Publikacja nie może być w jakikolwiek sposób powielana i rozpowszechniana bez pisemnej zgody posiadacza praw autorskich

Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej

Wydział Budownictwa i Inżynierii
Środowiska Politechniki Białostockiej
ul. Wiejska 45E
15-351 Białystok
www.ismo.pb.edu.pl

Polskie Zrzeszenie Techników i Inżynierów
Sanitarnych Oddział w Białymstoku
ul. M. C. Skłodowskiej 2, 15-950 Białystok
Tel.: 85 744 31 00
e-mail: konferencjapzits@gmail.com

SPIS TREŚCI

Parametry termiczne nowoczesnej stolarki okiennej.....	11
mgr inż. Joanna Borowska	
Charakterystyka pomp ciepła	22
mgr inż. Tomasz Choiński	
Zastosowanie metod termicznych w recyklingu odpadów elektronicznych	36
mgr inż. Agnieszka Gurgul, Monika Zabłocka-Malicka	
Weryfikacja wartości współczynnikaprz przenikania ciepła w biurowym budynku pasywnym.....	47
mgr inż. Ewelina Kowalczyk	
Promieniowanie ciepłe w ogrzewnictwie	61
mgr inż. Damian Nikolajuk	
Aktualne problemy produkcji biogazu	78
mgr inż. Monika Pawlita-Posmyk, dr hab. inż. Małgorzata Wzorek, prof. PO	
Biologiczne przetwarzanie odpadów komunalnych w przedsiębiorstwie gospodarki komunalnej w płońsku na przykładzie odpadów odebranych z obszaru gminy bodzanów.....	90
mgr inż. Marta Wiśniewska, Krystyna Lelicińska-Serafin	
Antybakteryjne i antyadhezyjne właściwości stopów metali o różnym składzie pierwiastkowym	102
mgr inż. Anna Żywicka, dr hab. inż. Karol Fijałkowski	

mgr inż. Joanna Borowska¹⁾

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Zakład Podstaw Budownictwa i Fizyki Budowli

¹⁾j.borowska@doktoranci.pb.edu.pl

PARAMETRY TERMICZNE NOWOCZESNEJ STOLARKI OKIENNEJ

The thermal parameters of modern windows

Słowa kluczowe: okna, współczynnik przenikania ciepła, parametry cieplne

Keywords: windows, the heat transfer coefficient, thermal parameters

Streszczenie:

W przedstawionym artykule pokazane zostały aktualne oraz zapowiadane na przyszłość wymagania odnośnie maksymalnego współczynnika przenikania ciepła $U_{w,max}$ dla okien. Zaprezentowano wpływ poszczególnych parametrów charakteryzujących okno, takich jak geometria jego elementów składowych i ich współczynniki przenikania ciepła czy liniowe mostki cieplne na stykach tych elementów, na końcową wartość współczynnika U_w . Wskazano również czynniki, które w największej mierze wpływają na charakterystykę energetyczną okna oraz omówiono najważniejsze z nich. Dodatkowo opisane zostały zalety ciepłego montażu okien w budynkach.

Wstęp

Zgodnie z obowiązującymi przepisami [11], współczynnik przenikania ciepła U_w dla okien w budynkach mieszkalnych od 1 stycznia 2017 roku może wynosić maksymalnie 1,1 W/(m²K). By móc spełnić tak zastrzone wymagania, producenci

stolarki okiennej stale udoskonalają swoje technologie, w rezultacie czego tworzą wyroby o coraz lepszych właściwościach termicznych i technicznych.

Każde okno jest specyficzne i charakteryzuje się swoim własnym unikatowym współczynnikiem przenikania ciepła. Jest on uzależniony od wielu czynników, takich jak materiał, z którego wykonana jest rama okienna (może to być drewno, PVC lub aluminium), rodzaj pakietu szklonego (ilość szyb, grubość pakietu, rodzaj gazu pomiędzy szybami, jakość powłok emisyjnych), ilość kwater oraz wymiary samego okna i powierzchnia ramy.

W niniejszej publikacji opisane zostaną metody obliczania współczynnika przenikania ciepła dla okien. Dodatkowo zostaną scharakteryzowane parametry cieplne oraz pozostałe czynniki wywierające kluczowy wpływ na wartość końcową współczynnika przenikania ciepła każdego okna.

Współczynnik przenikania ciepła okien U_w

Z każdą aktualizacją wytycznych [11], maksymalna wartość współczynnika przenikania ciepła $U_{w,max}$, jaką mogą charakteryzować się okna, maleje. W tabeli 1 przedstawione zostały dane z aktualnie obowiązującymi obostrzeniami i zaplanowanymi na przyszłość.

Tabela 1. Wymagania dla współczynnika przenikania ciepła okien U_w

Okna, drzwi balkonowe i drzwi zewnętrzne	Współczynnik przenikania ciepła $U_{w,max}$ [W/(m ² K)]		
	Do 31 grudnia 2016r.	Od 1 stycznia 2017r.	Od 1 stycznia 2021r.*
Okna (z wyjątkiem okien połaciowych), drzwi balkonowe i powierzchnie przeszczepione nieotwierane			
a) przy $T_i \geq 16^\circ\text{C}$	1,3	1,1	0,9
b) przy $T_i < 16^\circ\text{C}$	1,8	1,6	1,4
Pomieszczenie ogrzewane – pomieszczenie, w którym na skutek działania systemu grzewczego lub w wyniku balansu strat i zysków ciepła utrzymywana jest temperatura, której wartość została określona w §134. Ust. 2 rozporządzenia. T_i – temperatura pomieszczenia ogrzewanego zgodnie z §134. Ust. 2 rozporządzenia. *) od stycznia 2019r. – w przypadku budynków zajmowanych przez władze publiczne oraz będących ich własnością.			

Źródło: Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z 2002 r., nr 75, poz. 690, z późn. zm.) [11]

Te same dyrektywy [11] stawiają warunek odnośnie pola powierzchni okien i przegród szklanych, a także przeszczepionych A_o , wyrażonego w m². Zgodnie z nimi, jeśli wartość współczynnika przenikania ciepła jest wyższa niż

0,9 W/(m²K), wówczas pole powierzchni otworu okiennego nie może przekraczać wartości $A_{o,max}$ (1):

$$A_{o,max} = 0,15 \cdot A_z + 0,03 \cdot A_w \quad (1)$$

gdzie:

A_z – suma pól powierzchni rzutu poziomego wszystkich kondygnacji nadziemnych (po zewnętrznym obrysie budynku) w pasie o szerokości 5 m wzdłuż ścian zewnętrznych w m²;

A_w – suma pól powierzchni pozostałej części rzutu poziomego wszystkich kondygnacji po odjęciu w m².

Współczynnik przenikania ciepła dla okna U_w powinno się obliczać w oparciu o normę PN-EN ISO 10077-1:2007 *Właściwości cieplne okien, drzwi i żaluzji. Obliczanie współczynnika przenikania ciepła* [8], w której zawarty jest następujący wzór, analizujący jedynie wpływ szkła, ramy i mostka liniowego na styku tych dwóch materiałów (2):

$$U_w = \frac{A_g \cdot U_g + A_f \cdot U_f + l_g \cdot \psi_g}{A_g + A_f} \quad (2)$$

gdzie:

U_w – średni współczynnik przenikania ciepła okna w W/(m²K);

U_f – współczynnik przenikania ciepła ramy w W/(m²K);

U_g – średni współczynnik przenikania ciepła szyby w W/(m²K);

ψ_g – liniowy współczynnik przenikania ciepła mostka cieplnego na styku szyby z ramą okna w W/(mK), przyjęty wg normy PN-EN ISO 14683:2008 *Mostki cieplne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne* [10];

A_f – pole powierzchni ramy o współczynniku U_f w m²;

A_g – pole powierzchni szyby w m²;

l_g – długość liniowego mostka cieplnego na styku szyby z ramą w m.

Rozpatrując okno jako kompleksowy wyrób zamontowany w ościeżu, należy odwołać się do następującego wzoru (3):

$$U_w = \frac{\sum A_g U_g + \sum A_f U_f + \sum A_m U_m + \sum A_t U_t + \sum l_{f,g} \psi_{f,g} + \sum l_{t,g} \psi_{t,g}}{A_w} + \frac{\sum l_{m,g} \psi_{m,g} + \sum l_p \psi \sum l_{m,f} \psi_{m,f} + \sum l_{t,f} \psi_{t,f}}{A_w} + \Delta U_w \quad (3)$$

gdzie:

U_g, U_p – współczynniki przenikania ciepła oszklenia i paneli w $W/(m^2K)$;

U_f, U_m, U_t – współczynniki przenikania ciepła ram słupków okiennych oraz rygli w $W/(m^2K)$;

$\psi_{f,g}, \psi_{t,g}, \psi_{m,g}, \psi_p$ – liniowe współczynniki przenikania ciepła spowodowane połączonymi efektami cieplnymi elementu szklącego i ramy lub rygla, słupka albo samego panelu w $W/(mK)$;

$\psi_{m,f}, \psi_{t,f}$ – liniowe współczynniki przenikania ciepła spowodowane połączonymi efektami cieplnymi rama – słupek okienny lub rama – rygiel w $W/(mK)$;

A_w – pole powierzchni ściany osłonowej w m^2 ; A_g – całkowite pole powierzchni oszklenia w m^2 ;

A_p – całkowite pole powierzchni paneli w m^2 ;

A_f – całkowite pole powierzchni ram w m^2 ;

ΔU_w – dodatek na szprosy i szczeliny w $W/(m^2K)$.

Dopuszcza się dla typów budynków innych niż mieszkalne, np. magazynowe czy gospodarcze, większą niż maksymalną dopuszczalną wartość współczynnika przenikania ciepła $U_{w,max}$. Trzeba jedynie przedstawić rachunek efektywności ekonomicznej dla inwestycji zawierający koszty budowy i użytkowania budynku, który uzasadnia adekwatność odstępstwa od przepisów [4]. Jeśli decyzja taka okaże się rentowna, wtedy inwestorzy dostają inne możliwości manewru oraz możliwość przełożenia w czasie podporządkowania się do przepisów.

Czynniki i parametry wywierające wpływ na izolacyjność cieplną okien

Izolacyjność cieplna kompleksowego okna przede wszystkim zależy od izolacyjności cieplnej jego poszczególnych elementów, a także od ich geometrii. Zwrócić trzeba uwagę na: ramę (ościeżnicę) okienną, szybę (część szkloną), słupki, rygle i panele. Ważna jest także ilość skrzydeł (kwater) w pojedynczym oknie. Dodatkowo wpływ na to czy okno jest ciepłe, czy też nie, mają takie czynniki jak: zastosowane osłony przeciwsłoneczne, rodzaj i jakość pakietu szklonego, współczynnik całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego dla przezroczystej części okna g . Warto także wspomnieć o poprawnym montażu okna, od którego zależy wpływ liniowego mostka cieplnego na styku ościeże-ościeżnica na końcową wartość współczynnika przenikania ciepła U_w okna.

Każdy współczynnik przenikania ciepła U wyraża się w jednostkach W/m^2K . Można go rozumieć jako ilość ciepła przenikającego w przeciągu 1 godziny przez $1m^2$ przegrody (płaskiej), np. okna czy ściany, przy różnicy temperatur po obu stronach analizowanej przegrody o wartości $1^\circ C$ (albo $1K$). Należy zaznaczyć,

że współczynnik U informuje o tym, ile ciepła ucieka z przegrody, zatem pożądana jest jego jak najniższa wartość.

Na początku należy opisać współczynnik przenikania ciepła części szklonej okna U_g . Najbardziej jest on zależny od ilości wykorzystanych pakietów szybowych, gazu szlachetnego znajdującego się w przestrzeniach między szkłem i rodzaju samego szkła. Jako pakiet szybowy należy rozumieć dwie tafle szklane przedzielone przestrzenią z gazem. Szerokość takiej przestrzeni gazowej waha się zazwyczaj między 10mm a 16mm. Należy wspomnieć, że nie stosuje się szerszych odległości między taflami szkła, gdyż przekraczając 16mm mamy do czynienia z powietrzem krążącym w szczelinie, której izolacyjność się zmniejsza [7].

Powszechnie stosuje się szyby jednokomorowe, jednakże w myśl zasady, że wraz ze wzrostem ilości pakietów szklonych izolacyjność cieplna całego okna wzrasta, konsumenci decydują się na droższe pakiety szybowe, kilkukomorowe, zapewniające wyższe parametry cieplne całego okna. Ponadto należy zwrócić uwagę na powłoki niskoemisyjne, jakimi pokrywane są szyby we współczesnych oknach. Dzięki zastosowaniu takiej powłoki, emisyjność szkła maleje kilkukrotnie, wzrasta zaś jego zdolność odbijania promieniowania słonecznego długofalowego i poprawia się izolacyjność cieplna [3].

Tabela 2. Parametry zespolonych pakietów szybowych

Pakiet szybowy	Gaz wewnątrz pakietu	g_n [-]	LR [-]	LT [-]	U_g [W/(m ² K)]
4/16/4LE	argon	0,63	0,12	0,80	1,1
4/16/4GLE	argon	0,50	0,22	0,71	1,0
4/10/4LE	krypton	0,63	0,12	0,80	1,0
4LE/10/4/10/4LE	krypton	0,50	0,15	0,71	0,6
4LE/16/4/16/4LE	argon	0,50	0,15	0,71	0,6
4GLE/16/4/16/4GLE	argon	0,37	0,32	0,57	0,5

Źródło: Lis A., Energooszczędne rozwiązania stosowane przy wymianie lub renowacji okien [3]

Ciekawostką może być fakt, że powłoki posiadające emisyjność na poziomie 1%, aż 99% padającego na nie promieniowania odbijają, co w znacznym stopniu eliminuje straty ciepła od promieniowania słonecznego. W tabeli 2 pokazane zostały parametry kilku pakietów szybowych zespolonych w oparciu o emisyjność powłoki, rodzaj gazu szlachetnego i szerokość przestrzeni międzyszybowej, gdzie: g_n – współczynnik całkowitej przepuszczalności promieniowania słonecznego przez szybę; LR – współczynnik odbicia promieniowania słonecznego, LT – współczynnik przepuszczania promieniowania słonecznego, U_g – szacowany współczynnik przenikania ciepła szyby w oparciu o specyfikację pakietu szybowego.

Bardzo duży wpływ na wartość wynikową współczynnika przenikania ciepła okna U_w ma współczynnik przenikania ciepła ościeżnicy. Współczynnik U_f jest

zależny przede wszystkim od materiału, z którego powstała rama okienna. Powszechnie uważa się, że najprościej jest przyjąć jego wartość bezpośrednio z Załącznika C normy PN-EN ISO 10077-1 *Właściwości cieplne okien, drzwi i żaluzji. Obliczanie współczynnika przenikania ciepła* [8], w której znajduje się podział ram ze względu na wykorzystane tworzywo, i tak wyróżniono ramy drewniane, metalowe i z tworzywa sztucznego. Zgodnie z danymi przedstawionymi przez Dyllę [1], ościeżnica drewniana posiada współczynnik U_f na poziomie pomiędzy 2,1 W/(m²K) a 1,57 W/(m²K), gdzie wartość ta zależy od grubości profilu i rodzaju drewna. Dla tworzyw sztucznych U_f wynosi od 2,2 W/(m²K) do 2,0 W/(m²K). Jednak każdy przypadek jest inny, a co za tym idzie nie można ujednolicać wszystkich ram, zatem zaleca się wyliczanie współczynnika U_f dla każdego okna indywidualnie i w oparciu o przepisy zawarte w normie PN-EN ISO 10077-2 *Właściwości cieplne okien, drzwi i żaluzji. Obliczanie współczynnika przenikania ciepła, Część 2: Metoda komputerowa dla ram* [9]. Zawarte są w niej wytyczne do obliczania współczynnika przenikania ciepła ramy okiennej z wykorzystaniem modelu obliczeniowego, który zezwala na dobór odpowiedniego wariantu pasującego dla analizowanego przypadku.

Redukcja współczynnika przenikania ciepła ramy okiennej odbywać się może nie tylko przez odpowiedni dobór materiału, ale również dzięki konstruowaniu profili wielokomorowych. Obecnie wykonuje się profile składające się odpowiednio z trzech, czterech, pięciu i sześciu komór, to są tak zwane standardy. Jednakże spotkać się można także z profilami siedmio- i ośmiokomorowymi, które charakteryzują się jeszcze lepszymi właściwościami izolacyjności cieplnej niż te standardowe [3].

Współczynnik U_f można obniżyć także dzięki wykorzystaniu wkładek termooizolacyjnych. Mogą to być kształtki styropianowe albo pianka poliuretanowa, którą wypełnia się komory w profilach. Zastosowanie spienionego poliuretanu czy styropianu pozwala na redukcję infiltracji powietrza i przenikania ciepła przez ramę.

Następnym bardzo ważnym parametrem wywierającym wpływ na izolacyjność cieplną całego okna ma współczynnik całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego dla przezroczystej części okna. Współczynnik g nie występuje bezpośrednio we wzorach (2) i (3), jednakże jest niezwykle ważny, gdyż bezpośrednio wpływa na charakterystykę energetyczną części szklanej okna. Informuje, ile procent promieniowania słonecznego, które pada na szybę jest w stanie przedostać się do wnętrza pomieszczenia. Niejednokrotnie można spotkać się z stwierdzeniem, że najlepsze okna charakteryzują się wysokim współczynnikiem g , co oznacza dużą przepuszczalność promieniowania słonecznego przez szybę i dodatkowe zyski cieplne. Jednakże aktualizacja *Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* [11] wydana 5 lipca 2013 roku wprowadziła nakaz, by współczynnik ten kształtował się na takim poziomie, żeby latem nie było potrzeby dodatkowego ochładzania pomieszczeń. Zgodnie z tymi zaleceniami,

powinien wynosić maksymalnie 0,35 dla okresu letniego. Uzyskanie takiej wartości współczynnika g jest wykonalne przez wprowadzenie dodatkowego czynnika – zwanego współczynnikiem redukcji promieniowania słonecznego f_c . W wykorzystaniu tegoż reduktora, wzór na współczynnik całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego dla przezroczystej części okna wygląda następująco (4):

$$g = f_c \cdot g_n \quad (4)$$

gdzie:

f_c – to współczynnik redukcji promieniowania ze względu na zastosowanie urządzenia przeciwsłonecznego;

g_n – współczynnik przepuszczalności energii promieniowania słonecznego.

W przypadku, kiedy w deklaracji właściwości użytkowych okna nie została wskazana wartość współczynnika przepuszczalności promieniowania słonecznego, należy wykorzystać tabelę 2.1.5. także zawartą w aktualizacji *Rozporządzenia Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie* z 5 lipca 2013 r. [11]. Zostały w niej zestawione wartości współczynnika całkowitej przepuszczalności energii promieniowania słonecznego g_n . Należy wspomnieć, że wartości g_n zostały tabelaryzowane na podstawie typu przeszklenia a ich zakres waha się od 0,5 dla okien potrójnie szklonych z powłoką selektywną do 0,85 dla przypadku okien szklonych pojedynczo.

Kolejnym czynnikiem, którego wpływ na współczynnik przenikania ciepła U_w okna jest pośredni, ale niezwykle ważny, są osłony przeciwsłoneczne. Ich zadaniem jest umożliwianie wykorzystywania promieniowania słonecznego w okresie zimowym i ograniczanie przegrzewania budynków w okresie letnim, kiedy to temperatury zewnętrzne wahają się nawet w okolicach 30°C [5]. Tego typu rozwiązanie jest opłacalne w szczególności w budynkach, gdzie stosuje się systemy chłodzenia.

Osłony przeciwsłoneczne nie są elementami na stałe wbudowanymi w bryłę budynku, zatem da się w łatwy sposób za ich pomocą regulować napływ promieniowania słonecznego do wnętrza budynku. Wyróżnia się osłony montowane po zewnętrznej stronie przeszkleń i wewnętrzne, zakładane w pomieszczeniach na okna [3].

Wewnętrznymi elementami zasłaniającymi mogą być rolety, żaluzje lub zasłony. Rolety wykonuje się z materiałów takich jak bambus, papier, tkaniny czy różnego rodzaju maty. Gdy są powleczone od strony okna materiałem odbijającym promieniowanie słoneczne, mają za zadanie zaciemniać pomieszczenie. Żaluzje składają się z lameli wykonanych z różnych tworzyw, uszeregowanych równolegle, zamontowanych w prowadnicach bądź wiszących swobodnie, które są połączone ze sobą za pomocą linki. Ich cechą charakterystyczną jest jeszcze lepsze zaciemnianie pomieszczeń niż w przypadku rolet [3].

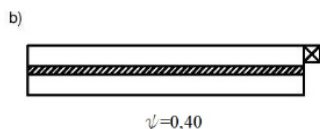
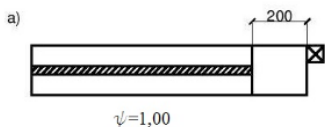
Na zewnątrz przeszkleń w roli przesłon słonecznych stosuje się najpowszechniej rolety zewnętrzne. Cechuje je dualizm zastosowania – latem ochraniają wnętrze budynku przed przegrzaniem, zaś zimą nie pozwalają na uciekanie ciepła na zewnątrz. Na rynku dostępne są również markizy, które odbijają promieniowanie słoneczne i markizolety, które są połączeniem markiz i rolet.

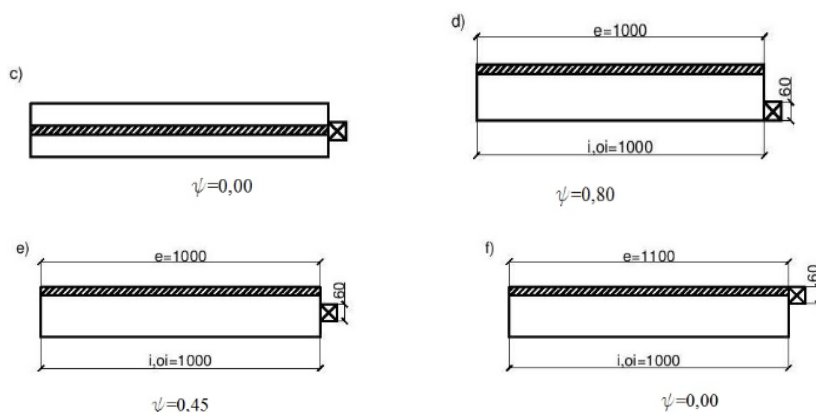
Należy zaznaczyć, że zostało potwierdzone, iż osłony przeciwsłoneczne, które są opuszczone w czasie zimy nocą redukują zużycie energii na cele ogrzewania nawet o 1,12%. Natomiast w lecie efekty są zdecydowanie lepsze. Dodatkową zaletą jest redukcja zużycia energii przeznaczonej na cele chłodzenia powietrza wewnątrz budynku [6].

Bardzo istotną kwestią jest prawidłowy montaż okna w ścianie zewnętrznej w budynkach mieszkalnych. W przypadku budynków o standardowych parametrach energetycznych nie istnieją wytyczne montażu okien i uszczelnienia połączeń ościeże-ościeznica. Konsumenci jednakże, rozważając jedynie koszty wmontowania okien, decydują się na mniej kosztowną opcję – tradycyjny montaż z użyciem silikonu lub pianki montażowej jako uszczelniacza. Jednakże takie rozwiązanie skutkuje stratami ciepła lub wilgocią, która pojawiają się na warstwie izolacyjnej ściany osłonowej. Efektem tego są rosnące koszty ogrzewania oraz ryzyko zagrzybienia i pojawienia się pleśni w pomieszczeniach.

W przypadku budynków energooszczędnych nie stosuje się tradycyjnego montażu stolarki okiennej. Wykorzystuje się w nich tzw. bezpieczny ciepły montaż okien. Jego podstawową zaletą jest polepszenie jakości zamocowania, co wywiera szczególny wpływ na eliminację mostków cieplnych oraz przewiewów i zabezpiecza izolację termiczną przed degradacją. Spoina montażowa stale pozostaje sucha dzięki zabezpieczeniu warstwy izolacyjnej przed wilgocią, a także zapewnieniu jej stałego wentylowania [4].

Najczęstszymi błędami wg Jankowskiego [2] w sztuce montowania okien w ścianie są nieodpowiednie mocowanie okna i nieprawidłowe wykończenie oraz uszczelnienie połączeń. By móc mówić o poprawnym zamontowaniu stolarki okiennej w przegrodzie, należy pamiętać o wykorzystaniu kołków mocujących odpowiedniego typu, a także o właściwym rozmieszczeniu kotew montażowych. Wykończenie połączenia okno-ściana (ościeznica-ościeże) powinno być prowadzone w miarę szybko, by materiał uszczelniający nie był za długo wystawiony na działanie promieniowania słonecznego. Dodatkowo należy pamiętać o tym, by w przypadku okien z profilami z tworzywa sztucznego, nie zasłaniać zewnętrznych otworów odwadniających.





Rys. 1. Wartości liniowego współczynnika przenikania ciepła w zależności od sposobu zamontowania okna w murze

Źródło: Opracowanie własne

Bardzo ważne jest również odpowiednie umiejscowienie okna w ścianie tak, by wyeliminować bądź maksymalnie zredukować wpływ liniowego mostka cieplnego po obrysie okna na współczynnik przenikania ciepła U_w . Na rysunku 1 (ilustracje a-f) zostały przedstawione przykłady ścian ze wskazaniem położenia okna i wartości liniowego odpowiadającego im współczynnika przewodzenia ciepła ψ . Jak widać najlepszym układem jest taki, w którym okno jest montowane w warstwie docieplenia w ścianie trójwarstwowej (Rys. 1c) lub na skraju warstwy dociepleniowej w ścianie dwuwarstwowej z izolacją termiczną od zewnątrz (Rys. 1f). Wówczas liniowy mostek cieplny na styku ościeże-ościeznica może zostać całkowicie wyeliminowany.

Podsumowanie

Wymagania odnośnie współczynnika przenikania ciepła U_w dla okien są ciągle zaostrzane. W tym momencie (od 1 stycznia 2017 roku) w przypadku budynków mieszkalnych może on wynosić maksymalnie $1,1 \text{ W/(m}^2\text{K)}$. Jednakże z każdą aktualizacją przepisów będzie on coraz bardziej zaostrzany.

Na izolacyjność cieplną okna (a w szczególności na jego współczynnik przenikania ciepła) przede wszystkim wpływają: współczynniki przenikania ciepła U jego elementów składowych, ich geometria, współczynnik transmitancji g , czy zastosowane osłony przeciwsłoneczne.

Wykorzystanie osłon przeciwsłonecznych sprzyja obniżeniu strat ciepła w zimie, a także nieprzegrzewaniu pomieszczeń w lecie. Dodatkowo pozwala na redukcję energii ponoszonej na cele chłodzenia budynku.

Stolarka okienna tylko wówczas będzie w pełni spełniała swoje zadanie, gdy zostanie poprawnie zamontowana w ścianie zewnętrznej. Jedynie ciepły montaż okna wyeliminuje infiltracje powietrza i nie pozwoli na pojawienie się pleśni i grzybów na ścianach i sufitach pomieszczeń.

Literatura

- [1] Dylla A., *Fizyka ciepła budowli w praktyce*, Wydawnictwo PWN, Warszawa, 201, str. 237-247
- [2] Jankowski C., *Wymiana okien skrzynkowych na nowe*, Budujemy dom, 11-12/2016, str.106-111
- [3] Lis A., *Energooszczędne rozwiązania stosowane przy wymianie lub renowacji okien*, *Izolacje*, 1/2017, str. 60-65
- [4] Sarosiek W., Wichrowska-Kalinowska K., *Energetyczno-ekonomiczny aspekt okien w budynkach niskoenergetycznych*, *Izolacje*, 7/8/2014, str. 56-60
- [5] Żurawski J., *Wpływ przegród przezroczystych na jakość energetyczną budynku*, *Izolacje*, 6/2009, str. 23-28
- [6] Żurawski J., *Izolacyjność termiczna przegród przezroczystych przy zastosowaniu osłon przeciwsłonecznych*, *Izolacje*, 11,12/2009, str. 42-45
- [7] Matysiak Rakoczy K., Firląg Sz. *Parametry okien: jaki powinien być współczynnik przenikania ciepła U i przepuszczalności energii cieplnej g ?* [online], dostęp zdalny: http://murator-dom.pl/dzial-dedykowany/okno-plus/cieplo-okna-parametry-cieplne-szyb-i-profil-oraz-sposob-montazu-cieplych-okien,540_6969.html, [data wejścia: 02.01.2017]
- [8] PN-EN ISO 10077-1:2007, Właściwości cieplne okien, drzwi i żaluzji. Obliczanie współczynnika przenikania ciepła
- [9] PN-EN ISO 10077-2:2007, Właściwości cieplne okien, drzwi i żaluzji. Obliczanie współczynnika przenikania ciepła, Część 2: Metoda komputerowa dla ram
- [10] PN-EN ISO 14683:2008, Mostki cieplne w budynkach. Liniowy współczynnik przenikania ciepła. Metody uproszczone i wartości orientacyjne
- [11] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z 12 kwietnia 2002 roku w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz. U. z 2002 r., nr 75, poz. 690, z późn. zm.)

mgr inż. Tomasz Choiński ¹⁾

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Katedra Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji

¹⁾ t.choinski@doktoranci.pb.edu.pl

CHARAKTERYSTYKA POMP CIEPŁA

Heat pumps characterisation

Słowa kluczowe: pompy ciepła, kolektory słoneczne, rekuperacja

Keywords: heat pumps, solar collectors, recuperation

*Składam serdeczne podziękowania
Pani dr hab. inż. Katarzynie Gładyszewskiej-Fiedoruk
za udzielenie cennych wskazówek w powstaniu niniejszej pracy.*

Streszczenie:

Rosnące ceny paliw kopalnianych i utrzymująca się już od kilku lat zainteresowanie ekologią spowodowały większe zainteresowanie alternatywnymi źródłami energii. Dla przeciętnego użytkownika najważniejszy jest jednak aspekt finansowy, dlatego też ciepło, które nie kosztuje jest marzeniem większości inwestorów.

Sensownym rozwiązaniem na zminimalizowanie wydatków może być zastąpienie dotąd tradycyjnych źródeł energii źródłem ekologicznym, dających taniej energię ze środowiska. Głównym i podstawowym źródłem energii odnawialnej jest i pozostanie Słońce. Możliwe jest więc zastosowanie kolektorów słonecznych. Systemy kolektorów słonecznych sprawdzają się wszędzie tam, gdzie notuje się znaczne zużycie ciepłej wody np. domkach jednorodzinnych, hotelach, firmach itd. Alternatywą dla kolektorów słonecznych w dzisiejszych czasach są pompy ciepła. Jednakże jedno i drugie rozwiązanie ma swoje zalety i wady, poza tym cechuje je również okresowość działania jak i wydajność, przez co nie zawsze mogą w pełni zaspokoić zapotrzebowanie na energię ciepłą danego obiektu.

Rozwiązaniem tym mógłby być układ wykorzystujący zarówno pompę ciepła i systemem kolektorów słonecznych. Dodatkowo system mógłby wspomóc odzysk ciepła z instalacji wentylacyjnej, czyli rekuperacja. Te systemy powinny w należyty sposób zapewnić całkowite zapotrzebowanie na ciepło poszczególnych budynków.

Wstęp

Zwiększona wartość zanieczyszczeń powietrza i idące z tym zaostrzenia eksploatacji kotłów stałopalnych spowodowały większe zainteresowanie alternatywnymi źródłami energii. Oprócz kwestii ekologicznych ważny jest również aspekt finansowy, dlatego też ciepło, które nie generuje kosztów jest marzeniem większości inwestorów.

Rozwiązaniem na zmniejszenie wydatków może być zastąpienie tradycyjnych źródeł energii źródłem ekologicznym, które w ogólnym rozrachunku wytwarzają tanią energię ze środowiska. Głównym i podstawowym źródłem energii odnawialnej jest Słońce. Możliwe jest więc użycie kolektorów słonecznych. Kolektory słoneczne sprawdzają się tam, gdzie obserwuje się znaczne zużycie ciepłej wody użytkowej. Zamiennie z kolektorami słonecznymi stosuje się pompy ciepła.

Stosowane są również układy wykorzystujące pompę ciepła i systemem kolektorów słonecznych, wspomaganych dodatkowo rekuperacją. Te systemy powinny w należyty sposób zapewnić całkowite zapotrzebowanie na ciepło poszczególnych budynków.

Pompy ciepła

Pompa ciepła jest urządzeniem, które przy pomocy dodatkowej energii przenosi ciepło z ciała o niższej temperaturze do ciała o temperaturze wyższej [1].

Ze względu na zasadę pracy pompy ciepła możemy podzielić na trzy podstawowe grupy [1]:

- sprężarkowe pompy ciepła,
- sorpcyjne pompy ciepła (absorpcyjne, adsorpcyjne)
- pompy ciepła Vuilleumiera.

Budowa i zasada działania sprężarkowych pomp ciepła

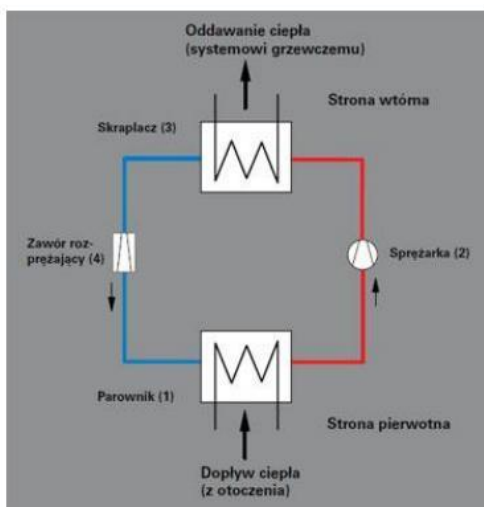
Podstawowymi elementami sprężarkowej pompy ciepła są parownik i skraplacz, sprężarka i zawór rozprężny. W skład budowy pompy ciepła wchodzi jeszcze: presostaty, układy elektryczne zabezpieczające sprężarkę, zawory termostaticzne, itp.

Obieg dolnego źródła ciepła połączony jest z obiegiem termodynamicznym za pomocą parownika, zaś obieg górnego źródła ciepła z obiegiem termodynamicznym łączy skraplacz.

W obiegu dolnego źródła ciepła, energia pobierana jest z niskotemperaturowego źródła i transportowana jest do parownika w pompie ciepła. Czynnik roboczy doprowadzany do wtórnej strony parownika to zimny czynnik termodynamiczny.

W obiegu górnego źródła ciepła ciepło pobierane jest od czynnika o wysokiej temperaturze, a następnie odprowadzane jest do odbiorców. W skraplaczu odbywa się przekazanie tej energii. Praca pompy ciepła polega na następujących zjawiskach fizycznych:

- sprężanie,
- skraplanie,
- rozprężanie,
- parowanie.



Rys. 1. Schemat zasady działania sprężarkowej pompy ciepła

Źródło: Zeszyty fachowe, Pompy ciepła, Viessmann 11/2009 [11]

Kolektory słoneczne do podgrzewu wody

Kolektor słoneczny to wysokowydajne urządzenie służące do przetwarzania energii słonecznej na energię, która może być bezpośrednio wykorzystywana przez człowieka. Kolektor słoneczny składa się z kilku podstawowych części, elementów: izolacji, osłony, absorbera i konstrukcji (tj. obudowy, konstrukcji nośnej, króćców pomiarowych).

Ogólna zasada działania kolektorów słonecznych polega na dotarciu energii promieniowania słonecznego (za pośrednictwem płyty szklanej) do absorbera. Ogrzewa go i tym samym oddziałuje na czynnik roboczy, który znajduje się w kanaliku. Ważnymi wartościami dla wzrostu temperatury czynnika są natężenie promieniowania i natężenie przepływu. Promienie słoneczne, które dotrze do absorbera, nie wydostaje się ponownie do otoczenia, określa się więc go mianem „pułapki promieniowania”. Czynnik roboczy niosący energię przepływa do zbiornika buforowego. Dzieje się to za pomocą pompy obiegowej. Pompa ta uruchamia się w momencie, gdy woda w układzie solarnym będzie wyższa niż woda w zbiorniku [6].

Zgodnie z normą PN EN ISO 9488 „Energia słoneczna. Technologia” ze względu na konstrukcję, kolektory słoneczne możemy podzielić na [8]:

- płaskie,
- bez osłony,
- próżniowe,
- próżniowe rurowe,
- skupiające,
- ognisku liniowym,
- paraboliczne rynnowe,
- ognisku punktowym,
- paraboliczne,
- zespolone parabolicznie skupiające,
- wielościannowe,
- Fresnela,
- nadążne za słońcem,
- żaluzyjne.

Na polskim rynku najbardziej znane i najczęściej stosowane są kolektory próżniowe rurowe i kolektory płaskie.

Systemy pracy układu grzewczego

Produkowane obecnie pompy ciepła, w zależności od ich uwarunkowań, można eksploatować w różny sposób. Odpowiednie eksploatowanie pompy ciepła należy dobrać w zależności od projektowanego systemu ogrzewania jak i dobranego źródła ciepła. Rozróżnia się dwa sposoby użytkowania tego typu urządzeń:

- układ monowalentny – układ, w którym pompa ciepła jest jedynym źródłem
- układ biwalentny – układ, w którym pompa ciepła jest podstawowym źródłem zasilania instalacji c.o., ciepła, a dodatkowym tzw. szczytowym źródłem ciepła kocioł elektryczny, gazowy lub olejowy.

Monowalentny tryb eksploatacji

W trybie tym pompa ciepła jest jedynym źródłem ciepła, gdyż pokrywa w pełni zapotrzebowanie na ciepło. Eksploatacja tego rodzaju jest bardzo efektywna, ponieważ pozwala na osiągnięcie wysokiego wskaźnika pracy rocznej. W przypadku tym należy wybrać takie źródła ciepła, które są niezależne bądź mało zależne od temperatury zewnętrznej i nawet przy niższych temperaturach gwarantują odpowiedni pobór ciepła. Takimi źródłami ciepła są grunt i woda gruntowa. Ze względów technicznych, ale przede wszystkim ekonomicznych istnieją ograniczenia co do maksymalnej temperatury na zasilaniu. Pompa ciepła powinna zasilać przede wszystkim niskotemperaturowe instalacje ogrzewania (ogrzewanie podłogowe, ogrzewanie powietrzne). Temperatura wody na zasilaniu wody grzewczej powinna być niższa bądź równa 65°C , jednak im mniejsza różnica między temperaturą dolnego źródła ciepła, a temperatura wody grzewczej, tym lepsza wydajność pompy. Należy też pamiętać, że projektowe zapotrzebowanie na ciepło nie powinno przekroczyć maksymalnej mocy pompy ciepła, a system grzewczy powinien być zaprojektowany na temperaturę niższą od maksymalnej temperatury zasilania pompy ciepła [4].

Istnieje szczególne rozwiązanie monowalentnego układu, które wykorzystuje drugie źródło ciepła. Niektóre źródła podają ten układ jako oddzielny monoenergetyczny tryb eksploatacji. Układem takim jest układ z wodnymi zasobnikami ciepła, które wyposażone są w dodatkowe grzałki elektryczne (elektryczny podgrzewacz wody lub buforowy zbiornik wody grzewczej z wbudowaną elektryczną wkładką grzejną). Pompy ciepła w tym układzie mają mniejsze wymiary dzięki czemu koszty zakupu urządzenia są niższe i mniejszy jest koszt późniejszej eksploatacji [4].

Biwalentny tryb eksploatacji

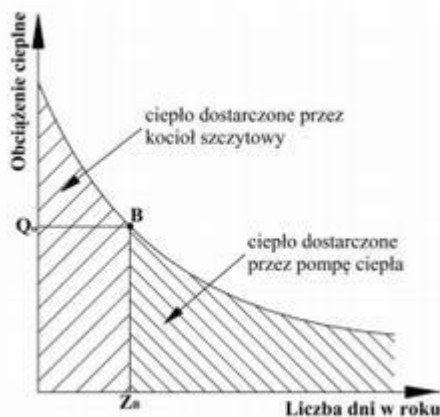
Biwalentne układy pomp ciepła, które do zapotrzebowania na ciepło pokrywają przez dwa źródła można podzielić na:

- system rozdzielony (alternatywny),
- system równoległy,
- system mieszany.

System rozdzielony (alternatywny):

W układzie tym pompa ciepła i szczytowe źródło ciepła nigdy nie pracują w tym samym czasie. Graniczna temperatura powietrza zewnętrznego wyznaczana jest przez punkt przecięcia dwóch linii- statycznej charakterystyki pompy ciepła i prostą, będącą wykresem zmienności obciążenia cieplnego budynku. Graniczna temperatura powietrza zewnętrznego nazywana jest punktem biwalentnym (troszkę

rzadziej punktem przełączenia). Pompa ciepła powyżej granicznej temperatury zewnętrznej pracuje sama pokrywając całe zapotrzebowanie na ciepło. Poniżej punktu biwalentnego pracuje jedynie kocioł grzewczy i wówczas tylko on pokrywa zapotrzebowanie na ciepło. Układ ten jest zalecany z pompami ciepła powietrznymi (typu powietrze/woda) [4].



Rys. 2. Zmienność obciążeń cieplnych w biwalentnym systemie alternatywnym: Q_0 – obliczeniowa moc grzejna pompy ciepła, ZB – ilość dni eksploatowanych przez kocioł szczytowy, B – punkt biwalentny

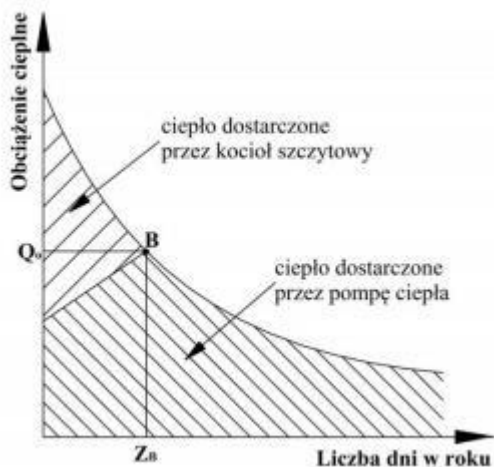
Źródło: [http : www.odnawialne-w-domu.pl/uklady_biwalentne](http://www.odnawialne-w-domu.pl/uklady_biwalentne) [12]

System równoległy:

Wg Rubika [4] układzie tym pompa ciepła i kocioł grzewczy (szczytowy) pokrywają całkowite zapotrzebowanie na ciepło. Dodatkowe źródło ciepła uruchamiane jest w zależności od granicznej temperatury powietrza zewnętrznego oraz zapotrzebowania cieplnego instalacji c.o.. Przy projektowaniu tego typu układu przyjmuje się, że pompa ciepła powinna pokrywać od 50 do 70% maksymalnego zapotrzebowania na energię cieplną. Eksploatacja biwalentno-równoległa zalecana jest szczególnie w instalacjach z pompami ciepła gruntowymi (typu solanka/woda) lub pompami ciepła wodnymi (typu woda/woda) [4].

W układzie tym pompa ciepła i szczytowe źródło ciepła nigdy nie pracują w tym samym czasie. Graniczna temperatura powietrza zewnętrznego wyznaczana jest przez punkt przecięcia dwóch linii- statycznej charakterystyki pompy ciepła i prostą, będącą wykresem zmienności obciążenia cieplnego budynku. Graniczna temperatura powietrza zewnętrznego nazywana jest punktem biwalentnym (troszkę rzadziej punktem przełączenia). Pompa ciepła powyżej granicznej temperatury zewnętrznej pracuje sama pokrywając całe zapotrzebowanie na ciepło. Poniżej punktu

biwalentnego pracuje jedynie kocioł grzewczy i wówczas tylko on pokrywa zapotrzebowanie na ciepło. Układ ten jest zalecany z pompami ciepła powietrznymi (typu powietrze/woda) [4].

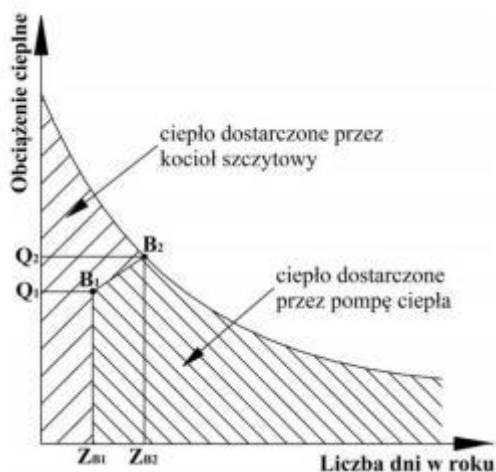


Rys. 3. Zmienność obciążeń cieplnych w biwalentnym systemie równoległym: Q_0 – obliczeniowa moc grzejna pompy ciepła, Z_B – ilość dni eksploatowanych przez kocioł szczytowy, B – punkt biwalentny.

Źródło: [http : www.odnawialne-w-domu.pl/uklady_biwalentne](http://www.odnawialne-w-domu.pl/uklady_biwalentne) [12]

System mieszany:

W systemie mieszanym (równoległo-alternatywnym) pompa ciepła pracuje równolegle z kotłem grzewczym tylko do określonej temperatury zewnętrznej. Gdy temperatura ta jest większa od temperatury obliczeniowej, zapotrzebowanie obiegów grzewczych pokrywane jest wyłącznie przez kocioł grzewczy, a pompa zostaje wyłączona [4].



Rys. 4. Zmienność obciążeń cieplnych w biwalentnym systemie mieszanym: Q_1 – minimalna moc grzejna pompy ciepła podczas pracy obu źródeł, Q_2 – obliczeniowa moc grzejna pompy ciepła, Z_{B1} – ilość dni eksploatowanych tylko przez kocioł szczytowy, Z_{B2} – ilość dni eksploatowanych w systemie biwalentnym, B_1 , B_2 – punkt biwalentny.

Źródło: [http : www.odnawialne-w-domu.pl/uklady_biwalentne](http://www.odnawialne-w-domu.pl/uklady_biwalentne) [12]

Zastosowanie pomp ciepła

Pompy ciepła stosowane są do ogrzewania budynków i przygotowania c.w.u głównie w obiektach gdzie nie ma możliwości zastosowania kotłów gazowych. Pompy ciepła są bardzo ciekawą alternatywą dla kotłów olejowych – ze względu na wysokie ceny oleju opałowego, jak i kotłów stałopalnych – ze względu na bezobsługowość i bezpieczeństwo systemu. Ich największą wadą na pewno jest wysoki koszt inwestycyjny – w porównaniu do tradycyjnych kotłowni stałopalnych większy nawet 5-6 krotnie, jednakże pompy ciepła cechują niskie koszty eksploatacyjne, związane głównie z ceną energii elektrycznej.

Wysokie koszty inwestycji są głównym czynnikiem hamującym upowszechnianie tego typu rozwiązań, dlatego ciekawą opcją jest powietrzna pompa ciepła c.w.u, której koszt zakupu, adaptacji instalacji i eksploatacji jest stosunkowo niewielki.

Poniżej chciałbym zaprezentować jak wyglądają koszty eksploatacji takiej pompy w porównaniu do ogrzewania wody za pomocą grzałki elektrycznej. Analiza została przeprowadzona przeze mnie, na potrzeby jednego z białostockich przedsiębiorstw.

Zawarte ceny są zgodne z obowiązującym cennikiem w okresie wrzesień – październik 2014 na terenie miasta Białostok.

Dzienne zapotrzebowanie zakładu na c.w.u wynosiło ok. 400 l, cena energii elektrycznej według cennika PGNiG wynosił 0,56 zł/kWh.

Średni współczynnik efektywności pompy podawany przez producentów $COP = 3,5$.

Ogrzanie tej ilości wody przez grzałkę elektryczną oznaczałoby pobór energii w granicach 16,26 kWh – według wcześniejszych, własnych wyliczeń.

Miesięczny koszt podgrzewu wody za pomocą grzałki elektrycznej:

$$D_{ke} = X \cdot C_e \cdot n \left[\frac{\text{zł}}{\text{dzień}} \right] \quad (1)$$

gdzie:

X – ilość energii potrzebnej na podgrzanie 400 l wody [kWh]

C_e – cena 1 kWh energii elektrycznej według cennika PGNiG

n – okres trwania analizy – przyjęto 30 dni = 1 miesiąc [miesiąc]

$$D_{ke} = 16,26 \cdot 0,56 \cdot 30 = 273,3 \left[\frac{\text{zł}}{\text{miesiąc}} \right]$$

Miesięczny koszt podgrzewu wody za pomocą pompy ciepła:

$$D_{kp} = \frac{X \cdot C_e \cdot n}{COP} \left[\frac{\text{zł}}{\text{dzień}} \right] \quad (2)$$

gdzie:

X – ilość energii potrzebnej na podgrzanie 400 l wody [kWh]

C_e – cena 1 kWh energii elektrycznej według cennika PGNiG

n – okres trwania analizy – przyjęto 30 dni = 1 miesiąc [miesiąc]

COP – współczynnik efektywności pompy [-]

$$D_{kp} = (16,26 \cdot 0,56 \cdot 30) / 3,5 = 78 \left[\frac{\text{zł}}{\text{miesiąc}} \right]$$

Jak wynika z powyższej analizy różnica w kosztach eksploatacyjnych tych dwóch rozwiązań wynosi ok. 196 zł miesięcznie przy dziennym zużyciu 400, jednakże przy większym zużyciu ta różnica byłaby jeszcze większa. W skali roku daje to nam oszczędności w granicach 2300 zł, co wynosi mniej więcej tyle, ile różnica kosztów zakupu pompy ciepła (ok. 7500 zł), a podobnego parametrami zbiornika ze stali nierdzewnej z grzałką elektryczną (4900 zł), czyli okres zwrotu wynosi niecałe 14 miesięcy – co jest bardzo dobrym wynikiem.

Niemniej należy pamiętać, że przy budynkach jednorodzinnych, które docelowo mają być głównymi odbiorcami tego typu pomp ciepła, zapotrzebowanie wody jest znacząco niższe, przez co okres zwrotu może ulec nawet dwukrotnemu wydłużeniu.

Powyższe zestawienie nie uwzględnia kosztów serwisowych które mogą wystąpić w przypadku pomp ciepła, a których praktycznie brak w drugim rozwiązaniu.

Ponadto nie uwzględniono dodatkowych kosztów eksploatacyjnych, takich jak np. wymiany filtrów na przewodach zasysających, co głównie zależy od warunków w jakich pracuje pompa, a i kwoty w tym wypadku są niewielkie i nie wpływają znacząco na ogólne porównanie.

Powyższe zestawienie ukazuje jaka jest główna zaleta stosowania powietrznych pomp ciepła – niskie koszty zakupu i eksploatacji. Należy mieć jednak na uwadze, iż w porównaniu z innymi rodzajami energii (np. gaz, olej), opłacalność i okres zwrotu znacznie spadnie, jednakże podczas próby wykonania takiej analizy np. z kotłem gazowym, trzeba pamiętać że kosztami eksploatacyjnymi nie będzie wyłącznie zużycie gazu, ale również energia elektryczna potrzebna do pracy kotła – o czym producenci praktycznie nie wspominają.

Przykładowy dobór gruntowej pompy ciepła

W tym rozdziale przedstawiono przykładowy sposób doboru pompy ciepła, oraz długości i ilości sond pionowych na cele c.w.u i centralnego ogrzewania. Dobór został sporządzony dla typowego domku jednorodzinnego, użytkowanego przez czteroosobową rodzinę.

Podstawowe dane na których opierają się poniższe obliczenia to:

Q_{co} – zapotrzebowanie na cele centralnego ogrzewania – przyjęto 9 kW

U – liczba mieszkańców – przyjęto 4 osoby

Q_c – średnie dobowe jednostkowe zapotrzebowanie na c.w.u na jednego mieszkańca, do obliczeń przyjęto $Q_c = 90 \text{ dm}^3/\text{M}\cdot\text{d}$

Obliczenia zapotrzebowania na ciepło na cele ciepłej wody użytkowej

Obliczenia wykonano zgodnie z normą PN-92/B-01706

a) średni dobowy rozbiór wody

$$q_d^{\text{sr}} = U \cdot q_c \left[\frac{\text{dm}^3}{\text{d}} \right] \quad (3)$$

gdzie:

q_d^{sr} – średni dobowy rozbiór wody [l/d],

U – liczba mieszkańców, $U = 4$ osoby,

q_c – średnie dobowe jednostkowe zapotrzebowanie na c.w.u na jednego użytkownika, do obliczeń przyjęto $q_c = 90 \text{ dm}^3/\text{M}\cdot\text{d}$

$$q_d^{\text{sr}} = 4 \cdot 90 = 360 \frac{\text{dm}^3}{\text{d}}$$

b) średni godzinowy rozbiór wody

$$q_h^{\dot{s}r} = \frac{q_d^{\dot{s}r}}{\tau} \left[\frac{dm^3}{h} \right] \quad (4)$$

gdzie:

τ – czas użytkowania instalacji w ciągu doby, $\tau = 18$ h/d

$$q_h^{\dot{s}r} = \frac{360}{18} = 20 \frac{dm^3}{h}$$

c) maksymalny godzinowy rozbiór ciepłej wody

$$q_{hmax} = q_{h\dot{s}r} \cdot N_h \quad (5)$$

gdzie:

N_h – współczynnik godzinowej nierównomierności rozbioru wody,

$N_h = 9,32 \cdot 4^{-0,244} = 6,65$ [-]

$$q_{hmax} = 20 \cdot 6,65 = 133$$

d) maksymalne zapotrzebowanie na moc cieplną, na cele c.w.u.

$$Q_{cwu}^{\max} = \frac{q_h^{\max} \cdot c \cdot \rho \cdot (t_c - t_z)}{3600}, [kW] \quad (6)$$

gdzie:

t_c – temperatura wody ciepłej; $t_c = 45^\circ C$,

t_z – temperatura wody zimnej; $t_z = 10^\circ C$.

$$Q_{cwu}^{\max} = \frac{133 \cdot 4,19 \cdot 1 \cdot (60 - 10)}{3600} = 5,42 kW$$

e) średnie zapotrzebowanie ciepła na cele c.w.u.

$$Q_{cwu}^{\dot{s}r} = \frac{Q_{cwu}^{\max}}{N_h}, [kW] \quad (7)$$

$$Q_{cwu}^{\dot{s}r} = \frac{5,42}{6,65} = 0,82 kW$$

Dobór pomp ciepła

$$Q_k = 1,1 \cdot (Q_{c.o.} + Q_{cwu}^{\dot{s}r}) \quad (8)$$

gdzie:

Q_{co} – zapotrzebowanie ciepła na cele co, $Q_{c.o.} = 9$ kW,

$$Q_k = 1,1 \cdot (9 + 0,82) = 10,8 \text{ kW}$$

Dobrano pompę ciepła typu solanka/woda, Vitocall 300-G (dwustopniowa), typ BW 212 firmy Viessmann, o mocy grzewczej 12,8 KW, wydajność chłodnicza 10,0 kW.

Obliczanie niezbędnej długości sond pionowych

$$L = \frac{Q_k}{g_E} [m] \quad (9)$$

gdzie:

L – wymagana długość sond pionowych, [m]

Q_k – wydajność chłodnicza pompy, [W]

g_E – jednostkowa moc cieplna pobrana z gruntu, [W/m]

$$L = \frac{1000}{50} = 200 [m]$$

Obliczanie ilości sond pionowych

$$X = \frac{L}{L_1} [\text{sztuk}] \quad (10)$$

gdzie:

X – ilość sond gruntowych,

L – wymagana długość sond gruntowych, $L = 200\text{m}$

L_1 – przyjęta długość pojedynczej sondy, $L_1 = 50\text{m}$

$$X = \frac{200}{50} = 4 \text{ sztuk}$$

Na zaspokojenie potrzeb powyższego budynku jednorodzinnego zamieszkałego przez 4 osoby, dobrano jedną pompę ciepła typu solanka/woda o mocy grzewczej 12,8 KW, wydajność chłodnicza 10,0 kW, oraz 4 sondy pionowe o długości pojedynczej sondy 50 metrów. Układ ten może być również wspomagany przez baterię kolektorów słonecznych.

Podsumowanie

Głównymi zaletami stosowania pomp ciepła są: niskie koszty eksploatacji, bezobsługowe użytkowanie i względnie niskie oddziaływanie na środowisko, przez co pompy ciepła uważane są za ekologiczne źródło energii odnawialnej. Instalacje z użyciem pomp ciepła są doskonałą alternatywą, tam gdzie nie ma możliwości montażu kondensacyjnych kotłów gazowych, których koszt eksploatacyjny jest wyższy, natomiast zostaje to zrekompensowane niewielkimi kosztami inwestycyjnymi w porównaniu do pomp ciepła.

Literatura

- [1] Praca zbiorowa pod kierownictwem Zawadzkiego M., *Kolektory Słoneczne. Pompy ciepła – Na Tak*, Polska Ekologia, 2003
- [2] Oszczak W., *Ogrzewanie domów z zastosowaniem pomp ciepła*, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2009
- [3] Zalewski W., *Pompy ciepła sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne. Podstawy teoretyczne. Przykłady obliczeniowe*, Wyd. IPPU MASTA, 2001
- [4] Rubik M., *Pompy ciepła –Poradnik*, Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna”
- [5] www.pae.org.pl – *Prezentacja Kampania SOLARNA.pdf*, Kampania Solarna „Energia ze Słońca – pomysł na oszczędność”, Podkarpacka Agencja Energetyczna Sp. z o.o., 2009
- [6] Wiśniewski G., Gołębiowski S., Gryciuk M., Kurowski K., Więcka A., *Kolektory słoneczne, Energia słoneczna w mieszkalnictwie, hotelarstwie i drobnym przemyśle*, Medium Dom Wydawniczy, Warszawa, 2008
- [7] Jastrzybska G., *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*, Wyd. Naukowo – Techniczne, Warszawa 2007
- [8] Wiśniewski G., Gołębiowski S., Gryciuk M., Kurkowski K., *Kolektory słoneczne. Poradnik wykorzystania energii słonecznej, wydanie III*, Wyd. COBI, Warszawa, 2006
- [9] Pluta Z., *Słoneczne instalacje energetyczne*, Wyd. Oficyna Wydawnicza Polska, Warszawa, 2007
- [10] Purgał P., Orman Ł., *Korzystanie z odnawialnych źródeł energii*, Politechnika Świętokrzyska, Kielce, 2012
- [11] Zeszyty fachowe, *Pompy ciepła*, Viessmann 11/2009
- [12] www.odnawialne-w-domu.pl/uklady_biwalentne

Agnieszka Gurgul¹⁾

Politechnika Wrocławska, Wydział Inżynierii Środowiska

Zakład Technologii Odpadów i Remediacji Gruntów

Monika Zabłocka-Malicka,

Politechnika Wrocławska, Wydział Chemiczny

Zakład Chemii Analitycznej i Metalurgii Chemicznej

¹⁾agnieszka.gurgul@pwr.edu.pl

ZASTOSOWANIE METOD TERMICZNYCH W RECYKLINGU ODPADÓW ELEKTRONICZNYCH

Thermal methods in recycling of the electronic waste

Słowa kluczowe: odpady elektroniczne, piroliza, zgazowanie

Keywords: electronic waste, pyrolysis, gasification

Streszczenie:

Produkcja urządzeń elektronicznych jest jedną z najszybciej rozwijających się branż przemysłu, co oznacza również ciągły wzrost ilości odpadów zawierających elementy elektroniczne. Jednocześnie intensywna eksploatacja zasobów naturalnych oraz problemy środowiskowe powodują rosnącą potrzebę prowadzenia efektywnego recyklingu w celu odzysku materiałów i energii. W przypadku odpadów elektronicznych istotną barierą dla recyklingu jest ich złożona budowa. Odpady te składają się z tworzyw sztucznych oraz metali, takich jak Cu, Al, Fe, Pb, Zn, Ag, Au, Pt, Pd, których odzysk jest kluczowym elementem recyklingu. Tworzywa sztuczne wchodzące w skład tych odpadów mają wysoki potencjał energetyczny, dlatego metody, które wykorzystują ten potencjał i jednocześnie zmniejszają ilość odpadów przeznaczanych do składowania oraz pozwalają odzyskiwać surowce wydają się być w tym przypadku najbardziej odpowiednie. Do metod tych należą

metody termicznego przetwarzania odpadów, takie jak: spopielanie, zgazowanie i piroliza. Wadą tych metod mogą być szkodliwe emisje do atmosfery oraz pozostałości po procesie, potencjalnie o dużej uciążliwości. Nowoczesne termiczne technologie wykorzystywane w recyklingu odpadów elektronicznych muszą zatem charakteryzować się wysoką efektywnością, skutecznością odzyskiwania surowców oraz minimalizowaniem emisji. W pracy porównano metody termiczne wykorzystywane w recyklingu odpadów elektronicznych, ze szczególnym uwzględnieniem zgazowania i pirolizy. Zostały omówione parametry tych procesów, możliwości wykorzystania produktów końcowych oraz efektywność w odzyskiwaniu surowców, głównie metali.

Charakterystyka odpadów elektronicznych

Do grupy odpadów sprzętu elektronicznego należą zużyte urządzenia lub ich elementy zawierające polichlorowane bifenyle, freony, HCFC, HFC, azbest oraz inne substancje niebezpieczne [1]. Część tej grupy odpadów zawiera wbudowane obwody drukowane, które charakteryzują się złożoną budową i scaleniem elementów metalowych z tworzywami sztucznymi. Spośród metali, które stanowią około 40% wagowych obwodów drukowanych, największy udział mają Cu, Al, Pb, Zn, Ni, Fe i Sn [1]. Dominującą fazą niemetaliczną płyt obwodów drukowanych jest włókno szklane wzmacniane żywicą epoksydową lub papier celulozowy wzmacniany żywicą fenolową [1]. Ponadto w skład tych elementów wchodzi również dodatki modyfikujące właściwości materiałowe, takie jak bromowe środki uniepalniające, co jest istotne ze względu na potencjalne emisje z procesów ich przetwarzania, szczególnie termicznych.

Zawartość poszczególnych składników w odpadach elektronicznych jest cechą zmienną nawet w tej samej grupie odpadów, co utrudnia skuteczny odzysk metali oraz innych surowców. Zestawienie przedstawione w Tab.1 ilustruje skład materiałowy odpadów elektronicznych na przykładzie obwodów drukowanych.

Odzysk surowców z odpadów elektronicznych, które mogą zostać ponownie wykorzystane w produkcji, znacznie obniża koszty technologiczne oraz środowiskowe. Z powodu złożonego składu materiałowego odpadów elektronicznych istotnym zagadnieniem jest dobór odpowiedniej metody ich przetwarzania. Etapem wstępnym recyklingu odpadów elektronicznych jest zazwyczaj ręczny demontaż elementów stalowych i aluminiowych. Oddziela się również obudowy z tworzyw sztucznych i płytki drukowane. Tak wydzielone strumienie odpadów mogą być poddawane dalszym procesom recyklingu. Aby wykorzystać pełen potencjał energetyczny i materiałowy zawarty w odpadach elektronicznych pojedyncze metody są niewystarczające, dlatego najczęściej stosuje się technologie stanowiące kombinację kilku metod [1]. Najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie metod, które umożliwią odzysk surowców, energii i jednocześnie unieszkodliwią odpady. Naj-

bardziej rozpowszechnionymi metodami jest obróbka mechaniczna oraz separacja fizyczna, ponieważ są to metody proste i ekonomicznie opłacalne. W wielu pracach analizowane są również metody termiczne (spopielanie, zgazowanie, piroliza) oraz metody pirometalurgiczne i hydrometalurgiczne. Procesy termiczne mogą być wstępnym etapem ścieżki technologicznej, co pozwala na usunięcie części organicznej z odpadów elektronicznych oraz wydzielenie frakcji metalicznej, która następnie może być poddana finalnym procesom odzysku: mechanicznym, hydrometalurgicznym i pirometalurgicznym.

Tabela 1. Skład materiałowy obwodów drukowanych

Material	Średni udział	Udział, wt. % (ppm)
Cu	metale – 40 wt. %	10 – 26.8
Al		1.33 – 4.78
Pb		0.99 – 4.19
Zn		0.16 – 2.17
Ni		0.28 – 2.35
Fe		1.22 – 8.0
Sn		1.0 – 5.28
Sb		0.06 – 0.4
Au		80 – 1000 ppm
Pt		4.6 – 30 ppm
Ag		110 – 3300 ppm
Pd		10 – 294 ppm
SiO ₂	ceramika – 30 wt. %	15 – 41.86
Al ₂ O ₃		6 – 6.97
Alkalia i metale ziem alkalicznych (CaO)		6 – 9.95
Tytaniany, mika, itp.	tworzywa sztuczne – 30 wt.%	3
Polietylen		9.9 – 16
Polipropylen		4.8
Poliestry		4.8
Żywice epoksydowe		4.8
Polichlorek winylu		2.4
Politetrafluoroetylen		2.4
Nylon		0.9

Źródło: [1]

Przetapianie

Metody ogniowe (pirometalurgiczne) są obecnie najbardziej najważniejszym sposobem przetwarzania odpadów elektronicznych. Są one finalnym etapem złożonego łańcucha odzysku, obejmującego w Europie około 10.000 podmiotów zbierających, około 1000 podmiotów demontujących, 100 podmiotów separujących stru-

mień odpadowy na wymagane frakcje i tylko 3 podmioty przetapiające i rafinujące metalonośne strumienie [2]. W literaturze [2,3], przywoływana jest w tym przypadku przede wszystkim technologia ISASMELT™ (A GLENCORE Company) omawiana na przykładzie instalacji firmy Umicore N.V. (Belgia). Podobna instalacja zastosowana została w firmie Aurubis A.G. (Niemcy), w odróżnieniu od Boliden (Szwecja) z technologią obrotowego pieca Kaldo. W technologii ISASMELT™ wykorzystywany jest pionowy piec, w którym przetapiany jest złom miedzionośny w mieszaninie ze odpadami elektronicznymi (wraz z odpowiednimi topnikami i zawracanymi pyłami). Piec ładowany jest od góry, od góry też, za pomocą specjalnej lancy, wprowadzane jest powietrze wzbogacone w tlen (do 90%, odpowiednio do potrzeb technologicznych). W trakcie wypalania fazy ciekłe (top) są intensywnie mieszane gazami procesowymi, co warunkuje szybki bieg reakcji chemicznych. Topienie prowadzi się w temperaturze około 1200°C, po czym ciekły metal (miedź) i żużel usuwane są otwór spustowy w dole pieca. W ciekłej miedzi rozpuszczają się wszystkie metale szlachetne. Po spuszczeniu i oddzieleniu od żużla miedź poddawana jest typowej przeróbce, a metale szlachetne pozostają w szlamie anodowym z procesu elektrolizy. Według Umicore [8] wydajność pieca ISASMELT™ wynosi około 1000 ton wsadu (ogółem) na dobę, a wydajność odzysku metali szlachetnych przekracza 95%.

Spopielanie

Spalanie jest to zespół szybko przebiegających reakcji utleniania określonego paliwa. Dla spalania paliwa konieczne jest doprowadzenie odpowiedniej ilości tlenu, dostarczanego głównie z powietrzem. Produktami procesu spalania są spaliny oraz stałe pozostałości (popiół i żużel). Celem spalania klasycznego jest uzyskanie energii, natomiast celem spopielania jest likwidacja lub zmniejszenie objętości odpadów niebezpiecznych dla środowiska. Możliwe jest połączenie tych dwóch celów poprzez energetyczne wykorzystanie odpadów.

Proces spalania jest w wielu krajach, również w Polsce, stosowany do unieszkodliwiania odpadów niebezpiecznych, a także do zmniejszenia objętości odpadów i odzysku energii. Procesowi temu poddawane są głównie zmieszane stałe odpady komunalne, tworzywa sztuczne i osady ściekowe. Prowadzone są również badania nad wykorzystaniem procesu spalania w celu unieszkodliwiania i odzysku złożonych odpadów elektronicznych.

W warunkach laboratoryjnych takie badania były m.in. prowadzone w reaktorze ze złożem fluidalnym [2]. Złoże to charakteryzuje się jednorodną, wysoką temperaturą oraz stałym dostępem utleniacza koniecznego do prowadzenia procesu spalania. W jednym z opisanych w pracy [9] eksperymentów, podczas procesu spalania każdej próbki obwodu drukowanego utrzymywana była przez 3 minuty temperatura 840-850°C oraz stężenie tlenu 6,2% obj. Podana procesowi próbka zawie-

rała elementy elektroniczne płytek obwodów drukowanych. Proces spopielenia w złożu fluidalnym spowodował wypalenie średnio około 21% masy wprowadzonych odpadów.

Niepalna pozostałość stała jest materiałem kruchym, który może być poddany obróbce chemicznej lub mechanicznej w celu odzysku określonych pierwiastków. W tym celu, podczas eksperymentu, materiał został poddany rozdrobnieniu do wielkości ziaren $<0,2$ mm, a następnie został poddany ekstrakcji kwasem siarkowym (VI) o stężeniach 95%, 30%, 40% i 50%. Po każdej ekstrakcji obliczono ubytek masy oraz przeprowadzono analizę zawartości metali w roztworze (Fe, Cu, Zn, Sn). Takie połączenie dwóch procesów: spopielenia oraz chemicznej ekstrakcji umożliwia usunięcie części organicznej odpadów oraz jednocześnie otrzymanie mieszaniny metali, które mogą być odzyskane.

Piroliza

Piroliza jest procesem termochemicznym, podczas którego zachodzi rozkład materii organicznej. Jest procesem endotermicznym, czyli wymaga dostarczenia energii ze źródła zewnętrznego oraz odbywa się bez dodatkowych substratów, w szczególności tlenu, jest zatem procesem dekompozycji materiału organicznego w warunkach ograniczonego dostępu tlenu. Może być ona pierwszym etapem termicznej konwersji podczas spalania lub zgazowania, gdzie w dalszej kolejności następuje częściowe lub pełne utlenienie produktów wstępnego rozkładu [2]. Produktem końcowym procesu pirolizy może być karbonizat, olej, lub gaz, a proporcje tych produktów zależą głównie od zastosowanego rodzaju surowca, temperatury i czasu (szybkości) procesowania. Manipulując parametrami procesu, takimi jak temperatura pracy reaktora, czas przebywania par w reaktorze, możliwe jest ukierunkowanie procesu na otrzymywanie jednego z trzech preferowanych produktów [2]. Przykładowo, stosowanie temperatur w zakresie 300-500°C umożliwia produkcję głównie oleju pirolitycznego, natomiast w wysokich temperaturach (500-900°C) dominującym produktem jest gaz.

Wiele dotychczasowych badań koncentruje się na poddaniu pirolizie odpadów polimerowych [2]. Stosowanie tej technologii powoduje obniżenie ilości składowanych odpadów, odzysk energii, a w konsekwencji ograniczenie zużycia zasobów ropy naftowej. Ponadto, w przeciwieństwie do innych technik zagospodarowania polimerowych odpadów, piroliza nie wymaga wstępnego rozdzielania poszczególnych tworzyw, co jest znacznym ułatwieniem obniżającym koszty inwestycyjne instalacji. Jak już wspomniano, odpady elektroniczne zawierają duży udział tworzyw sztucznych o wysokim potencjale energetycznym, dlatego proces pirolizy może znaleźć zastosowanie również przy przetwarzaniu tej grupy odpadów. Najczęściej opisywane jest zastosowanie tej metody do przetwarzania odpadowych płyt obwodów drukowanych [3, 12], ale proces pirolizy może być również stosowany

do odpadów elektronicznych różniących się pochodzeniem, składem i właściwościami. E. Kantarelis [12] prowadził pirolizę odpadów elektronicznych w atmosferze azotu, ciepło zostało wytworzone poprzez spalanie metanu, a parametry procesu (temperatura, skład gazu i ubytek masy) były mierzone podczas trwania całego procesu. Ubytek masy podczas procesu wyniósł 52%. Stałe pozostałości mogły następnie zostać poddane procesom odzysku metali.

Istotnym problemem jest sposób odzyskiwania metali z odpadów urządzeń elektronicznych oraz z pozostałości po pirolizie. Najczęściej stosowanymi metodami jest wstępna separacja magnetyczna pozwalająca na oddzielenie stali i aluminium, a następnie zastosowanie metod ługowania np. siarczanem amonu, a także metody elektrochemiczne oraz selektywnego rozpuszczania [13]. Zastosowanie kilku następujących po sobie metod zapewnia odzyskanie wysokiej jakości metali z odpadów elektronicznych.

Zgazowanie

Zgazowanie jest procesem przekształcania ciała stałego (paliwa, odpadu) w gaz. Efektywnie proces prowadzony jest w temperaturach bliskich 1000°C w obecności czynnika utleniającego, którym może być powietrze, tlen, a także para wodna. Jego produktem jest gaz zawierający przede wszystkim wodór, tlenek węgla, metan, dwutlenek węgla, azot i parę wodną. Podobnie jak w procesie pirolizy, zgazowanie zachodzi we względnie wysokiej temperaturze, ale wprowadzony gazowy substrat reaguje z gazami pirolitycznymi oraz karbonizatem powodując, że palnymi produktami procesu są tylko gazy procesowe, natomiast stała pozostałość jest jedynie substancją mineralną [10]. Zatem celem procesu zgazowania jest otrzymanie gazowych produktów palnych, które mogą być wykorzystane energetycznie oraz niepalnej pozostałości stałej, która może zostać poddana kolejnym procesom w celu odzysku surowców.

Skład gazu, który jest produktem procesu, zależy od wielu czynników m.in. od składu surowców, warunków prowadzenia procesu oraz użytego czynnika zgazowującego. Z gazu po jego dalszym doczyszczeniu odzyskana może być energia (również ta zużyta w procesie zgazowania), ewentualnie gaz może być wykorzystany jako surowiec (tzw. gaz syntezowy).

Specyficzną formą zgazowania jest wykorzystanie stopionych węglanów w zgazowaniu węgla (aktywnego) lub przetwarzaniu odpadów elektronicznych w skali laboratoryjnej [2, 3]. W eksperymentach próbki epoksydowych obwodów drukowanych zostały poddane zgazowaniu strumieniem pary wodnej w azocie w temperaturze 600-700°C i pod ciśnieniem 0,1 MPa w mieszaninie eutektycznej węglanów litu, sodu i potasu [15]. Głównym produktem zgazowania był bogaty w wodór gaz syntezowy. Udział pozostałości smołowych obniżył się znacząco pod

wpływam obecności węglanów, które katalizowały, zdaniem autorów, przebieg zgazowania.

Zgazowanie w atmosferze pary wodnej

W Laboratorium Procesów Termicznych Zakładu Technologii Odpadów i Remediacji Gruntów, Wydziału Inżynierii Środowiska Politechniki Wrocławskiej, prowadzone są badania wykorzystujące proces allotermicznego zgazowania w atmosferze nadmiaru pary wodnej odpadów złożonych, zwartych i kompozytowych z odzyskiem faz metalicznych, mineralnych oraz gazu bogatego w wodór [4, 7]. Przykładem eksperymentu jest zgazowanie karty sieciowej (Rys. 1) w atmosferze pary wodnej, prowadzone w reaktorze kwarcowym ogrzewanym piecami rurowymi (Rys. 2).



Rys. 1. Karta sieciowa (3 Com PC/AT ISA) poddana zgazowaniu w atmosferze pary wodnej
Źródło: [1]



Rys. 2. Przygotowana do zgazowania karta sieciowa (fragment)
Źródło: [20]

Podczas trwającego 9 godzin procesu, temperatura w strefie zgazowania ukształtowała się po pierwszych 40 minutach na poziomie 850-900°C. Po ochłodzeniu produkt zgazowania (Rys. 3) poddano wytrząsaniu i separacji na frakcje.

Fracje o wielkości ziaren $>0,5$ mm poddano mieleniu (za wyjątkiem elementów stalowych).



Rys. 3. Produkt zgazowania karty sieciowej (fragment)

Źródło: [20]

Frację pylistą z głównego produktu, tj. fragmentów płyty drukowanej, umieszczono w tyglu korundowym, który następnie został ogrzany pod pylistym węglem w piecu komorowym przez 5 godzin do 1250°C . Po ochłodzeniu stwierdzono, że frakcja ta uległa dobremu przetopieniu, tworząc metaliczny wlewek oraz szklisty żużel (Rys. 4).



Rys. 4. Produkty przetopienia głównej frakcji zgazowania (metal + fragment fazy żużlowej)

Źródło: [20]

Gazem nośnym i jednocześnie reagentem w badanym procesie była wyłącznie para wodna, podawana w nadmiarze. Założeniem procesu było, aby gazowe produkty etapu pirolitycznego miały możliwość konwersji w odpowiednio wysokiej temperaturze do prostych substancji chemicznych (szczególnie wodoru i tlenku węgla) i ograniczenia tym samym tworzenia się smół i faz olejowych. Pozostałości stałe z tak przeprowadzonego procesu były materiałem, który mógł następnie zostać poddany procesom chemicznym w celu odzyskania faz metalicznych w typowych procesach metalurgicznych. Brak innych, poza parą wodną, reagentów (w szczególności powietrza) powoduje, że emisje do powietrza atmosferycznego występują dopiero przy energetycznym wykorzystaniu tzw. syngazu. Z kolei zawrót kondensatu wraz z wydzielonymi frakcjami węglowodorowymi eliminuje ścieki technologiczne.

Podsumowanie

Odpady elektroniczne są grupą odpadów o znacznym udziale substancji niebezpiecznych, które mogą zostać uwolnione podczas ich przetwarzania, jak również charakteryzują się wysokim udziałem metali. W obliczu kurczących się zasobów surowców, opracowanie technologii recyklingu tego typu odpadów jest ważną kwestią ze względów ekologicznych i ekonomicznych.

Efektywne przetwarzanie i recykling odpadów pochodzących z urządzeń elektrycznych i elektronicznych powinno charakteryzować się optymalizacją odzysku surowców, jak również eliminacją odpadów i emisji do atmosfery. Różnorodność tej grupy odpadów powoduje, że bardzo liczne badania procesów ich przetwarzania wydają się prawie zawsze niepełne, gdyż często są wyraźnie ukierunkowane wyłącznie na odzysk cennych składników (miedź i metale szlachetne) lub specyficzne, wtórne wykorzystanie materiałowe, np. niemetalicznych frakcji. Procesy termiczne, zastosowane przed właściwą separacją metali, mają na celu maksymalną eliminację faz organicznych spajających strukturę odpadów oraz pozostawienie nielotnych faz metalicznych i mineralnych, które następnie można poddać typowym procesom odzysku, podobnie do surowców oryginalnych. W zależności od oczekiwanej formy produktów końcowych, można dobierać właściwe parametrami procesów spopielenia, pirolizy lub zgazowania.

Procesy termiczne są szczególnie istotne w przypadku przetwarzania odpadów o zróżnicowanym składzie i właściwościach, składających się z mieszaniny tworzyw sztucznych oraz materii nieorganicznej, a odpady elektroniczne właśnie tym się charakteryzują. Wydaje się również, że rozwinięcie allotermicznych procesów zgazowania z wykorzystaniem pary wodnej, bez udziału reagentów gazowych, jest wyjątkowo efektywnym z punktu widzenia potencjalnej uciążliwości dla środowiska procesem zaawansowanego recyklingu.

Literatura

- [1] Ustawa z dnia 11 września 2015 r. o użytym sprzęcie elektrycznym i elektro-nicznym, (Dz.U. 2015, poz. 1688).
- [2] Bizzo W. A., Figureiro R. A., de Andrade V. F., *Characterization of Prined Circuit Boards for Metal and Energy Recovery after Milling and Mechanical Separation*, Materials, Nr 7 2014, str. 4555-4566.
- [3] Marques A. C., Marrero J.-M. C., de Fraga Malfatti C. A., *A review of the recycling of non-metallic fractions of printed circuit boards*, SpringerPlus, Nr 2, 2013, str. 521.
- [4] Tuncuk A., Stazi V., Akcil A., Yazici E., Deveci H., *A review of the reccling of non-metallic fractions of printed circuit boards*, Minerals Engineering, 2012, str. 283.
- [5] Williams P.T., *Valorization of Printed Circuit Boards from Waste Electri cal and Electronic Equipment by Pyrolysis*, Waste Biomass Valor, 2010, 1, str. 107-120.
- [6] Hagelüken C., *Exploring cross-border collaboration in R&D*, EIT-KIC-RM Seminar, September 14th, 2012, KU Leuven.
- [7] Flores G.R.F.A., Nikolic S., Mackey P.J., *ISASMELT™ for the Recycling of E-Scrap and Copper in the U.S. Case Study Example of a New Compact Re-cycling Plant*, JOM, 2014, 66, str. 823-832.
- [8] Caffarey M., *Recycling Electronic End of Life Materials*, SERDC Recycling Summit 2012.
- [9] Woynarowska A., Baron J., Kandefer S., Żukowski W., *Charakterystyka procesu spalania odpadów elektronicznych w reaktorze z pęcherzowym zło-żem fluidalnym*, Przemysł Chemiczny, 2013.
- [10] Nadziakiewicz J., Waclawiak K., Stelmach S., *Procesy termiczne w utylizacji odpadów*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2012.
- [11] Klein M., Kluska J., Misiuk S., Kardaś D., *Przebieg i produkty procesu piro-lizy wybranych tworzyw sztucznych w reaktorze ciśnieniowym*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, Nr 5, 2011, str. 54-55.
- [12] Kantarelis E., Donaj P., Yang W., Zabaniotou A., *Sustainable valorization of plastic wastes for energy with environmental safety via High-Temperature Pyrolysis (HTP) and High-Temperature Steam Gasification (HTSG)*, Journal of Hazardous Materials, 2009, str. 675-684.
- [13] Park Y.J., Fray D.J., *Recovery of high purity precious metals from printed circuit boards*, Journal of Hazardous Materials, Nr 164, 2009, str.1152-1158.
- [14] Kamo T., Wu B., Egami Y., Yasuda H., Nakagome H., *Influence of mixed molten carbonate composition on hydrogen formation by steam gasification*, Journal of Material Cycles and Waste Management, Nr 13, 2011, str. 50-55.

- [15] Zhang S., Yoshikawa K., Nakagome H., Kamo T., *Steam gasification of epoxy circuit board in the presence of carbonates*, Journal of Material Cycles and Waste Management, Nr 14, 2012, str. 294-300.
- [16] Mońka P., Szczepaniak W., Zabłocka-Malicka M., *Gasification of RAM memory waste*, Czasopismo Techniczne, Ch, Chemia, 108, 2011, str. 119-126.
- [17] Szczepaniak W., Zabłocka-Malicka M., Zielińska A., Mońka P., *Termiczne, sekwencyjne przekształcanie odpadów w atmosferach beztlenowych*, w: Kompleksowe zarządzanie gospodarką odpadami, PZiTS O/Wielkopolski, 2013, str. 661-678.
- [18] Zabłocka-Malicka M., Rutkowski P., Szczepaniak W., *Recovery of copper from PVC multiwire cable waste by steam gasification*, Waste Management, 46, 2015, str. 488-496.
- [19] Zabłocka-Malicka M., Szczepaniak W., Zielińska A., Rutkowski P., *Steam gasification of oat with conversion of tars on clay catalyst and gas cleaning by condensation of steam*, Ecological Chemistry and Engineering, 23, 2016, str. 33-48.
- [20] Zabłocka-Malicka M., Laboratorium Procesów Termicznych, W7/PWr.

mgr inż. Ewelina Kowalczuk¹⁾

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Zakład Podstaw Budownictwa i Inżynierii Środowiska

¹⁾kowalczuk.ewelina@gmail.com

WERYFIKACJA WARTOŚCI WSPÓŁCZYNNIKA PRZENIKANIA CIEPŁA W BIUROWYM BUDYNKU PASYWNYM

Verification of values heat transfer in passive office building

Słowa kluczowe: strumień przepływu ciepła, współczynnik przenikania ciepła, budynek pasywny, weryfikacja

Keywords: heat flow, heat transfer coefficient, building passive, verification

Streszczenie:

W niniejszym artykule przedstawiono porównanie wartości współczynnika przenikania ciepła otrzymanych na podstawie wykonanych przez autora pomiarów z wynikami otrzymanymi w drodze obliczeń. Pomiary przeprowadzono z wykorzystaniem aparatu płytowego do wyznaczania ilości ciepła przepływającego przez przegrodę. Metoda ta w sposób ilościowy i dość dokładny może określić współczynnik (U) analizowanej przegrody. Badania wykonano na budynku biurowym, wzniesionego w technologii murowanej z wykorzystaniem materiałów o niskiej przewodności cieplnej. Obiekt ten, zlokalizowany w województwie podlaskim, spełnia wymogi stawiane budynkom pasywnym.

Wyznaczanie współczynnika przenikania ciepła U – podstawy teoretyczne

Współczynnik przenikania ciepła dla przegrody U jest jedną z podstawowych właściwości, która decyduje o jakości cieplnej przegrody. Jest to ilość ciepła jaka przenika przez przegrodę w stosunku do jednostki powierzchni przegrody, różnicą pomiędzy temperaturą zewnętrzną i wewnętrzną oraz czasu. Inaczej mówiąc jest to gęstość ustalonego strumienia ciepła, które przepływa pomiędzy obszarami powietrznymi przedzielonymi przegrodą przy założeniu, że występuje między nimi różnica temperatur 1K. Współczynnik ten jest wielkością charakterystyczną dla danej przegrody budowlanej, a jego wartość jest określana przez ustawę o warunkach technicznych jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Dąży się do uzyskania jak najniższego jego poziomu, od roku 2021 dla wszystkich budynków nowowznoszonych ma być nie większy niż $0,20 \text{ W/m}^2\text{K}$. Jeśli chodzi o budynki pasywne nie może przekraczać wartości $15 \text{ W/m}^2\text{K}$.

Punktem wyjścia do wyznaczenia tego współczynnika jest równanie przewodzenia ciepła Laplace'a. Przy analizowaniu przegrody płaskiej jednorodnej o stałym współczynniku przewodzenia ciepła λ oraz grubości d i stałych temperaturach na jej powierzchni θ_{si} i θ_{se} , równanie to ma postać:

$$\frac{d^2\theta}{dx^2} = 0 \quad (1)$$

Po dwukrotnym całkowaniu równania (1), otrzymano równanie prostej:

$$\theta = Cx + D \quad (2)$$

Przy założeniu warunków brzegowych pierwszego rodzaju:

$$\begin{aligned} \text{dla } x = 0 & \rightarrow D = \theta_{si} \\ \text{dla } x = d & \rightarrow C = \frac{\theta_{se} - \theta_{si}}{d} \end{aligned} \quad (3)$$

Stąd otrzymujemy:

$$\theta(x) = \frac{\theta_{se} - \theta_{si}}{d} x + \theta_{si} \quad (4)$$

gdzie:

θ_{se} – temperatura na powierzchni zewnętrznej [$^{\circ}\text{C}$],

θ_{si} – temperatura na powierzchni wewnętrznej [$^{\circ}\text{C}$],

d – grubość przegrody [m].

Na podstawie prawa Fouriera wyznaczyć można gęstość strumienia ciepła. Otrzymujemy go różniczkując równanie (4):

$$q = -\frac{d\theta}{dx} = -\frac{\lambda}{d} \cdot (\theta_{si} - \theta_{se}) \quad (5)$$

Upraszczając powyższe równanie, wprowadza się pojęcie oporu cieplnego R wyrażanego jako iloraz grubości przegrody do przewodności cieplnej materiału z jakiego została wykonana:

$$R = \frac{d}{\lambda} \left[\frac{(m^2 \cdot K)}{W} \right] \quad (6)$$

gdzie:

d – grubość przegrody [m],

λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/mK].

Podstawiając (6) do równania (5) otrzymano gęstość strumienia ciepła przewodzonego przez ściankę płaską jednorodną:

$$q = \frac{(\theta_{si} - \theta_{se})}{R} [W/m^2] \quad (7)$$

Powyższe rozważania dotyczyły przegrody jednorodnej (jednowarstwowej). W sytuacji gdy mamy do czynienia ze ścianą wielowarstwową, której warstwy są prostopadłe do kierunku przepływu strumienia ciepła, a poszczególne warstwy wykonane są z materiałów o różnej przewodności cieplnej λ_a i grubości d_a , przyjmuje się dla każdej warstwy indywidualną, jednakową wartość strumienia ciepła:

$$q = \frac{\lambda_a}{d_a} (\theta_a - \theta_{a+1}) \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

Zakładając n warstw i sumując dla każdej z nich różnicę temperatur otrzymujemy:

$$\theta_a - \theta_{a+1} = q \cdot \frac{\lambda_a}{d_a} \quad \rightarrow \quad \theta_a - \theta_{a+1} = q \sum_{a=1}^n \frac{\lambda_a}{d_a}$$

Stąd gęstość strumienia ciepła przechodzącego przez płaską ściankę o n warstwach:

$$q = \frac{\theta_{si} - \theta_{se}}{\sum_{a=1}^n \frac{\lambda_a}{d_a}} \quad (8)$$

gdzie:

θ_{se} – temperatura na powierzchni zewnętrznej [$^{\circ}C$],

θ_{si} – temperatura na powierzchni wewnętrznej [$^{\circ}C$],

Biorąc pod uwagę powyższe zależności otrzymujemy, że opór przewodzenia przez przegrodę wielowarstwową równy jest sumie oporów przewodzenia ciepła przez każdą z warstw:

$$R = R_1 + R_2 + \dots + R_n = \sum_{a=1}^n \frac{d_a}{\lambda_a} = \sum_{a=1}^n R \quad (9)$$

Należy zwrócić uwagę, że powyższa równość dotyczy tylko wartość oporu cieplnego wewnątrz przegrody. Oprócz tego zjawiska ważnym zagadnieniem jest wymiana ciepła jaka zachodzi pomiędzy przegrodą, a powietrzem obok przepływającym. Ta wymiana nazywana jest inaczej przejmowaniem ciepła. Może przebiegać przez konwekcję lub przez promieniowanie.

Podstawą do wyznaczenia strumienia przejmowania ciepła jest prawo Newtona. Dla analizowanego zagadnienia ma ono postać następującą:

$$q = h(\theta - \theta_s) \quad (10)$$

gdzie:

q – strumień przejmowania ciepła przez konwekcję i promieniowanie [W/m^2]

h – współczynnik przejmowania ciepła wyrażony jako suma współczynników przejmowania ciepła przez konwekcję h_c i promieniowanie h_r ,

$h = h_c + h_r$ [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$],

θ – temperatura powietrza w niewielkiej odległości od przegrody [$^{\circ}\text{C}$ lub K],

θ_s – temperatura na powierzchni przegrody [$^{\circ}\text{C}$ lub K].

Równanie (10) można zapisać kolejno dla powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej:

$$q = h_i \cdot (\theta_i - \theta_{si}) = \frac{(\theta_i - \theta_{si})}{R_{si}} \quad \rightarrow \quad R_{si} = \frac{1}{h_i}$$

$$q = h_e \cdot (\theta_e - \theta_{se}) = \frac{(\theta_e - \theta_{se})}{R_{se}} \quad \rightarrow \quad R_{se} = \frac{1}{h_e}$$

Obliczając różnicę temperatur w przegrodzie otrzymujemy:

$$\left. \begin{aligned} \theta_i - \theta_{si} &= q \cdot R_{si} \\ \theta_{si} - \theta_{se} &= q \cdot R \\ \theta_{se} - \theta_e &= q \cdot R_{se} \end{aligned} \right\} \rightarrow \theta_i - \theta_e = q \cdot (R_{si} + R + R_{se}) = q \cdot R_T \quad (11)$$

Z powyższych zależności wynika iż opór cieplny przegrody to nic innego jak suma oporów poszczególnych warstw oraz oporów przejmowania ciepła na powierzchni zewnętrznej i wewnętrznej.

Współczynnik przenikania to odwrotność oporu przenikania ciepła.

$$U = \frac{1}{R_T} \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right] \quad (12)$$

Przekształcając odpowiednio wzór (11), podstawiając za U wartość ze wzoru (12) otrzymuje się gęstość strumienia ciepła przepływającą przez przegrodę wielowarstwową, rozgraniczającą płyny o temperaturach θ_i oraz θ_e . Równanie (13) jest matematycznym obrazem prawa Pecleta.

$$q = U \cdot (\theta_i - \theta_e) \left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2} \right] \quad (13)$$

Na podstawie tego równania, przekształcając je w odpowiedni sposób, otrzymujemy wartość współczynnika przenikania ciepła dla przegrody wielowarstwowej uzależnionego od strumienia przepływu ciepła q oraz temperatury panującej po wewnętrznej θ_i oraz zewnętrznej θ_e stronie przegrody.

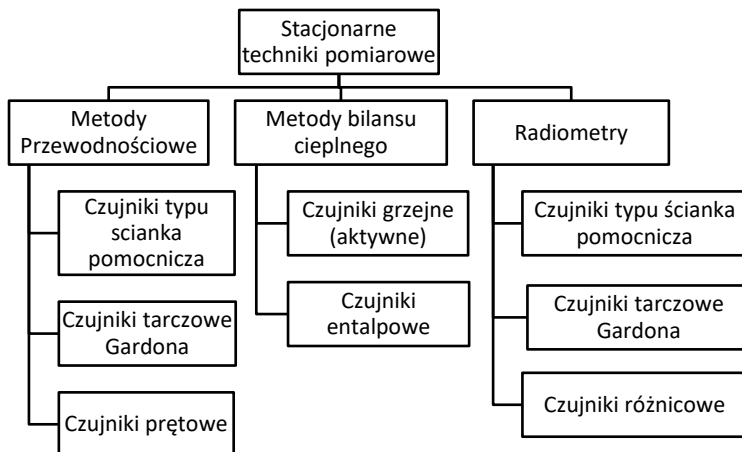
$$U = \frac{q}{(\theta_i - \theta_e)} \left[\frac{W}{m^2 K} \right] \quad (14)$$

Wartość strumienia ciepła przepływającego przez przegrodę wyznaczyć można przy użyciu miernika współpracującego z odpowiednim czujnikiem, a temperatury wewnętrzną i zewnętrzną za pomocą termometrów laboratoryjnych. Uzyskane w ten sposób dane w łatwy sposób umożliwią poznanie rzeczywistej współczynnika przenikania ciepła U .

Aparatura badawcza

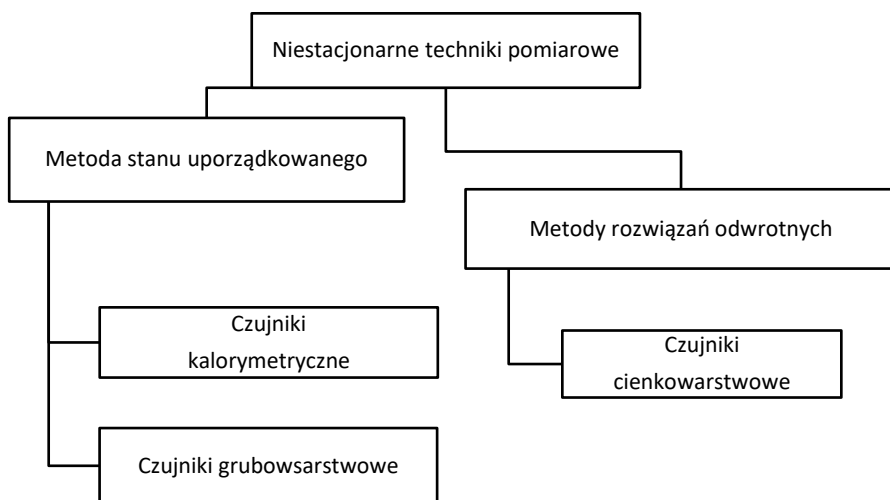
Współczynnik przenikania ciepła przez przegrodę zarówno jednorodną jak i wielowarstwową można wyznaczyć w drodze obliczeń analitycznych przy zastosowaniu wzorów matematycznych, jak również empirycznie - wykorzystując specjalne aparaty do pomiaru oporu cieplnego.

Wśród licznej ilości technik cieplnych można wyodrębnić dwie zasadnicze kategorie. Pierwsza z nich to techniki niestacjonarne, w których pomiar jest realizowany w warunkach niestacjonarnych (zmienne w czasie pole temperatury czujnika), druga kategoria, to gdy pomiar odbywa się w warunkach stacjonarnych. Podział obrazują schematy umieszczone poniżej.



Rys. 1. Klasyfikacja metod pomiaru gęstości strumienia ciepła: stacjonarne techniki pomiarowe

Źródło: [10]

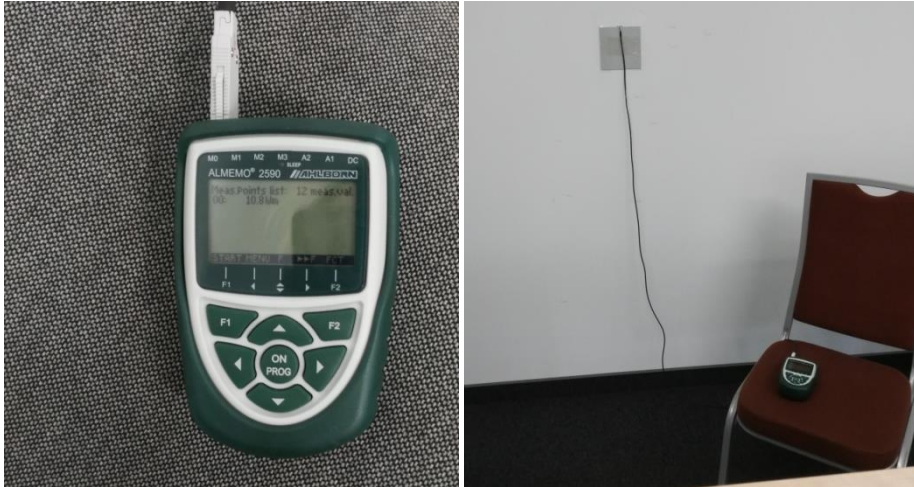


Rys. 2. Klasyfikacja metod pomiaru gęstości strumienia ciepła: niestacjonarne techniki pomiarowe
Źródło: [10]

W opisywanym badaniu wykorzystano następujące przyrządy badawcze:

- miernik strumienia przepływu ciepła Almemo 2590,
- cyfrowy przetwornik strumienia ciepła FQADx,
- wilgotnościomierz FLIR MR77 posiadający funkcję pomiaru temperatury na powierzchni materiału.

Miernik Almemo 2590, którego producentem jest firma Ahlborn zbudowany jest w oparciu o wzmacniacze operacyjne. Jest urządzeniem przenośnym, dla tego idealnie sprawdza się podczas przeprowadzania ekspertyz oraz tam gdzie jest potrzeba wykonania pomiaru w kilku punktach. Urządzenie ma możliwość połączenia kilku czujników i dokonywania pomiaru dla kilku punktów jednocześnie. Posiada funkcję odczytu czujników razem z funkcjami specjalnymi takimi jak: kompensacja zimnych końców, kompensacja temperaturowa, kompensacja ciśnienia barometrycznego. Urządzenie to nie podaje bezpośrednio wartości oporu cieplnego R , ale podaje natężenie strumienia ciepła q . Posiadając tę wartość oraz zmierzoną temperaturę na powierzchniach zewnętrznych przegrody możemy w łatwy sposób wyznaczyć współczynnik przenikania U na podstawie wzoru (14).



Fot. 1. Miernik Almemo 2590 podczas wykonywania badania

Źródło: Fotografie autora

Przetwornik strumienia ciepła model FQADx jest czujnikiem typu „ścianka pomocnicza”. Wykonany jest w postaci płytki epoksydowej o grubości 1,5mm i wymiarach 120x120mm.



Fot. 2 Przetwornik strumienia ciepła FQADx

Źródło: www.almemo.pl

Wewnątrz czujnika znajdują się termoelementy usytuowane w różnych odległościach od ścianki pomiarowej. Za pomocą termoelementów dokonuje się pomiaru spadku temperatury na grubości czujnika, przez który przepływa strumień ciepła. Powstająca różnica temperatur jest proporcjonalna do gęstości strumienia ciepła

przepływającego przez czujnik. Z uwagi na fakt, że różnice temperatur są niewielkie stosuje się baterie połączonych szeregowo termoelementów składających się nawet z kilkuset spoin pomiarowych. Zakładając, że mierzona gęstość strumienia ciepła przepływającego przez czujnik przyłożony do badanej powierzchni jest taka sama jak na powierzchni badanej, można wyznaczyć jego wartość z równania:

$$q = \frac{\lambda \cdot \Delta T}{d} [\text{W/m}^2] \quad (15)$$

gdzie:

q – strumień przejmowania ciepła przez konwekcję i promieniowanie [W/m^2]

λ – współczynnik przewodzenia ciepła [W/mK],

d – grubość ścianki pomocniczej [m],

ΔT – różnica temperatur [$^{\circ}\text{C}$ lub K].

Podczas wykonywania badania należy zwrócić szczególną uwagę na kilka istotnych spraw, które mogą wpłynąć na wartość mierzoną. Przede wszystkim należy doprowadzić do ustabilizowania przepływu ciepła przez badaną przegrodę. Wiąże się to z tym, że nie można wykonywać badania w bardzo słoneczny dzień, gdyż ściana poddana jest nadmiernemu nagrzanu, co może wpłynąć na odczyt strumienia ciepła. Odczyty powinny być wykonywane w dłuższym czasie, przez co najmniej kilka minut tak aby przepływ miał szansę na wyrównanie swojej wartości. Wartość tą należy stale obserwować i kontrolować do momentu ustabilizowania. Należy również stale dokonywać pomiaru temperatury na wewnętrznej i zewnętrznej powierzchni przegrody. Wartości te powinny być odczytywane w bliskiej odległości od płytek miernika. Ważnym jest również aby płytka miernika nie była umieszczana blisko połączeń przegrody z innymi podobnymi, jak również w miejscach gdzie nie zachowana jest jej ciągłość. Takie styki i złącza w budynkach (np. nadproża okienne, narożniki budynków, wieńce gzymsy, balkony), naruszają ciągłość termiczną przegród. W tych punktach zjawisko wymiany ciepła przybiera w ogólnym przypadku wartości trójwymiarowe. Aby ustalić w nich wartość strumienia ciepła wykorzystuje się różnego rodzaju symulacje numeryczne powstałych w tych złączach mostkach termicznych.

Badanie

Przeprowadzone badanie polegało na sprawdzeniu rzeczywistych wartości współczynnika przenikania ciepła U w biurowym budynku pasywnym, zlokalizowanym w IV strefie klimatycznej w Białymstoku. Obiekt składa się z dwóch części: biurowej, wykonanej w standardzie pasywnym oraz produkcyjnej w postaci hali przemysłowej wykonanej w standardzie niskoenergetycznym. Posiada on dwie kondygnacje i jest niepodpiwniczony. Część biurowa połączona jest z halą produkcyjną północną ścianą. Badaniem objęta została tylko część biurowa.



Fot. 3. Pasywny budynek biurowy firmy PCBP z zapleczem produkcyjnym, po zakończeniu robót
Źródło: Fotografie autora

Całkowita powierzchnia użytkowa budynku (biuro + hala) wynosi 2400,86 m².
Podstawowe dane części biurowej to;

- powierzchnia (ogrzewana) $A_f = 605,33 \text{ m}^2$,
- kubatura 1765,65 m³,
- powierzchnia zabudowy 368m²
- wysokość 7,2 m,
- długość 30,17 m,
- szerokość 11,64 m.

Źródłem ciepła na potrzeby centralnego ogrzewania, wentylacji i ciepłej wody użytkowej są pompy ciepła solanka-woda w ilości 4 sztuk oraz pompa ciepła powietrze-woda na potrzeby ciepłej wody użytkowej.

Źródłem chłodu (pasywnego) są dwa dolne źródła pomp ciepła :

- odwierty pionowe (sondy gruntowe),
- kolektor poziomy.

Dodatkowym źródłem chłodu są pompy ciepła (chłodzenie aktywne).

W Tabeli 1 zestawiono podstawowe wymagania jakie powinny być spełnione przez budynek pasywny. Zapewnia on przez cały rok użytkownikom odpowiedni mikroklimat, który wynika z odczuwanego komfortu cieplnego oraz optymalnego przewietrzania na skutek stałego doprowadzania świeżego powietrza. Obiekty w tym standardzie energetycznym wykonywane są w różnych technologiach, zarówno drewnianej (szkieletowej), jak murowanej czy prefabrykowanej. Cieszą się coraz większą popularnością przede wszystkim dzięki późniejszym niskim kosztom utrzymania.

Tabela 1. Podstawowe kryteria dla budynków pasywnych

Lp	Wyszczególnienie	Wymagania
1	Zapotrzebowanie na energię niezbędną do ogrzania 1m ² powierzchni	< 15 kWh/(m ² ·rok)
2	Współczynnik przenikania ciepła U dla przegród zewnętrznych	< 0,15 W/(m ² ·K);
3	Szczelność budynku- krotność wymiany powietrza nie n ₅₀	< 0,6 h ⁻¹
4	Maksymalna redukcja mostków termicznych	Ψ≅0
5	Okna o współczynniku przenikania ciepła U	< 0,8 W/(m ² ·K);
	Całkowita przepuszczalności energii promieniowania słonecznego dla przeszklenia	g = 50%;
6	Wydajność rekuperatora do odzysku ciepła z wentylacji	>70%
7	Ograniczenie strat ciepła w procesie przygotowania i zaopatrzenia w ciepłą wodę użytkową	
9	Efektywne wykorzystanie energii elektrycznej	

Źródło: Opracowanie własne

Badanie zostało wykonane w dniu 16.11.2016r. Temperatura powietrza zewnętrznego zmierzona przy pomocy miernika elektrycznego oscylowała w granicach 0°C. Stwierdzono brak nasłonecznienia, prędkość wiatru około 15km/h. Badanie zostało wykonane w 17 punktach pomiarowych na ścianach zewnętrznych i ścianie oddzielającej część biurową od hali produkcyjnej, a także w 6 punktach pomiarowych na stropodachu. Epoksydowa płytką (czujnik) umieszczana była około 1,0m nad powierzchnią podłogi, w odległości około 0,5m od istniejących złączy (otworów okiennych, drzwiowych, połączeń ze ścianami zewnętrznymi i wewnętrznymi).

Tabela 2. Wyniki pomiarów strumienia ciepła dla ścian zewnętrznych

Elewacja		Numer punktu pomiarowego	Θ _{si}	Θ _{se}	Δt>20	q	U
		-	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m ²]	[W/m ² K]
Piętro	Zachodnia	1	22,8	-0,2	23	3,4	0,15
		2	22,3	-0,2	22,5	3,8	0,17
		3	21,8	-0,2	22	4,3	0,20
	Północna	4	22,2	-0,6	22,8	3,2	0,14
		5	21,9	-0,6	22,5	3,0	0,15
	Południowa	6	23	-0,4	23,4	3,8	0,16
		7	22,7	-0,4	23,1	3,8	0,16
		8	22,7	-0,4	23,1	2,7	0,12
		9	22,6	-0,4	23	4,1	0,18

Elewacja		Numer punktu pomiarowego	Θ_{si}	Θ_{se}	$\Delta t > 20$	q	U
		-	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m ²]	[W/m ² K]
Parter	Wschodnia	10	22,4	-0,2	22,6	4	0,18
		11	22,8	-0,2	23	3,6	0,16
	Zachodnia	12	22,5	-0,4	22,9	3,8	0,17
		13	22,7	-0,4	23,1	3,8	0,16
		14	22,6	-0,4	23	2,7	0,12
	Północna	15	22,8	-0,2	23	3,2	0,14
	Południowa	16	20,5	-0,2	20,7	2,90	0,14
	Wschodnia	17	21,4	-0,2	21,6	3	0,14

Źródło: Pomiary własne

W Tabeli 2 zamieszczone zostały wyniki pomiarów dla ścian zewnętrznych na parterze i piętrze budynku.

- strumienia przejmowania ciepła q ,
- temperatury na powierzchni wewnętrznej przegrody Θ_{si}
- temperatury na powierzchni zewnętrznej przegrody Θ_{se} .

Ostatnia kolumna tabeli przedstawia obliczoną wartość współczynnika przenikania ciepła U (z wykorzystaniem wzoru (14)). Jego najniższa wartość to 0,12 W/m²K w punkcie pomiarowym nr 14, a najwyższa to 0,20 W/m²K w punkcie pomiarowym nr 3.

Ściany zewnętrzne wykonane zostały z bloczków wapienno-piaskowych, pełnych o grubości 25 cm. Dodatkowo konstrukcja ścian wzmocniona została rdzeniami żelbetowymi. Ocieplenie stanowiły płyty styropianowe grubości 30 cm, a tam gdzie wymagały tego warunki przeciwpożarowe zastosowano wełnę skalną. Od wewnątrz ściany wykończone zostały tynkiem gipsowym o grubości minimum 5 mm (kategoria IV). Współczynnik przenikania ciepła tej przegrody to 0,107 W/m²K w przypadku ściany wschodniej, zachodniej i południowej oraz 0,086 W/m²K dla ściany północnej.

Tabela 3. Wyniki pomiarów strumienia ciepła dla stropodachu

	Numer punktu pomiarowego	t_i	t_e	$\Delta t > 20$	Q	U
	-	[°C]	[°C]	[°C]	[W/m ²]	[W/m ² K]
Stropodach	1	23,2	-0,2	23,4	2,7	0,12
	2	23,1	-0,2	23,3	2,2	0,09
	3	23,3	-0,2	23,5	2,2	0,09
	4	23	-0,2	23,2	2,1	0,09
	5	23	-0,2	23,2	2,30	0,10
	6	23,1	-0,2	23,3	2,5	0,11

Źródło: Pomiary własne

W Tabeli 3 zamieszczone zostały wyniki pomiarów dla stropodachu:

- strumienia przejmowania ciepła q ,
- temperatury na powierzchni wewnętrznej przegrody Θ_{si} ,
- temperatury na powierzchni zewnętrznej przegrody Θ_{se} .

Ostatnia kolumna tabeli przedstawia obliczoną wartość współczynnika przenikania U (korzystając ze wzoru (14)).

Jego najniższa wartość to 0,09 W/m²K w punktach pomiarowym nr 2,3,4, a najwyższa to 0,12 W/m²K w punkcie pomiarowym nr 3.

Konstrukcja nośna stropodachu wykonana została z prefabrykowanych płyt kanałowych. Ocieplenie stanowiły płyty styropianowe grubości od 30 do 62 cm (z uwagi na zachowanie spadku). Średni współczynnik przenikania ciepła tej przegrody to 0,062 W/m²K.

Tabela 4. Zestawienie pomiarów współczynnika przenikania ciepła z wartościami obliczonymi.

Wyszczególnienie	elewacja	Współczynnik przenikania ciepła U [W/(m ² · K)]			
		wg WT 2017	obliczone	zmierzone (wartość uśredniona)	
ściany zewnętrzne	Zachodnia	0,23	0,107	0,16	33,1%
	Północna	0,23	0,086	0,14	38,6%
	Południowa	0,23	0,107	0,15	28,7%
	Wschodnia	0,23	0,107	0,16	33,1
stropodach	-	0,18	0,062	0,10	38%

Źródło: Pomiary własne

Współczynnik U otrzymany w wyniku obliczeń różni się od współczynników wyliczonych w drodze tworzenia charakterystyki energetycznej. W odniesieniu do ścian zewnętrznych ta różnica dla ściany północnej wynosi 38,6%, dla stropodachu z kolei 38%. Różnica ta może być spowodowana między innymi:

- umieszczony czujnik strumienia na ścianie może przebiegać przez rdzeń żelbetowy łączący bloczki cementowo-wapienne,
- czujnik strumienia umieszczony obok belki stalowej,
- niedokładność wykonania przegrody (np. szczelina pomiędzy płytami styropianu, wełny skalnej),
- przegrody w rzeczywistości wykonane zostały z innych materiałów niż zostało to podane w dokumentacji projektowej,
- wilgocią zawartą w przegrodzie budowlanej.

Wnioski

W artykule przedstawiono porównanie wartości współczynnika przenikania ciepła przez przegrody budowlane jakimi były ściany zewnętrzne i stropodachy otrzymane w wyniku przeprowadzonych pomiarów w stosunku do danych otrzymanych w drodze obliczeń analitycznych. Wartość współczynnika U zbadana za pomocą aparatury badawczej odbiega od wartości projektowanych o ponad 30% w przypadku ścian zewnętrznych i blisko 40% w przypadku stropodachu. Jest to zaskakujący wynik biorąc pod uwagę, że badanie było przeprowadzone w obiekcie o standardzie pasywnym. Na ten stan może mieć wpływ wiele czynników, jednym z najbardziej prawdopodobnych może być zawilgocenie przegród. Budynek został oddany do użytkowania w grudniu 2015 roku, a rozpoczęcie jego budowy miało miejsce w lipcu 2014 roku. Na podstawie analizowanej literatury tak zwana wilgoć technologiczna może być usuwana nawet do 5 lat. Niestety przy przeprowadzaniu pomiarów ten parametr nie był odczytywany. Niewątpliwie za słuszne i zasadne stwierdza się przeprowadzenie ponownego badania w kolejnym sezonie. Jeśli wartości współczynnika nie ulegną polepszeniu będzie to wskazywało problemy powstałe na etapie wykonywania obiektu.

Literatura

- [1] Ickiewicz I., Sarosiek W., Ickiewicz J., *Fizyka budowli wybrane zagadnienia*, Dział Wydawnictw i Poligrafii Politechniki Białostockiej, Białystok, 2000, str. 83-91.
- [2] Dylla A., *Fizyka cieplna budowli w praktyce – obliczenia cieplno-wilgotnościowe*, Wydawnictwo naukowe PWN, Warszawa, 2015, str. 68–120.
- [3] Feist W., Munzenberg U., Thumulla J., *Podstawy budownictwa pasywnego*”, Polski Instytut Budownictwa Pasywnego, Dipl. Ing. Gunter Schlagowski, Sp. z o.o., 2009
- [4] Krajowy Ruch Ekologiczno-Społeczny, *Budynki pasywne – mistrzowie oszczędzania energii*, 2006 [online], dostęp zdalny: <http://www.knaufinsulation.pl/sites/pl.knaufinsulation.net/files/budynkipasywne2.pdf>.
- [5] Kurtz K., Gawin D., *Certyfikacja energetyczna budynków mieszkalnych z przykładami*, Wrocławskie Wydawnictwo Naukowe Atla 2, Wrocław, 2009
- [6] Garbalińska H., Siwińska A., *Oszacowanie niekorzystnych zmian w bilansie cieplnym budynku wywołanych zawilgoceniem ścian zewnętrznych*, Inżynieria i Budownictwo, nr 5/2005, s. 241-243
- [7] Wesołowska M., Podhorecki A., *Budownictwo energooszczędne w Polsce: stan i perspektywy*, Wydaw. Uczelniane Uniwersytetu Technologiczno-Przyrodniczego w Bydgoszczy, Bydgoszcz 2015
- [8] Rozporządzenia Ministra Gospodarki z dnia 10 sierpnia 2012 r. w sprawie szczegółowego zakresu i sposobu sporządzenia audytu efektywności energetycznej, wzoru karty audytu efektywności energetycznej oraz metod obliczania oszczędności energii (Dz. U. poz. 962).
- [9] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U. nr 75, poz. 690)
- [10] Smusza R., *Metrologia procesów energetycznych [online]*, dostęp zdalny: <http://robertsmusza.sd.prz.edu.pl/file/MjMsNjcsMTMyMyxtcGVfMS5wZGY=>

mgr inż. Damian Nikołajuk¹⁾

Politechnika Białostocka WBIIŚ

Katedra Ogrzewnictwa Wentylacji i Ciepłownictwa

¹⁾drnikolajuk@gmail.com

PROMIENIOWANIE CIEPLNE W OGRZEWNICTWIE

Thermal radiation in heating

Słowa kluczowe: radiacja, ogrzewanie powierzchniowe, radiatory, ogrzewnictwo, promieniowanie

Keywords: radiation, surface heating, radiators, heating

Streszczenie:

Celem artykułu jest przegląd literatury na temat promieniowania w ogrzewnictwie, wykazania różnic w stosunku do innych dróg wymiany ciepła, opisanie zalet i wad radiacji w centralnym ogrzewaniu i wykaz nowoczesnych technologii wykorzystujących promieniowanie. W początkowej części artykułu zostały opisane 3 drogi wymiany ciepła tj. konwekcja, przewodnictwo i radiacja. Podano podstawowe wzory i opisano genezę ich powstania. Następnie opisano najczęściej wykorzystywane systemy centralnego ogrzewania tj. ogrzewanie grzejnikowe i płaszczyznowe (sufitowe, podłogowe, ściennie). Porównano je pod kątem efektywności, komfortu i wykorzystania w nich promieniowania. Wyliczono zalety i wady poszczególnych rozwiązań. Kolejnym etapem w artykule jest przedstawienie nowoczesnych technologii wykorzystujących radiację w dziedzinie ogrzewnictwa. Na koniec podsumowano zebrane informacje i wyciągnięto wnioski na temat najbardziej użytecznych, efektywnych i najlepiej rokujących rozwiązań dla ogrzewnictwa.

Wprowadzenie

Ogrzewnictwo istnieje od czasu wynalezienia ognia jako źródła ciepła czyli ogniska. Służyło ono nie tylko do ogrzewania pomieszczeń ale również do przygotowywania posiłków. Ogień okładano kamieniami spojenymi gliną aby ciepło skumulowane w ciałach stałych utrzymywało się na jakiś czas po wygaszeniu ognia. Wadą tego rozwiązania było wydzielanie dużej ilości dymu, lecz poradzono sobie z tym poprzez zastosowanie węgla drzewnego spalanego w specjalnych nieckach. Następnym krokiem było centralne ogrzewanie, którego wyznacznikiem jest źródło ciepła oddalone od pomieszczenia ogrzewanego. Pierwszym przykładem takiego rozwiązania jest ogrzewanie podłogowe wynalezione przez Greków w IV w. p.n.e. o nazwie hypocaustum. W centralnym pomieszczeniu znajdującym się pod podłogą zlokalizowany był piec ogrzewający powietrze do wysokiej temperatury. Powietrze oddawało energię dla posadzki podtrzymywanej na słupkach o wysokości około 80cm. Dodatkowo spaliny odprowadzano szczelinami w ścianach zbudowanych ze specjalnych pustaków a więc cały system było to połączenie ogrzewania powierzchniowego podłogowego ze ściennym. Na przestrzeni wieków wykształciło się wiele nowych dróg do osiągania komfortu cieplnego w pomieszczeniach. W dzisiejszych czasach do ogrzewania pomieszczeń wykorzystuje się różnorodne technologie od wysokotemperaturowych z kotłami na paliwo stałe przez średniotemperaturowe współpracujące z kotłami kondensacyjnymi czy też niskotemperaturowe, które bardzo dobrze współpracują z pompami ciepła. W niniejszym artykule skupię się przede wszystkim na tych które w głównej mierze przekazują ciepło drogą promieniowania a mianowicie opiszę zasadę działania promienników, przedstawię rodzaje ogrzewań powierzchniowych wraz z ich głównymi zaletami i wadami. Dodatkowo opiszę wykorzystanie promieniowania słonecznego do zwiększenia energooszczędności budynków. W związku z rozpatrywaniem promieniowania bardzo ważne jest też aby zrozumieć różnicę w stosunku do innych dróg transferu ciepła a więc na początku artykułu zostaną krótko scharakteryzowane rodzaje wymiany ciepła a dodatkowo porównanie ogrzewania konwekcyjnego z ogrzewaniem bazującym na promieniowaniu na przykładzie ogrzewania powierzchniowego wodnego niskotemperaturowego [1,2].

Transfer ciepła

W ogrzewnictwie można spotkać trzy rodzaje transferu ciepła dzięki którym możliwe jest osiągnięcie projektowych temperatur w pomieszczeniach. Praktycznie zawsze występują one nierozłącznie lecz w różnych proporcjach i właśnie te proporcje odgrywają bardzo ważną rolę i nadają danemu ogrzewaniu miano konwekcyjnego czy radiacyjnego. Wspomniane 3 drogi transferu ciepła to:

- konwekcja
- przewodzenie
- promieniowanie



Rys. 1. Przykład trzech transferów ciepła występujących jednocześnie podczas podgrzewania wody

Źródło: <http://instalacje.gep.com.pl>

Konwekcja

Konwekcja jest to proces przekazywania ciepła poprzez dyfuzję molekularną, która działa na zasadzie mieszania molekuł dążących do równowagi termicznej. Cały proces zachodzi do pewnego granicznego momentu po którego osiągnięciu konwekcja ustaje. Dodatkowo konwekcję można podzielić na swobodną i wymuszoną. W swobodnej ruch płynu jest spowodowany tylko różnicą gęstości spowodowaną różnymi temperaturami. W wymuszonej dodatkowym czynnikiem jest ruch płynu, który skutkuje przyspieszeniem wymiany ciepła a czynnikiem tego ruchu może być wiatr czy wentylator. Konwekcja opisana jest wzorem Newtona [3]:

$$q = \alpha \cdot (t_s - t_p) \quad (1)$$

gdzie:

q – natężenie przepływu ciepła [W],

α – współczynnik wnikania ciepła [$\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$],

t_s – temperatura powierzchni ścianki [K, °C],

t_p – temperatura płynu [K, °C].

Przewodzenie

Jest to transfer ciepła, który zachodzi poprzez kontakt ciał o różnych temperaturach zawsze od temperatury wyższej do temperatury niższej. W chwili gdy tem-

peratury się wyrównają wymiana ustaje. Reakcje dla jednokierunkowego przewodzenia można zapisać prawem Fouriera:

$$\frac{\partial Q}{\partial t} = -k \oint_S \nabla T \cdot dS \quad (2)$$

Wzór ten dla jednorodnego przewodzenia ciepła przez cienką ściankę prostopadłą do jej powierzchni w kierunku x przyjmuje postać:

$$Q = -\lambda A \frac{dt}{dx} \quad (3)$$

gdzie:

Q - natężenie przepływu ciepła (ilość ciepła wymieniona w jednostce czasu),

λ - współczynnik przewodzenia ciepła,

A - powierzchnia wymiany ciepła,

T - temperatura.

Współczynnik przewodzenia ciepła (przewodność cieplna), zależy od rodzaju ciała, a także od temperatury. Przewodzenie odgrywa bardzo ważną rolę w izolacji cieplnej pomieszczeń. Poprzez ten transfer ciepła powstają straty przez ściany zewnętrzne, podłogę i sufit na zewnątrz budynku do których w głównej mierze projektuje się odpowiednie moce grzejników aby utrzymać zakładaną temperaturę projektową, a więc im lepsza izolacyjność przegród zewnętrznych i im mniejsza różnica temperatur zewnętrznej i wewnętrznej tym przewodzenie ciepła jest słabsze [4].

Promieniowanie

Ten rodzaj transferu ciepła znacząco różni się od konwekcji i przewodzenia ze względu na brak wymogu ośrodka, który te ciepło wymienia. Wiedzano o tym już w XVII wieku a doświadczeniem to potwierdzającym było zapalenie prochu strzelniczego poprzez promienie słoneczne skupione przez soczewkę zrobioną z lodu, która w trakcie tego eksperymentu się nie topiła. Innym skutkiem tej zależności jest to, że wymiana ciepła może zachodzić próżni co ma wielkie znaczenie dla nas jako ludzkości ponieważ bez tego energia słoneczna, która napędza naszą planetę nie mogłaby dotrzeć na tak duże odległości a co za tym idzie żywe organizmy jakie znamy dziś nie mogłyby się rozwinąć. Promieniowanie cieplne zachodzi w każdym ciele o temperaturze większej od zera bezwzględnego tj. 0K czyli – 273°C z tym, że w różnych temperaturach natężenie promieniowania jak i jego skład widmowy zmienia swoje właściwości. Promieniowanie może być widoczne gołym okiem ale tylko przy wysokich temperaturach ponieważ nasze oczy mają

możliwość widzenia tylko fal elektromagnetycznych o bardzo wąskim przedziale długości fali, tak zwane światło widzialne a te długości fali występują dla wysokich temperatur. Do czasu gdy ciało nie osiągnie temperatury 500°C to największe natężenie widma promieniowania przypada na światło podczerwone, które grzeje ale nie oświetla. Czerwień zaczyna się pojawiać po osiągnięciu około 520°C nazywana ciemną czerwiecią, następnie widmo przesuwają się do barwy żółtej, niebieskiej i zielonej wywołując czerwień (550°C) następnie jasna czerwień dla 600°C potem czerwień czeresniową 700°C aż w końcu po dotarciu do 1100°C przejawia wszystkie barwy promieniowania świetlnego włącznie z fioletem. Zależność przedstawiona jest na Rys.2. Promieniowanie cieplne opisane jest wzorem Stefana-Boltzmana [12]:

$$\Phi = \sigma T^4 \quad (4)$$

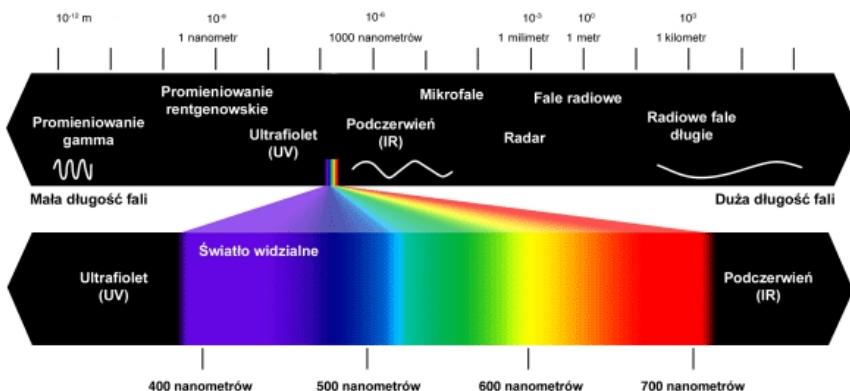
gdzie:

Φ - strumień energii wypromieniowywany z jednostki powierzchni ciała [W/m²],

σ – stała Stefana-Boltzmana,

T - temperatura w skali Kelvina.

Jak widać na wzorze transfer zachodzi tym mocniej im temperatura ciała jest wyższa. Zjawisko promieniowania nie jest jeszcze do końca zrozumiane gdyż przejawia dwie natury korpuskularną i falową. O falowej naturze promieniowania elektromagnetycznego świadczą zjawiska dyfrakcji i interferencji światła a o korpuskularnej zjawisko fotoelektryczne zewnętrzne [13].



Rys.2. Widmo promieniowania elektromagnetycznego

Źródło: <http://www.lenalighting.pl>

Różnice między ogrzewaniem konwekcyjnym a radiacyjnym

Zwykle w ogrzewnictwie mamy do czynienia z sytuacją równoczesnej wymiany ciepła poprzez konwekcję i radiację. Dlatego często dla określenia gęstości strumienia przekazywanego ciepła od powierzchni grzejnej do otoczenia, do prawa Newtona, w charakterze współczynnika proporcjonalności między gęstością strumienia ciepła a różnicą temperatury, wprowadza się zastępczą wartość współczynnika proporcjonalności obejmującego zarówno wpływ radiacji, jak i konwekcji. Obejmuje on dwie składowe: składową konwekcyjną i radiacyjną. Składowa konwekcyjna ujmuje głównie wpływ warunków wymiany ciepła, zaś składowa radiacyjna silnie uwzględnia poziom temperatury powierzchni grzejnej. W przypadku projektowania grzejników nastawionych na konwekcję kształtuje się ich powierzchnie głównie pod to, aby jak najlepiej nagrzewać powietrze w danym pomieszczeniu a zatem wytwarzać ruchy konwekcyjne. W projektowaniu radiatorów głównym celem zaś jest tak dobranie powierzchni aby zmaksymalizować radiację i bezpośrednio nagrzewać obiekty w pomieszczeniu czego pochodną będzie konwekcyjne nagrzewanie powietrza. Co prawda skutek jest ten sam a mianowicie zwiększanie temperatury powietrza a jednak stwarza to ogromne różnice w komforcie jak i w sterylności pomieszczeń. W poniższej tabeli przedstawiono główne różnice tych transferów ciepła w odniesieniu do konwektorów i ogrzewania płaszczyznowego niskotemperaturowego wodnego, które w głównej mierze polega na radiacji.

Tabela 1. Różnice ogrzewania z przewagą transferu konwekcyjnego(konwektory) i radiacyjnego (ogrzewanie powierzchniowe)

Konwekcja (konwektory)	Promieniowanie (powierzchniowe)
Pobudza ruch cząsteczek powietrza przez ruchy konwekcyjne od gorącego ośrodka do zimniejszych miejsc a poprzez to wprawia w ruch kurz.	Nie pobudza ruchów powietrza w pomieszczeniach a dzięki temu jest przyjazny dla alergików
Powierzchnia grzejników konwektorowych posiada zazwyczaj dużą temperaturę co powoduje pirolizę (przypalanie kurzu) co często prowadzi do uwalniania trujących substancji	Powierzchnia grzejników działających na zasadzie promieniowania np ogrzewania podłogowego jest zazwyczaj o temperaturze niewiele większej od temperatury w pomieszczeniu a dzięki temu nie ma niebezpieczeństwa przypalania kurzu
Rozkład temperatury w pomieszczeniu jest daleki od idealnego. Najcieplej jest przy suficie a najzimniej przy podłodze. Komfort przebywania w pomieszczeniu jest słabszy.	Rozkład temperatury jest zbliżony do idealnego. Najlepszy profil ma ogrzewanie podłogowe. Sprawia to większy komfort przebywania w pomieszczeniu
Temperatura w pomieszczeniu jest wyższa niż w przypadku ogrzewania płaszczyznowego co sprawia mniejszą wilgotność powietrza a w związku z tym mniejszy komfort w pomieszczeniu	Dzięki lepszemu rozkładowi temperatur w pomieszczeniu odczucie ciepła będzie takie samo przy mniejszej temperaturze w pokoju co oszczędza energię i pozwala utrzymać większą wilgotność powietrza.
Ogrzewanie konwekcyjne posiada lepsze możliwości regulacji ze względu na mniejszą pojemność cieplną. Łatwiej reagować na zmiany temperatury zewnętrznej.	Ogrzewanie powierzchniowe posiada dużą akumulacyjność cieplną a więc w przypadku szybkich zmian temperatury zewnętrznej może nastąpić przegrzanie pomieszczenia

Źródło: [7]

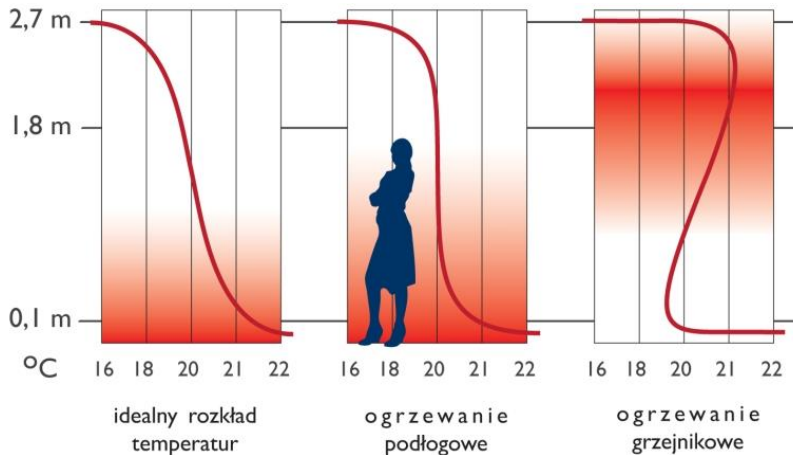
Jak pokazuje powyższa tabela wykorzystywanie promieniowania do ogrzewania pomieszczeń posiada wiele zalet lecz również trzeba liczyć się z pewnymi niedogodnościami, które za sobą niesie. Ogrzewanie powierzchniowe nie ogranicza się tylko do podłogowego. Coraz bardziej popularne stają się ogrzewania ściennie czy też sufitowe. Ich zasady działania zalety jak i wady zostaną opisane w następnym rozdziale [5,6,7].

Ogrzewania powierzchniowe, promienniki, słońce

Przy wyborze ogrzewania nie chodzi tylko o sposób ogrzewania pomieszczeń i wyboru czy to będą grzejniki lub też rury umieszczone w podłodze ścianach czy suficie. Zagadnienie ogrzewania to cały system, który musi współpracować i być efektywny nie tylko w czasie zimy. W związku z rozwojem odnawialnych źródeł energii jak też dzięki coraz lepszym materiałom izolacyjnym a dodatkowo przez regulacje prawne, które stają się coraz ostrzejsze z roku na rok niezbędne jest łączenie technologii aby można było uzyskać dom energooszczędny czy też pasywny. W związku z tym, że ogrzewania powierzchniowe pracują przy małych temperaturach zasilania najlepszym pomysłem jest połączenie ogrzewania z pompą ciepła, która takie temperatury dostarcza z bardzo dużą efektywnością. Niestety pompa zużywa stosunkowo dużo energii elektrycznej. W tym momencie staje się bardzo dobrym pomysłem użycie paneli fotowoltaicznych do zasilania pompy. Jest to idealne rozwiązanie ze względu na to że produkcja energii elektrycznej z paneli opłaca się najbardziej w przypadku kiedy ta energia jest na bieżąco wykorzystywana. Pompa ciepła wpisałaby się w ten profil z dużą efektywnością. Artykuł jest jednak o ogrzewaniu a więc skupmy się na rodzajach ogrzewania zakładając że źródło zasilania jest zapewnione w sposób zadawalający. Ogrzewanie powierzchniowe występuje jak już wcześniej wspomniano w 3 formach każda z nich ma swoje zalety jak i wady.

Ogrzewanie podłogowe

Ogrzewanie podłogowe jest najbardziej rozpowszechnioną formą ogrzewania powierzchniowego a zarazem jest też najstarszym rodzajem ogrzewania centralnego jakie powstało w historii. Już starożytni rzymianie i Grecy używali ogrzewania podłogowego do nagrzewania pomieszczeń np. w termach. Ogrzewanie podłogowe cechuje jak już wcześniej wspomniano najbardziej zbliżony rozkład temperatury do idealnego. Ukazuje to poniższy rysunek:



Rys. 3. Rozkład temperatur w pokoju od lewej: idealny, dla ogrzewania podłogowego, dla ogrzewania grzejnikowego

Źródło: <http://instalreporter.pl>

Dla porównania przedstawiono również rozkład temperatur dla ogrzewania za pomocą popularnych grzejników konwekcyjnych. Dzięki ciepłej podłodze komfort cieplny znacznie się zwiększa gdyż jesteśmy przyzwyczajeni do ciepłej ziemi nagrzewanej przez słońce. Poprzez to gdy jest nam ciepło w nogi to ogólna temperatura pomieszczenia odczuwana jest jako wyższa niż jest. Pozwala to zmniejszyć temperaturę nawet o 2-3°C a czuć się w nim równie komfortowo. Dzięki tej możliwości oszczędność energii może sięgnąć nawet 15%-20% w porównaniu z ogrzewaniem konwekcyjnym. Ogrzewanie podłogowe wodne może zostać wykonane na wiele sposobów a mianowicie poprzez zabudowę moką gdzie zalewa się rury specjalnym betonem z domieszką jastrychu lub w technologii suchej gdzie stosuje się płyty odporne na przeciążenia lub przez wyłożenie podłogi matami elektrycznymi, istnieją jeszcze inne możliwości jednak nie są one zbyt popularne więc ograniczę się tylko do wspomnianych. Zabudowa moką wykonuje się zwykle w powstających budynkach a suchą w modernizowanych. Pomimo wielu zalet ogrzewanie podłogowe ma pewne wady które stawiają je w niekorzystnej sytuacji w stosunku innych ogrzewań powierzchniowych a mianowicie [10]:

- w trakcie budowania domu musimy przewidzieć gdzie będą stały meble, gdyż zasłanianie powierzchni grzejnej przynosi duże straty energii;
- ogrzewanie podłogowe ma dużą akumulacyjność ciepłą a więc ciężko jest regulować temperaturę w krótkich odstępach czasowych;
- wylewka mocno obciąża strop co ogranicza ogrzewanie podłogowe do stosowania głównie w domach jednorodzinnych nie posiadających wielu kondygnacji;

- nie wszystkie pokrycia podłogi nadają się do ogrzewania podłogowego, muszą mieć niski opór cieplny;
- w przypadku awarii koszty naprawy są bardzo wysokie ze względu na konieczność rozkucia podłogi by naprawić usterkę.

Ogrzewanie ścienne

Ogrzewanie ścienne wykonuje się podobnymi sposobami jak ogrzewanie podłogowe czyli w metodzie mokrej i suchej jak też jest możliwość zastosowania radiatorów elektrycznych czy grzejników ściennych działających poprzez wykorzystanie zdolności dyfuzyjnych stanu gazowego dzięki czemu nie potrzebne jest wprowadzanie wody pod tynk. W ogrzewaniu ściennym warstwa tynku pokrywająca powierzchnie grzewczą ma zazwyczaj około 1,5cm grubości, w porównaniu podłógówki gdzie warstwa betonu jest parokrotnie wyższa daje to wiele dodatkowych zalet. Grubość przykrycia ogrzewania ściennego znacznie obniża bezwładność cieplną a więc daje możliwość szybkiego reagowania na zmiany temperatury zewnętrznej co skutkuje oszczędnością energii. Dodatkowo ściany mogą osiągać nieco większą temperaturę niż podłoga a mianowicie 35°C, ponieważ nie ma konieczności być z nimi w ciągłym kontakcie jak jest to w przypadku podłogi. Pozwala to osiągnąć większą moc cieplną w przeliczeniu na m². Dla pomieszczenia o temperaturze 20°C wydajność może sięgnąć 150W/m² a w przypadku ogrzewania podłogowego maksymalna średnia wydajność zwykle osiąga 80W/m². Instalacje powierzchniowe mają to do siebie, że można je wykorzystywać nie tylko do ocieplania ale również do chłodzenia pomieszczeń i w tym momencie ściany będą spisywać się lepiej ponieważ chłód ze ścian rozłoży się równomierniej niż gdy do tego samego wykorzystaloby się podłogę. Jedyne wyjątkiem będzie tu sytuacja gdy mamy duże zyski promieniowania słonecznego padające na podłogę w pomieszczeniu, wtedy podłoga miałaby przewagę. Ogrzewanie ścienne ma jeszcze jedną bardzo ważną zaletę. W związku ze stosunkowo łatwym i niewymagającym przebudowy całego domu montażem stosowane jest często jako dodatkowe źródło ogrzewania w przypadku gdy np. ogrzewanie podłogowe czy inne nie jest w stanie zapewnić odpowiedniej mocy cieplnej wtedy dodatkowy grzejnik ścienny wpisuje się idealnie w zapotrzebowanie energii cieplnej wymaganej do osiągnięcia odpowiedniej temperatury. Pomimo licznych zalet rozpatrując ogrzewanie ścienne należy wziąć pod uwagę główne wady, które mogą zaważyć na wyborze ogrzewania a są to [10,11]:

- ogrzewanie ścienne najlepiej spisyuje się gdy jest umieszczone na ścianach zewnętrznych jednak w wielu pomieszczeniach powierzchnia ścian zewnętrznych nie jest wystarczająco duża aby zapewnić wystarczającą moc cieplną. Jest możliwość umieszczenia ogrzewania również na ścianach wewnętrznych lecz wtedy nie może być ona zasłonięta przez żadne meble;

- w przypadku montowania na ścianie elementów wyposażenia wnętrza istnieje duże niebezpieczeństwo uszkodzenia rur. Jeżeli zastosowane są rury z wkładką aluminiową problem nie jest bardzo duży gdyż wystarczy użyć urządzenia do lokalizowania przewodów elektrycznych. W przypadku rur jednorodnych nada się do tego folia termo czuła lub wykonanie dokładnych zdjęć przed montażem;
- ściany w budynku gdzie montowane jest ogrzewanie ściennie powinny spełniać warunek współczynnika przenikania $U < 0,4 \text{ W/m}^2$. Jeżeli jest to nowy budynek wtedy ten współczynnik powinien być spełniony zgodnie z nową normą, lecz jeśli chodzi o modernizację budynków wtedy wymagane będzie dodatkowe ocieplenie ścian co podnosi koszty inwestycji.

Ogrzewanie sufitowe

Ogrzewanie sufitowe jest jak dotąd najmniej popularnym rodzajem ogrzewań powierzchniowych ale coraz bardziej zyskuje na sile. Przykładem mogą być kraje skandynawskie gdzie już od wielu lat z powodzeniem stosuje się tą technologię. Po przeanalizowaniu podłogowego i ściennego łatwiej jest wyciągnąć wnioski na temat wad i zalet tej wersji gdy powierzchnia grzewcza umieszczona jest na suficie, a więc podstawowe plusy to:

- największa powierzchnia grzewcza spośród ogrzewań powierzchniowych, gdyż jest bardzo małe prawdopodobieństwo że sufit zostanie zasłonięty przez elementy wyposażenia. Daje to możliwość zapewnienia całkowitego zapotrzebowania ciepłego pomieszczenia;
- nie ma konieczności planowania rozmieszczenia mebli przed wykonaniem ogrzewania w domu, daje największą swobodę wystroju wnętrza;
- brak bezpośredniego kontaktu ludzi z powierzchnią grzewczą daje możliwość na utrzymanie wyższej temperatury powierzchni grzewczej w porównaniu do podłóg;
- ogrzewanie sufitowe posiada największy procent wymiany ciepła poprzez promieniowanie. Dzieje się tak ze względu na utrzymywanie się ciepłego powietrza przy powierzchni grzewczej tj. suficie w związku z tym konwekcja zostaje znacznie osłabiona;
- idealnie spisuje się w przypadku chłodzenia gdyż zimno będzie opadać ochładzając równomiernie powietrze w całym pomieszczeniu;
- bezwładność cieplna jest o wiele mniejsza niż w ogrzewaniu podłogowym ponieważ warstwa tynku jest o wiele cieńsza od warstwy betonu. Pozwala to regulować temperaturę pomieszczenia o wiele szybciej.

Wady:

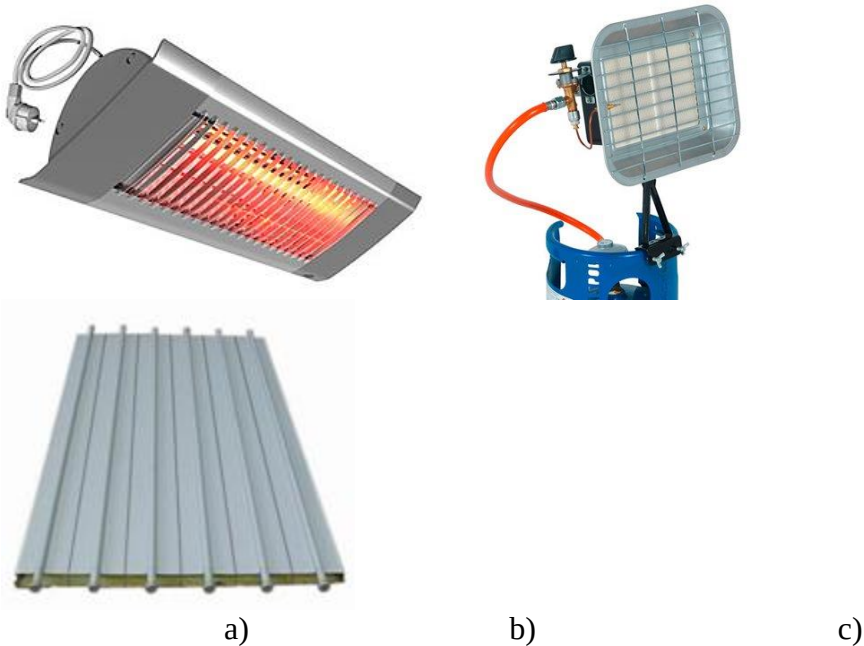
- do osiągnięcia komfortu cieplnego potrzebna jest wyższa temperatura niż dla ogrzewania podłogowego;

- napływanie ciepłego powietrza od góry nie jest tak przyjazne dla naszych organizmów w porównaniu z cieplejszymi stopami od głowy;
- trzeba utrzymywać odpowiednią temperaturę sufitu zależnie od wysokości pomieszczenia. Dla kondygnacji o wysokości 3m maksymalna temperatura powierzchni grzejnej nie może przekraczać 35°C.

Promienniki

Promienniki jest to kolejny rodzaj urządzeń do ogrzewania pomieszczeń za pośrednictwem fal elektromagnetycznych. Najprostszym przykładem promiennika może być np. grzałka elektryczna, która ogrzewa się do temperatury kilkuset stopni i emituje fale podczerwone, które następnie ogrzewają pomieszczenie. Innym przykładem jest obiekt występujący w każdym domu a mianowicie żarówka. Co prawda jej głównym przeznaczeniem jest wytwarzanie światła ale nie zmienia to faktu że jest również promiennikiem gdyż 95% mocy żarówki zużywana jest na promieniowanie a tylko 5% do wytworzenia światła widzialnego. W związku z tym żarówka jest grzałką o sprawności 95%, której efektem ubocznym jest światło. Wykorzystywanie oświetlenia do zwiększania temperatury pomieszczenia nie byłoby jednak najlepszym pomysłem a zatem skupmy się na urządzeniach specjalnie do tego przeznaczonych. Dzielią się one na 3 grupy:

- **promienniki elektryczne** (Rys.3a) działające na zasadzie wcześniej wspomnianej gdzie urządzenie rozgrzewane jest do wysokich temperatur a następnie promieniowanie elektromagnetyczne kierowane jest dokładnie na obszar docelowy. Zaletą takich promienników są niskie koszty inwestycji i wysoka wydajność. Niestety praca takiego promiennika łączy się z wysokimi kosztami energii elektrycznej;
- **promienniki gazowe** (Rys.3b) można spotkać w wersji rurowej lub ceramicznej są to urządzenia, które wykorzystują gaz do wytwarzania energii cieplnej następnie gromadzonej w rurze promieniującej lub ceramicznym generatorze i oddawanej przez promienie podczerwone do otoczenia. Głównym plusem są mniejsze koszty eksploatacji w porównaniu do elektrycznych ale niestety łączy się to z wyższymi kosztami montażu ponieważ trzeba doprowadzić gaz do urządzenia. Jest możliwość wykorzystania butli gazowej lecz w tym momencie główna zaleta a mianowicie koszt eksploatacji traci na atrakcyjności;
- **promienniki wodne** (Rys.3c) są to urządzenia działające na takiej samej zasadzie jak ogrzewanie powierzchniowe sufitowe wodne. Jako medium dostarczające ciepło wykorzystywana jest woda która z kolei ogrzewana jest w centralnym źródle. Można je również wykorzystywać do chłodzenia w okresie letnim.



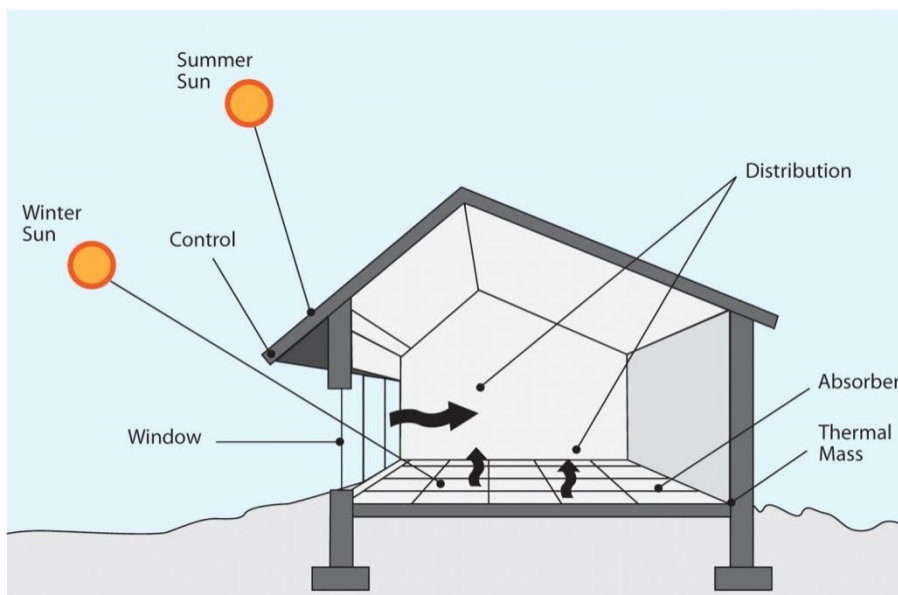
Rys. 3. Przykłady promienników a) promiennik elektryczny b) promiennik gazowy c) promiennik wodny

Źródło: <http://elektroheat.pl>

Niezależnie od rodzaju używane są one najczęściej w pomieszczeniach o dużej kubaturze np. warsztaty, hale produkcyjne czy kościoły. Głównie ze względu na to że promienniki można skierować w odpowiednie miejsce dokładnie tam gdzie ogrzewanie jest aktualnie potrzebne. A więc jest możliwość ogrzewania konkretnego miejsca pracy czy też strefy roboczej. Ponadto promienniki mają bardzo niską akumulacyjność ciepłą a więc nadają się idealnie do miejsc gdzie ogrzewanie nie jest potrzebne non-stop. Niezwłocznie po uruchomieniu urządzenia dostarczane ciepło jest odczuwalne [6,7].

Promieniowanie słoneczne

Rozpatrując promieniowanie jako proces wymiany ciepła w ogrzewnictwie nie można zapomnieć o promieniowaniu elektromagnetycznym pochodzącym od słońca a mianowicie wykorzystaniu fotonów poprzez odpowiednie ukształtowanie bryły budynku lub specjalnych elementów, które umieszcza się pod odpowiednim kątem względem pozycji słońca w cyklu rocznym jak też i dziennym. Metoda ta nazywa się pasywnym ogrzewaniem słonecznym. Jeszcze parę lat temu ta metoda nie miała miejsca gdyż zbyt słaba izolacyjność okien nie pozwalała na pozytywny balans między zyskami cieplnymi a stratami przez przewodzenie szyb. Dzięki rozwojowi technologii standardem stały się okna o współczynniku przepuszczalności bardzo zbliżonym do ścian. Możliwe jest to przez zastosowanie próżni pomiędzy szybami w oknie a jak wiadomo próżnia jest doskonałym izolatorem. Pamiętajmy jednak że promieniowanie cieplne doskonale rozchodzi się w próżni a to sprawia idealną sytuację dla jednokierunkowego przepływu ciepła za pośrednictwem fal elektromagnetycznych które po przejściu przez okno akumulowane są w podłodze ścianach lub obiektach wewnątrz pomieszczenia. W związku z tym w przypadku dużego przeszklenia od strony południowej zyski słoneczne mogą bardzo pozytywnie wpływać na całkowite zapotrzebowanie energii cieplnej budynku. Ktoś mógłby stwierdzić że może i byłoby to dobre rozwiązanie zimą lecz atem groziłoby znacznym przegrzaniem a co za tym idzie ogromnymi nadwyżkami energii na chłodzenie takiego pomieszczenia. Nie jest to prawdą ponieważ dzięki zmianie wysokości słońca na przestrzeni roku bardzo łatwo jest regulować ilość promieni wpadających do domu. Zobrazowane jest to na Rys.4. [1,5].



Rys. 4. Przykład wykorzystania promieniowania słonecznego do zwiększenia energooszczędności budynku

Źródło: <http://fundacjaenergia.pl>

Podsumowanie

Promieniowanie jest to rodzaj transferu ciepła, który występuje w każdym cieple jednak to jak je wykorzystujemy zależy już w dużej mierze od nas. Istnieje wiele technologii pozwalających czerpać ogromne korzyści zdrowotne jak i finansowe poprzez wybranie promieni elektromagnetycznych na główny rodzaj transferu ciepła do ogrzewania pomieszczeń. Aby to osiągnąć musimy spełnić parę ważnych warunków. Wybierając rodzaj ogrzewania należy zrozumieć zasady działania poszczególnych transferów ciepła. Dla różnych zastosowań rozwiązanie będzie inne. Jeżeli już pozna się właściwości i to co oferują różne transfery niezbędne jest wybranie technologii, która najefektywniej działa w wybranym przekazie ciepła. Kolejnym etapem jest poznanie kubatury pomieszczenia i jego przeznaczenia. Gdy posiada się te wszystkie informacje wyjściowe pozostaje przeanalizowanie zalet i wad poszczególnych rozwiązań i wybranie najdogodniejszego dla danej sytuacji. Jak opisałem w artykule promieniowanie ma bardzo dużo zalet i w większości przypadków będzie to najlepsze rozwiązanie dla domów jednorodzinnych lub pomieszczeń o dużej kubaturze wewnątrz jak magazyny czy hale. Oczywiście narzędzie będzie inne gdyż dla domu wolnostojącego ogrzewanie powierzchniowe podłogowe ścienne lub sufitowe sprawdzi się idealnie ze względu na komfort cieplny jak

i oszczędność poprzez niższe koszty eksploatacji z kolei w magazynach promienniki pozwolą oszczędzić ogromne ilości energii poprzez nagrzewanie punktowe wybranych miejsc i małą akumulacyjność cieplną. Nie można też pomijać dodatkowej energii uzyskiwanej od słońca, która dzięki umiejętnemu projektowaniu bryły budynku znacznie zwiększy energooszczędność.

Literatura

- [1] Recknagel H., Sprenger E., Schramek E.R., *Kompendium wiedzy: ogrzewnictwo, klimatyzacja, ciepła woda, chłodnictwo*, OMNI SCALA, Wrocław 2008.
- [2] Rubik M., Nowicki J., Chmielowski A., Pykacz S., Furtak L., *Centralne ogrzewanie, wentylacja, ciepła i zimna woda oraz instalacje gazowe w budynkach jednorodzinnych – Poradnik*, Ośrodek Informacji “Technika instalacyjna w budownictwie”, Warszawa 2000.
- [3] Krygier K., Klinka T., Sewerynik J., *Ogrzewanie, wentylacja, klimatyzacja*, WSzIP, Warszawa 1995.
- [4] Norwicz J. (red.), *Termomodernizacja budynków dla poprawy jakości środowiska*, Biblioteka Fundacji Poszanowania Energii, Gliwice 2004.
- [5] Szarkowski A., Łatowski L., *Ciepłownictwo*, WNT, Warszawa 2006.
- [6] Cieślak-Włosek A., Rozkład temperatury w przegrodzie budowlanej przy zastosowaniu wodnego ogrzewania podłogowego, 3/2005.
- [7] *Ciepłownictwo, ogrzewnictwo, wentylacja – miesięcznik naukowo-techniczny*.
- [8] Nantka M.B., *Ogrzewnictwo i ciepłownictwo*, Wyd.Pol.Śl, Gliwice 2006.
- [9] Kwiatkowski J., Cholewa L., *Centralne ogrzewanie*, Arkady, Warszawa 1980.
- [10] Wiśniewski S., *Wymiana ciepła*, WNT, Warszawa 2000.
- [11] Żukowski M., *Ogrzewanie podłogow*, Arkady, Białystok 2009.
- [12] Wiśniewski S., *Wymiana ciepła*, WNT, Warszawa 2000.
- [13] Howell J.R., Siegel R., Menguc M.P., *Thermal Radiation Heat transfer*, CRC Press, London 2006.
- [14] Gale R.P., Lax E. *Radiation, What it is, What You Need to Know*, Random house LLC, USA 2013.

mgr inż. Monika Pawlita-Posmyk¹⁾ dr hab. inż. Małgorzata Wzorek,
prof. PO²⁾

Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny

Katedra Inżynierii Procesowej, ul. St. Mikołajczyka 5, 45-271 Opole

¹⁾mpawlita@wp.pl ²⁾m.wzorek@po.opole.pl

AKTUALNE PROBLEMY PRODUKCJI BIOGAZU

Current problems of biogas production

Słowa kluczowe: biogaz, surowce, mieszanie, fermentacja

Keywords: biogas, raw materials, mixing, fermentation

Streszczenie:

W Polsce wytwarzanie biogazu staje się w ostatnim czasie coraz bardziej powszechne. Jego produkcja m.in. z odpadów rolniczych oraz upraw stanowi dużą szansą dla polskiego rolnictwa. Istotnym aspektem procesu oprócz względów czysto ekonomicznych jest również pozyskiwanie energii ze źródeł odnawialnych przy jednoczesnej gwarancji bezpieczeństwa dla środowiska naturalnego. Liczne zalety m.in. redukcja emisji metanu do atmosfery, wtórne przetworzenie odpadów przyczynia się do uznania produkcji biogazu za przyjazną dla otoczenia i środowiska. Jednymi z podstawowych parametrów produkcji biogazu są efektywność procesu oraz jakość wytworzonego biogazu, które zależą w dużej mierze od stosowanych substratów oraz sposobu prowadzenia fermentacji. W artykule opisano różne technologie produkcji biogazu oraz przedstawiono problematykę związaną z jego wytwarzaniem. Dokonano analizy surowców stosowanych do jego produkcji, jak również przeglądu kształtów mieszadeł i zbiorników dotychczas wykorzystywanych do procesu fermentacji. Ponadto przeprowadzono analizę podstawowych parametrów technologicznych niezbędnych podczas prawidłowego przebiegu fermentacji.

Wprowadzenie

Proces produkcji biogazu z roku na rok zyskuje na popularności, a wytwarzanie go między innymi z odpadów rolniczych, czy upraw staje się dużym potencjałem do rozwoju polskiego rolnictwa. Wiele pozytywnych aspektów przekonuje coraz większą grupę ludzi do popierania tego typu rozwiązania. Wśród nich znajdzie się między innymi ograniczenie emisji metanu do atmosfery, czy też składowisk odpadów. Ponadto proces produkcji biogazu jest bezpieczny dla otoczenia oraz środowiska naturalnego.

W artykule zawarto opisy wybranych metod produkcji biogazu. Zestawiono również dotychczas wykorzystywane surowce do wytwarzania biogazu oraz dokonano przeglądu najczęściej stosowanych w procesie fermentacji kształtów mieszadeł i zbiorników. Przedstawione kluczowe informacje umożliwiają usystematyzowanie podstawowych informacji o produkcji biogazu.

Różne metody produkcji biogazu

Biogaz wytwarzany jest w procesie przetwarzania biomasy, która jest jednym z kluczowych źródeł odnawialnej energii. Ze względu na sposób jego pozyskania biogaz można podzielić na: biogaz wysypiskowy (fermentacja odpadów na składowiskach), biogaz z osadów ściekowych (fermentacja szlamu kanalizacyjnego), biogaz pochodzenia rolniczego (fermentacja biomasy z upraw energetycznych, roślinnych, odchodów zwierzęcych, pozostałości z branż spożywczych itp.).

Biogaz powstaje w procesie beztlenowym, podczas fermentacji metanowej w 4 etapach: hydrolizy, kwasogenezy, octanogenezy, metanogenezy [1-2, 3].

Produkcja biogazu może być przeprowadzana dzięki zastosowaniu różnych metod. Do najczęściej spotykanych kryteriów podziału technologii produkcji biogazu zaliczyć można m.in. liczbę etapów procesu technologicznego, temperaturę, tryb napełniania materiałem oraz zawartość substancji suchej w substracie. Szczegółowy opis metod produkcji biogazu przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie metod produkcji biogazu

Kryterium	Cechy odróżniające	Charakterystyka
Liczba etapów procesu technologicznego	Jednoetapowy Dwuetaapowy Wieloetapowy	Nie występuje przestrzenne rozdzielanie różnych faz procesu (hydrolyzy, fazy zakwaszania, tworzenia kwasu octowego i metanu). Zachodzi przestrzenne oddzielenie poszczególnych faz procesu na różne zbiorniki, przykładowo faza hydrolyzy i zakwaszania jest przeprowadzana w zbiorniku zewnętrznym. Zachodzi przestrzenne oddzielenie poszczególnych faz procesu na różne zbiorniki.
Temperatura procesu	Psychrofilowa Mezofilowa Termofilowa	1. $\leq 20^{\circ}\text{C}$ [4], $20-25^{\circ}\text{C}$ [3] 2. $32^{\circ}\text{C} - 38^{\circ}\text{C}$ [7], $32-42^{\circ}\text{C}$ [6], $35-37^{\circ}\text{C}$ [3-4] 3. $42 - 55^{\circ}\text{C}$ [7], $50-57^{\circ}\text{C}$ [6], $55-60^{\circ}\text{C}$ [3], $52-55^{\circ}\text{C}$ [4]
Tryb napełniania materiałem	Nieciągły Częściowo ciągły Ciągły	Zbiornik fermentacyjny jest całkowicie napełniany świeżym substratem, następnie hermetycznie zamykany. Substrat pozostaje w zbiorniku przez określony czas - w tym czasie nie uzupełnia się go nowym substratem. Po upływie przyjętego czasu fermentator opróżnia się zbiornik, zostawiając na dnie niedużą ilość wsadu dla zaszczerpienia kolejnego procesu i ponownie napełnia się zbiornik. Co najmniej jeden raz w ciągu dnia zbiornik fermentatora jest zasilany świeżym ładunkiem substratu. Uzupełnianie fermentatora zwiększa równomierność pozyskiwania gazu oraz pomaga stabilizować jego skład. Ciągłe napełnianie zbiornika sprawia, że proces ma charakter przepływowy, zbiornik fermentatora jest napełniany wielokrotnie w ciągu doby, a taka sama ilość odpadów pofermentacyjnych jest wypierana do zbiornika składowego. Zbiornik fermentacyjny jest ciągle pełny wsadem o podobnych/takich samych parametrach co daje gwarancję wysokiej jakości produkcji. Bardzo ważna jest efektywność mieszania wsadu.
Zawartość substancji suchej w substracie	Fermentacja mokra Fermentacja sucha	1. Zawartość masy suchej w fermentorze wynosi od 12 do 15% i przy tej zawartości wody możliwe jest pompowanie materiału. W praktyce rolniczej duża część biogazowni pracuje w systemie fermentacji mokrej. 2. Jeżeli zawartość masy suchej wzrośnie powyżej 16%, to materiał przeważnie traci zdolność do pompowania i mówimy wtedy o fermentacji suchej. Wsad jest składowany luzem.

Źródło: [4, 3-7]

Substraty do wytwarzania biogazu

Efektywność produkcji biogazu w dużej mierze zależy od zastosowanych substratów, natomiast ilość powstającego biogazu od zawartości związków organicznych. Praktycznie z każdego rodzaju surowca posiadającego zdolność do biologicznego rozkładu można uzyskać pewną ilość gazu [4]. Coraz częściej do produkcji biogazu wykorzystywane są bardzo różne substraty. Jako przykład stosowania w procesie fermentacji można podać m.in.: odpady pochodzenia zwierzęcego

(tłuszcz, gnojowica, gnojówka, obornik), produkty uboczne wytwarzane w produkcji żywności (melasa), komunalne osady ściekowe, odpady z przemysłu spożywczego np. odpady z owoców, pulpa jabłeczna, odpady kuchenne, pozostałości warzyw. Jako biomasę roślinną wykorzystuje się głównie: słomę, słomę kukurydzy, liście buraków czy ziemniaków, trawę, kiszonkę z kukurydzy, lucerny i trawy [8-9,10-17]. Zawartość biogennych substancji organicznych w substratach pozwala na stabilizację całego przebiegu rozkładu. Związki o mniejszych cząsteczkach są rozkładane w sposób szybszy niż wysokocząsteczkowe biopolimery. Odpady charakteryzują się różną podatnością na rozkład. Przykładowo odpady roślinne zawierają dużo trudno rozkładalnej lignino-celulozy, a odpadki kuchenne więcej wilgoci, pierwiastków pokarmowych i korzystniejszą w rozkładzie strukturę. Substancje hamujące proces przyczyniają się m.in. do ograniczania produktywności bakterii, jak również mogą całkowicie wstrzymywać przebieg procesu. Podczas fermentacji odpadów pochodzących z gospodarstw domowych czynnikami hamującymi są np. antybiotyki, środki dezynfekujące czy metale ciężkie [18-19].

Podstawowe parametry wpływające na przebieg procesu

Zaburzenia stanu równowagi pomiędzy bakteriami określonych etapów oraz produktami ich metabolizmu doprowadzają do zakłócenia fermentacji. Charakterystycznymi parametrami cechującymi prawidłowy przebieg procesu fermentacji są m.in:

- pH, stopień rozkładu substancji organicznych,
- ilość i skład biogazu,
- zawartość kwasów organicznych dot. ilości wytwarzanych w I i II fazie produktów pośrednich (wielkość stosunku kwasów lotnych do zasadowości, KL/Z),
- odczyn.

Kontrola ilości kwasów organicznych i zasadowości jak również odczynu umożliwia ocenę toku procesu. Gwałtowny spadek odczynu zachodzi gdy proces uległ już załamaniu. Drugim istotnym wskaźnikiem oceny prawidłowego przebiegu fermentacji jest wartość stosunku kwasów lotnych do zasadowości (KL/Z). Wzrastająca liczba stosunku KL/Z sygnalizuje z czasem drastyczne obniżenie odczynu, co prognozuje zakłócenia w przebiegu fermentacji metanowej.

Na proces fermentacji wpływa bardzo wiele czynników. Niektóre z nich mają działanie przyspieszające, inne zaś wprost przeciwnie negatywne. Do warunków oddziałujących na fermentację można zaliczyć m.in. chemiczny i fizyczny skład substratu [3-4,20-21]. W tabeli 2 zawarto informacje o podstawowych parametrach mających wpływ na przebieg procesu fermentacji.

Tabela 2. Parametry wpływające na przebieg procesu fermentacji

Parametr	Charakterystyka
Mieszanie	- mieszanie korzystnie wpływa na przebieg fermentacji, przyspiesza i dynamizuje procesy biologicznego rozkładu - zapobiega tworzeniu się kożucha lub zmniejsza jego grubość i pozwala na wydzielanie się gazu - intensywność mieszania zależy od temperatury fermentacji (im wyższa tym intensywność większa) - niedokładne mieszanie lub jego brak przyczynia się do powstawania miejsc przegrzanych i niedogrzanych - różnice temperatury mogą dochodzić do kilku stopni, - system mieszania powinien być właściwie zaplanowany
Odczyn pH	- odczyn pH ma kluczowe znaczenie podczas rozwoju mikroorganizmów wywołujących fermentację metanową - niewielkie zmiany pH przyczyniają się do zaburzenia w rozmnażaniu bakterii - prawidłowy przebieg procesu zachodzi w przedziale wartości pH: 7-7,5 (jednak przy wartościach z reguły 6,9-7,3 nie powinny występować również żadne zaburzenia procesu) - nieodpowiednie jest obniżanie pH poniżej 6,5
Temperatura	- ważny parametr wpływający na równowagę dynamiczną w komorze fermentacyjnej - drastyczne zmiany przyczyniają się do obumierania, szoku termicznego bakterii w skutek czego następuje wzrost stężenia kwasów lotnych w komorze i powiązany z tym gwałtowny spadek zasadowości i odczynu pH - podczas eksploatacji zaleca się zachowanie stabilności temperatury - stałość temperatury zapewnia prawidłową eksploatację
Zawartość substancji toksycznych	- proces fermentacji może zostać zaburzony poprzez działanie środków bakterio-bójczych, herbicydów, insektycydów, środków powierzchniowo - czynnych, substancje toksyczne tj.: siarczki, kwasy lotne, metale ciężkie (m.in. Cu, Cd, Zn, Fe, Cr, Ni), amoniak, węglowodory - zakłócenia procesu mogą wynikać z obecności inhibitorów - substancji, które już w niewielkich ilościach wykazują działanie toksyczne dla bakterii i spowalniają proces rozkładu
Ilość i częstota doprowadzania substratu	- ilość dostarczanego substratu wpływa na czas jego fermentacji - częstota zasilania komór fermentacyjnych powinna być stała - ilość i częstota zasilania zależy od temperatury fermentacji oraz wielkości zbiornika, w którym odbywa się proces - w fermentacji mezofitowej substrat powinno doprowadzać się nie rzadziej niż 6 razy w ciągu doby, a termofitowej, co najmniej kilkanaście razy w ciągu doby
ciecz nadosadowa	- ciecz osadowa powstała w trakcie procesu fermentacji jest bardzo silnie zanieczyszczona - obciążenie skoncentrowaną cieczą z przefermentowanego osadu o określonych właściwościach może doprowadzić do uszkodzenia sprawności biologicznej systemów oczyszczających jak również przyczynić się do wypłukiwania substancji, prowadzących do eutrofizacji odbiornika

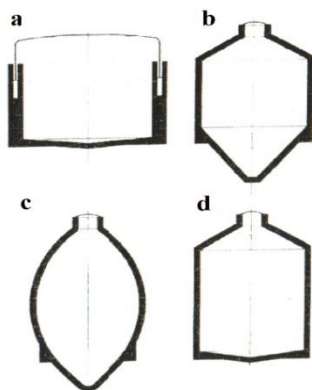
Źródło: [4]

Przegląd kształtów mieszadeł oraz zbiorników

Obecnie na rynku dostępnych jest wiele kształtów zbiorników wykorzystywanych do produkcji biogazu. Wśród dostępnych modeli istnieją komory o tradycyjnych kształtach jak również specjalnie projektowane do tego celu. Wśród najczęściej stosowanych kształtów komór występuje:

- a) cylinder ze stożkiem ściętym w górnej i dolnej części zbiornika (pełni on trzy funkcje: zagęszczanie w dolnej części zbiornika, fermentację w części cylindrycznej oraz zapewnia wypływ gazu z niewielkiej powierzchni górnej dbając aby wielkość kożucha była możliwie najmniejsza),
- b) kształt elipsoidalny - kształt optymalny pod względem warunków cyrkulacji i minimalizacji strat ciepła,
- c) cylinder z płaskim dnem i płaskim przykryciem – dla uproszczonych konstrukcji wprowadzono kształt komór cylindryczny zastosowywany w miejscach gdzie występują niekorzystne warunki posadowienia [4].

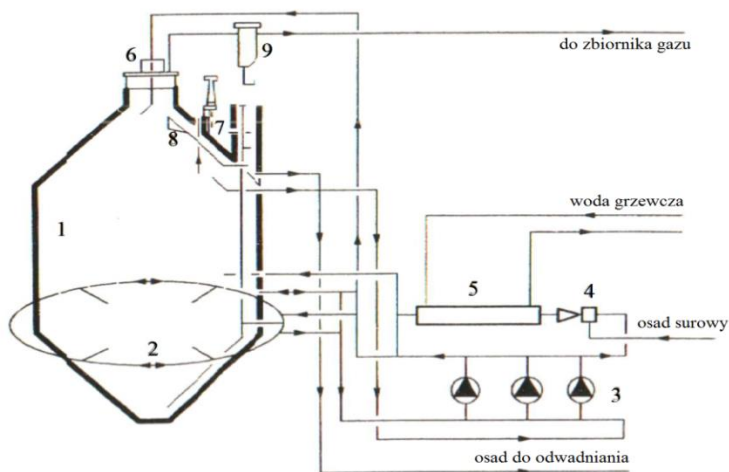
Najczęściej stosowane kształty fermentacyjnych zbiorników przedstawiono na rys. 1. Możliwe są łączenia tych konstrukcji.



Rys. 1. Najczęściej spotykane i zastosowywane w praktyce kształty komór fermentacyjnych: a) anglo-amerykański, b) klasyczny europejski, c) elipsoidalny, d) europejski o płaskim dnie

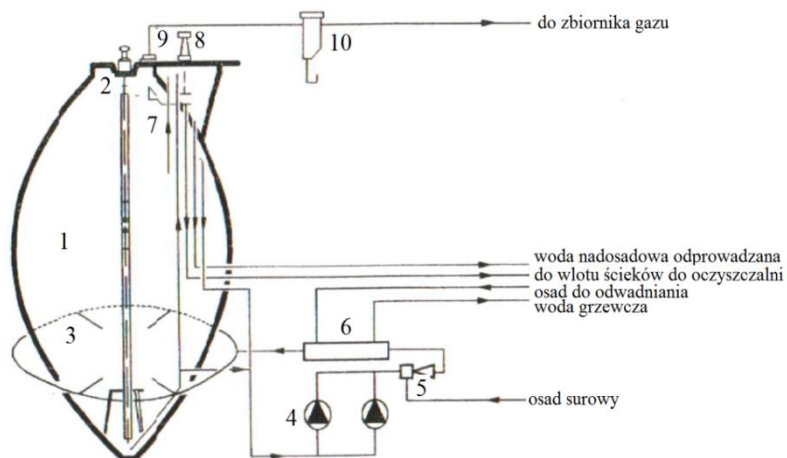
Źródło: [4]

Istotne znaczenie podczas fermentacji odgrywa specyfika przeprowadzania całego procesu. Wyróżniamy różne sposoby prowadzenia cyrkulacji m.in. osadów ściekowych w zbiornikach o odmiennych geometriach, których przykłady przedstawiono na Rys. 2-4. Ilustracje losowo wybranych zbiorników zlokalizowanych na terenie Polski przedstawiono natomiast na Rys. 5.



Rys. 2. Sposób prowadzenia cyrkulacji osadów w komorze o kształcie stożkowo-walcowym: 1-komora WKF, 2-przewody mieszania pompowego, 3-pompy mieszające, 4- inżektor, 5-wysoko sprawny wymiennik ciepła, 6-ujęcie gazu i rozbijanie kożucha, 7 regulacja poziomu osadu w komorze, 8-odprowadzanie kożucha, 9-łapacz piany

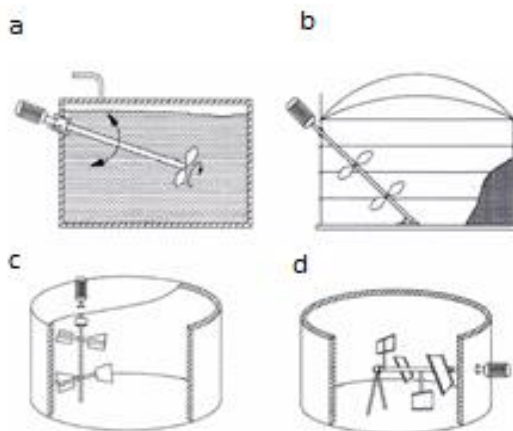
Źródło: [4]



Rys. 3. Sposób prowadzenia cyrkulacji osadów w komorze o kształcie elipsoidalnym: 1- komora WKF, 2-mieszadło śrubowe z napędem elektrycznym, 3- przewody doprowadzające podgrzany osad, 4-pompy osadowe, 5-inżektor, 6-wysoko sprawny wymiennik ciepła, 7-odprowadzanie kożucha, 8-regulacja poziomu osadu w komorze, 9 ujmowanie gazu, 10-łapacz piany

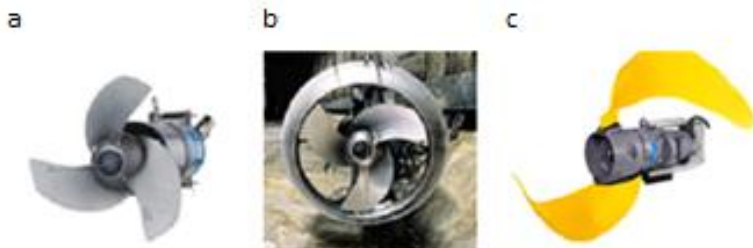
Źródło: [4]

pło i usuwają warstwy pływające. Często wykorzystywane są zatapialne mieszadła zapewniające idealne wymieszanie (np. Flygt 4600). Innym rodzajem mieszadeł są mieszadła bananowe, które są doskonałym rozwiązaniem posiadającym szerokie zastosowanie w mieszaniu [25]. Ponadto stosowane są również kompaktowe mieszadła, które bez trudu mieszają ciecze bardzo zanieczyszczone, bardzo lepkie, oraz ciecze zawierające materiały włókniste [24]. Substrat mieszany może być także przy pomocy mieszadeł zanurzeniowych jak i o długich osiach (rys. 6). Przykłady mieszadeł stosowanych podczas produkcji biogazu przedstawiono na rys. 7. Ułożenie mieszadeł w komorze fermentacyjnej może być bardzo różne. Spotykane są rozwiązania, że mieszadło umieszczone jest na dnie zbiornika, na jego ścianach lub pod różnymi kątami wewnątrz zbiornika (Rys. 8).



Rys. 6. Mieszadła o długich osiach w komorach fermentacji mokrej (a-d)

Źródło: [26]



Rys. 7. Przykłady zatapialnych mieszadeł: a, b – kompaktowe mieszadło, c- mieszadło bananowe

Źródło: [24-25]



Rys. 8. Umieszczenie mieszadeł zatapialnych w zbiorniku fermentacyjnym

Źródło: [24-25]

Oprócz mieszadeł zatapialnych coraz częściej stosowane są mieszadła pływające z dodatkową funkcją zatapiania kożucha. Rozwiązanie to zazwyczaj stosowane jest w przypadku awarii istniejących mieszadeł lub jako wspomagające rozwiązanie [27].

Podsumowanie

Rozwój technologii wpływa na powstawanie coraz to nowocześniejszych sposobów produkcji biogazu, a rozwiązania technologiczne stosowane do jego produkcji wciąż są udoskonalane.

Obecnie do produkcji biogazu wykorzystywana jest szeroka gama substratów, w zależności od ich lokalnej dostępności oraz podatności na proces fermentacji. Na rynku dostępne są różnorodne rozwiązania kształtów mieszadeł, zbiorników czy też sposobów prowadzenia cyrkulacji procesu. Jednakże wciąż poszukuje się innych rozwiązań pozwalających pozyskać efektywniej biogaz przy niskim koszcie wytwarzania i bezproblemowym przebiegu procesu.

Rozwiązania w zakresie produkcji biogazu i wytwarzania energii elektrycznej i ciepła wpisują się w działania proekologiczne zgodnie z polityką energetyczną Polski i jednocześnie pomagają rozwiązać problem z unieszkodliwianiem odpadów z różnych źródeł.

Literatura

- [1] Energia ze źródeł odnawialnych w 2009 roku, Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2010, [online], dostęp zdalny: www.stat.gov.pl, [data wejścia: 11.01.2017].
- [2] Arthur R., Baidoo M.F., Antwi E., *Biogas as a potential renewable energy source: A Ghanaian case study*, Renewable Energy, 2011, 36, s. 1510-1516.
- [3] Kwaśny J., Banach M., Kowalski Z., *Przegląd technologii produkcji biogazu różnego pochodzenia*, Czasopismo Techniczne, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2012, 2-Ch, Zeszyt 17, s. 83-102
- [4] Bień J. B., Wystalska K., *Osady ściekowe- teoria i praktyka*, Częstochowa 2011.
- [5] <http://agroenergetyka.pl/?a=article&id=532>, [data wejścia: 25.11.2017].
- [6] Kujawski O., *Przegląd technologii produkcji biogazu*, cz. I, Czysta Energia, 2009, 12.
- [7] *Biogaz – produkcja wykorzystanie*, Institut für Energetik und Umwelt gGmbH, Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft, [online], dostęp zdalny: http://ieo.pl/dokumenty/obszary_badan/Biogaz%20-%20Produkcja%20Wykorzystywanie.pdf, [data wejścia: 07.02.2017].
- [8] Sikora J., *Badanie efektywności produkcji biogazu z frakcji organicznej odpadów komunalnych zmieszanej z biomasą pochodzenia rolniczego*, Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich, 2012, 2/IV/, s. 89–98.
- [9] Pilarski K., Adamski M., *Perspektywy wytwarzania biogazu przy uwzględnieniu mechanizmów reakcji w zakresie ilościowej i jakościowej procesów fermentacji*, Journal of Research and Application in Agriculture Engineering, 2009, 54 (2), s. 81-86.
- [10] Oniszk-Popławska A., Zowsik M., Wiśniewski G., *Produkcja i wykorzystanie biogazu rolniczego*, EC BREC, Warszawa 2003, s. 25-35.
- [11] Fugol M., Szlachta J., *Analiza bazy surowcowej do produkcji biogazu w powiecie strzelińskim*, Inżynieria Rolnicza, 2009, 5 (114), s. 69-76.
- [12] Fugol M., Prask H., *Porównanie uzysku biogazu z trzech rodzajów kiszzonek: z kukurydzy, lucerny i trawy*, Inżynieria Rolnicza, 2011, 9 (134), s. 31-39.
- [13] Sałagan P., *Rozdrobnienie substratów wykorzystywanych do produkcji biogazu*, Inżynieria rolnicza, 2012, 2 (137), T. 2, s. 279-286 (<http://www.ptir.org>).
- [14] Matyka M., Książak J., *Plonowanie wybranych gatunków roślin, wykorzystywanych do produkcji biogazu*, Problemy inżynierii rolniczej, 2012, (I–III), 1 (75), s. 69–75.
- [15] Pawlak J., *Biogaz z rolnictwa – korzyści i bariery*, Problemy Inżynierii Rolniczej, 2013, (VII–IX), 3(81), s. 99–108.

-
- [16] Marczak H., *Aspekty energetycznego wykorzystania biogazu z odpadów na przykładzie województwa lubelskiego*, Inżynieria Ekologiczna, 2009, 21, s. 97-108.
- [17] <http://biogazowniawgminie.pl/artykuly/substraty-do-produkcji-biogazu-z-czego-produkowac-biogaz/>, [data wejścia: 11.01.2017]
- [18] Bilitewski B., Härdtle G., Marek K., *Podręcznik gospodarski odpadami – teoria i praktyka*, Wyd. I, Wydawnictwo Seidel-Przywecki, Warszawa 2003.
- [19] Bogdalski M. i in., *Wybrane procesy jednostkowe w inżynierii środowiska*, Wydawnictwo Politechnika Częstochowska, Częstochowa 2000
- [20] Głodek E., Kalinowski W., Janecka L., Werszler A., Garus T., Kościanowski J., *Pozyskiwanie i energetyczne wykorzystanie biogazu rolniczego*, Część I – proces technologiczny, Praca wykonana w ramach projektu nr Z/2.16/II/2.6/16/06, Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych, Opole 2007.
- [21] Głazczka A., Wardal W. J., Romaniuk W., Domasiewicz T., *Biogazownie rolnicze*, Monografia, MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa 2010.
- [22] <http://www.wolfsystem.pl/Zbiorniki-zelbetowe-i-silosy2/Zbiorniki-zelbetowe/Zbiorniki-dla-biogazowni>, [data wejścia: 07.02.2017]
- [23] Troniewski L., Palica M., Czernek K., *Przenoszenie pędu, ciepła i masy*, Część 1, Wyd. II., Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2012.
- [24] <http://www.xylemwatersolutions.com/scs/poland/pl/products/mieszadla/Flygt-4600-kompaktowe/Strony/mieszadla-Flygt-4600.aspx>, [data wejścia: 07.02.2017].
- [25] <http://www.xylemwatersolutions.com/scs/poland/pl/zastosowania/biogaz/Strony/Biogaz.aspx>, [data wejścia: 07.02.2017].
- [26] Kujawski O., Kujawski J., *Przegląd technologii produkcji biogazu*, Część druga, Czysta Energia, 2010, 101/1.
- [27] <http://www.grupakn.pl/products/56/wynajem-mieszadel-plywajacych>, [data wejścia: 07.02.2017].

mgr inż. Marta Wiśniewska¹⁾, Krystyna Lelicińska-Serafin²⁾

Politechnika Warszawska,

Wydział Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska

Katedra Ochrony i Kształtowania Środowiska

¹⁾ marta.wisniewska.89@wp.pl, ²⁾ krystyna.lelicinska@is.pw.edu.pl

BIOLOGICZNE PRZETWARZANIE ODPADÓW KOMUNALNYCH W PRZEDSIĘBIORSTWIE GOSPODARKI KOMUNALNEJ W PŁOŃSKU NA PRZYKŁADZIE ODPADÓW ODEBRANYCH Z OBSZARU GMINY BODZANÓW

Biological waste treatment in Municipal Services
Company in Płońsk based on the waste collected
in Bodzanów commune

Słowa kluczowe: biologiczne przetwarzanie, odpady komunalne

Keywords: biological waste treatment, municipal solid waste

Streszczenie:

Zakład mechaniczno – biologicznego przetwarzania odpadów w Poświętnem, należący do Przedsiębiorstwa Gospodarki Komunalnej w Płońsku posiada status regionalnej instalacji przetwarzania odpadów komunalnych odebranych z płockiego regionu gospodarki odpadami. Odpady komunalne, które są tam dostarczane poddawane są biologicznemu przetworzeniu. W przypadku zmieszanego strumienia odpadów, przed przetwarzaniem biologicznym następuje obróbka mechaniczna, której

celem jest przygotowanie odpadów do dalszych procesów. Biologicznemu przetwarzaniu poddawane są odpady ulegające biodegradacji gromadzone selektywnie oraz tzw. frakcja podsitowa, pochodząca ze zmieszanych odpadów komunalnych, która zawiera znaczne ilości odpadów ulegających biodegradacji. W zakładzie biologicznego przetwarzania frakcji podsitowej, odpadów zielonych oraz innych bioodpadów pochodzenia komunalnego przebiega w dwóch etapach. Pierwszy etap to faza intensywnych przemian, która zachodzi w reaktorach żelbetonowo – membranowych. Drugi etap to faza dojrzewania na otwartym terenie (placu przyzmuwym). Powstały stabilizat przekazywany jest na składowisko odpadów zlokalizowane w miejscowości Dalanówek. W niniejszej pracy przedstawiono bilans odpadów poddanych procesom odzysku oraz unieszkodliwiania wraz z uwzględnieniem ilości odpadów wytworzonych w wyniku tych działań w analizowanym przedsiębiorstwie w 2015 r. Zaprezentowano także system gromadzenia odpadów komunalnych na terenie gminy Bodzanów, należącej do płockiego regionu gospodarki odpadami, z podziałem na strumienie kierowane w dalszej kolejności do przetwarzania w PGK (zestawiono dane ilościowe oraz sposób zagospodarowania poszczególnych frakcji).

Wprowadzenie

Obserwowany w Polsce od kilku lat przełom związany z gospodarką odpadami jest wynikiem wytycznych zawartych m.in. w Dyrektywie Rady 99/31/WE z dnia 16 lipca 1999 r. w sprawie składowisk odpadów. Dyrektywa ta zobowiązuje Polskę do ograniczenia w kolejnych latach ilości odpadów ulegających biodegradacji przekazywanych do składowania w odniesieniu do masy tych odpadów wytworzonych w 1995 r. Do roku 2020 poziom ograniczenia odpadów ulegających biodegradacji przekazywanych do składowania powinien wynosić minimum 65% [1, 2].

Jedną z metod przetwarzania odpadów, które ulegają biodegradacji jest przetwarzanie biologiczne. Polega ono na zamierzonym użyciu procesów mikrobiologicznych przemiany materii w celu rozkładu bądź przekształcenia substancji organicznych, które zawarte są w odpadach. Biologicznemu przetwarzaniu poddawane są odpady ulegające biodegradacji gromadzone selektywnie oraz tzw. frakcja podsitowa, tj. frakcja o wielkości 0 – 80 mm, pochodząca ze zmieszanych odpadów komunalnych, która zawiera znaczne ilości odpadów ulegających biodegradacji [3].

Biologiczne przetwarzanie bioodpadów zebranych selektywnie pozwala na uzyskanie wysokiej jakości kompostu.

Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej w Płońsku – Zakład Zagospodarowania Odpadów

Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej z siedzibą w Płońsku jest właścicielem Zakładu Zagospodarowania Odpadów, który znajduje się w miejscowości Poświętne. Zakład ten wyposażony jest w instalację do mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów. Instalacja ta stanowi Regionalną Instalację Przetwarzania Odpadów Komunalnych (RIPOK) dla plockiego regionu gospodarki odpadami. Przyjmowane są zarówno zmieszane odpady komunalne jak i odpady zielone oraz inne bioodpady pochodzenia komunalnego.

Zakład Zagospodarowania Odpadów tworzy instalacja mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów oraz składowisko odpadów innych niż niebezpieczne i obojętne zlokalizowane w Dalanówku. Zgodnie z Wojewódzkim Planem Gospodarki Odpadami Województwa Mazowieckiego składowisko to pełni funkcję instalacji zastępczej dla plockiego regionu gospodarki odpadami [4].

Instalacja mechaniczno-biologicznego przetwarzania przeznaczona jest do odzysku oraz połączenia procesów odzysku i unieszkodliwiania odpadów kategorii inne niż niebezpieczne. Zdolność przetwarzania tej instalacji wynosi ponad 75 Mg na dobę z wykorzystaniem obróbki biologicznej. Instalacja od dnia 27 kwietnia 2016 r. funkcjonuje w oparciu o pozwolenie zintegrowane Marszałka Województwa Mazowieckiego. Wcześniej, tj. od 25 listopada 2009 r., działalność zakładu była prowadzona w oparciu o pozwolenie Starosty Płońskiego.

Instalacja w Poświętnem może być prowadzona, zależnie od potrzeb, w trojaki sposób:

- jako mechaniczno-biologiczne przetwarzanie zmieszanych odpadów komunalnych,
- jako mechaniczno-biologiczne przetwarzanie odpadów pochodzących z selektywnej zbiórki oznaczonych kodami z podgrup: 15 01, 20 01 i 20 03,
- jako biologiczne przetwarzanie odpadów zielonych oraz innych bioodpadów pochodzenia komunalnego [5].

Przygotowanie odpadów do przetwarzania biologicznego

W przypadku zmieszanych odpadów komunalnych, zanim trafią one do części biologicznej instalacji, muszą zostać poddane obróbce mechanicznej. W instalacji w Poświętnem jest ona realizowana w hali technologicznej sortowni. Znajduje się tam układ przygotowania oraz załadunku odpadów, tj.: rozrywarka worków, przenośnik kanałowy i przenośnik wznoszący, sześć kabin sortowniczych, trzy separatory optyczno-pneumatyczne, sito bębnowe trzyfrakcyjne, dwa separatory metali żelaznych, a także, automatyczna prasa belująca z perforatorem butelek.

Po przesianiu przez sito bębnowe frakcja 0-80 mm (tzw. frakcja podsitowa), która ze względu na dużą ilość odpadów ulegających biodegradacji traktowana jest jako frakcja przeznaczona do przetwarzania biologicznego, kierowana jest do sepa-

ratora metali żelaznych. Tak przygotowany strumień odpadów transportowany jest do części biologicznej instalacji.

W przypadku odpadów zielonych oraz innych bioodpadów pochodzenia komunalnego przetwarzanie biologiczne poprzedzone jest obróbką wstępną w postaci rozdrabniania gałęzi za pomocą rębaka [5].

Biologiczne przetwarzanie odpadów komunalnych

Proces biologicznego przetwarzania w Zakładzie Zagospodarowania Odpadów w Poświętnem zachodzi w dwóch etapach. Pierwsza faza to intensywne przetwarzanie, zaś drugi etap stanowi dojrzewanie biomasy na otwartym terenie.

Na instalację przetwarzania biologicznego odpadów składa się sześć reaktorów, w których zachodzi intensywna stabilizacja. Pięć z nich przeznaczonych jest dla frakcji 0-80 mm, a jeden – dla odpadów zielonych i innych bioodpadów pochodzenia komunalnego (odbywa się tu proces kompostowania). W sytuacji, gdy nie ma odpowiedniego strumienia odpadów biodegradowalnych pochodzących z selektywnej zbiórki odpadów, wszystkie reaktory wykorzystane są do przetwarzania frakcji podsitowej. Moc przerobowa biologicznego przetwarzania frakcji podsitowej (kod odpadu 19 12 12), która wydzielona została ze strumienia zmieszanych odpadów komunalnych wynosi 30 000 Mg/rok. W przypadku odpadów zielonych i innych bioodpadów pochodzenia komunalnego moc przerobowa dla ich biologicznego przetwarzania wynosi maksymalnie 3 000 Mg/rok.

Reaktory służące do intensywnej stabilizacji materiału wsadowego skonstruowane są w technologii BIODEGMA. Są to komory żelbetonowe, z których każda jest szerokości równej 6,5 m i długości – 21,4 m. Wysokość ścian komór wynosi 2 m, a ich grubość waha się w granicach od 0,25 do 0,30 m. Wysokość w kalenicy wynosi 3,8 m. Komory posiadają uchylne zadaszenie, a także wrota wjazdowe w konstrukcji stalowo-aluminiowej z pokryciem z membrany Goretm Laminats. Ponadto komory wyposażone są w izolację termiczną w postaci papy termozgrzewalnej. Wszystkie reaktory posadowione są na szczelnym podłożu betonowym. Każdy zaopatrzony jest w mechanizm ryglowania, który zostaje uruchomiony po zamknięciu skrzydeł dachu oraz wrót. Materiał wsadowy pozostaje w danym reaktorze do osiągnięcia parametru AT_4 na poziomie poniżej 20 mg O_2 /g suchej masy, tj. przez okres co najmniej dwóch tygodni. Parametr AT_4 ma za zadanie określenie stopnia stabilizacji odpadów. Wyraża on zapotrzebowanie na tlen przez poddaną badaniu próbkę odpadów w ciągu czterech dni. Parametr ten, to inaczej aktywność oddychania. Badania AT_4 przeprowadzane są na zlecenie zakładu przez akredytowane laboratorium zewnętrzne.

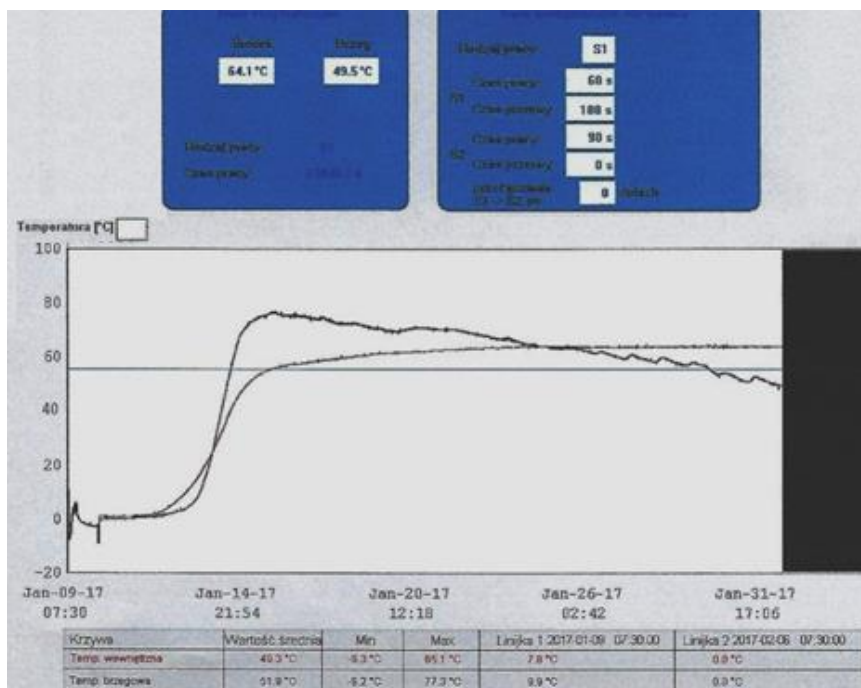
Moduły wyposażone są w system napowietrzania materiału wsadowego. System ten tworzą wentylatory (jeden wentylator przypada na jeden moduł), rozdzielacze powietrza, rurociągi podposadzkowe oraz kanały napowietrzania, które znajdują

się w posadzce po cztery w każdym reaktorze. Nawiew powietrza zachodzi od dołu poprzez kanały w systemie tłocznym. Strumień powietrza odprowadzany jest przez dach za pośrednictwem membrany. Jej zadaniem jest zapobieganie przedostawaniu się do atmosfery nieoczyszczonego powietrza procesowego.

Reaktory posiadają również system ujmowania odcieków, na który składają się kanały je odbierające. Kanały te, tak jak w przypadku kanałów napowietrzania umieszczone są po cztery w posadzce każdego z reaktorów. Ocieki trafiają do wewnętrznego systemu kanalizacji, a stamtąd do oczyszczalni ścieków, która również jest własnością Przedsiębiorstwa Gospodarki Komunalnej.

W razie zbyt dużego przesuszenia materiał wsadowy może być nawilżany. Służy temu system nawadniania zbudowany z rurociągów oraz dysz, które zamontowane są w kalenicy każdego reaktora. Ich zadaniem jest transport odcieków, wody opadowej bądź w razie potrzeby także wodociągowej.

Przez cały okres intensywnej obróbki materiału wsadowego (etap pierwszy biologicznego przetwarzania) prowadzony jest regularny pomiar jego temperatury wewnętrznej i brzegowej oraz wilgotności. Parametry te monitorowane są z kabiny sterowni. Na Rys. 1 przedstawiony został wykres temperatur wewnątrz pryzmy oraz na jej brzegu w jednym z reaktorów.



Rys. 1. Relacja temperatury wewnętrznej i brzegowej materiału wsadowego w reaktorze

Źródło: Zakład Zagospodarowania Odpadów w Poświętnem

Widoczny na zamieszczonym wykresie spadek temperatury brzegowej jest najprawdopodobniej wynikiem otwarcia wrót reaktora, a tym samym zderzenia z masami zimnego powietrza atmosferycznego.

W kolejnej fazie biologicznego przetwarzania odpady dojrzewają na placu dojrzewania (na otwartym terenie). Układane są w pryzmy o przekroju trapezowym o szerokości górnej podstawy równej ok. 2 m, dolnej podstawy – równej ok. 5 m, długości – ok. 20 m i wysokości równej 1,5 m. Plac dojrzewania może pomieścić maksymalnie trzydzieści cztery pryzmy frakcji podsitowej oraz cztery pryzmy odpadów zielonych i innych bioodpadów pochodzenia komunalnego.

W czasie dojrzewania przetwarzane odpady są przerzucane przy użyciu ładowarki kołowej raz na tydzień. Faza ta trwa ok. sześciu tygodni, aż do osiągnięcia parametru AT_4 na poziomie poniżej 10 mg O_2 /g suchej masy. Powstałe w procesie dojrzewania odcieki odprowadzane są przez wewnętrzny system kanalizacyjny.

Po zakończeniu procesu dojrzewania stabilizat przekazywany jest na składowisko odpadów bądź poddawany przetwarzaniu mechanicznemu – w postaci przesiania na sicie o wielkości oczek równej 20 mm i całkowitej mocy przerobowej 70 Mg/h (na placu technologicznym). Wydzielona w ten sposób frakcja drobna do końca 2015 r. przekazywana była na składowisko odpadów, znajdujące się w miejscowości Dalanówek na potrzeby jego rekultywacji (poddawana była w ten sposób odzyskowi). Frakcja nadsitowa również przekazywana była na składowisko, ale w celu jej unieszkodliwienia [5]. Obecnie odzysk frakcji poniżej 20 mm nie jest dopuszczony przepisami prawa, zatem dojrzały stabilizat w całości przewożony jest na składowisko odpadów i tam unieszkodliwiany poprzez składowanie (bez wcześniejszego mechanicznego przetwarzania).

W przypadku przetwarzania odpadów zielonych i innych bioodpadów pochodzenia komunalnego proces dojrzewania kompostu na placu dojrzewania trwa ok. trzech tygodni. Tak wytworzony produkt (w zależności od jego jakości) traktowany jest jako kompost spełniający wymagania dla nawozów, środków wspomagających uprawę roślin lub jako odpad oznaczony kodem 19 05 03, który przeznaczony jest do przetwarzania metodą R10 [5]. Zgodnie z załącznikiem nr 1 do ustawy o odpadach (Dz. U. 2013 r., poz. 21, z późn. zm.) przetwarzanie metodą R10 polega na obróbce przeprowadzanej na powierzchni ziemi, która korzystnie wpływa dla rolnictwa bądź powoduje poprawę stanu środowiska [6].

W 2015 r. biologiczne przetwarzanie odbywało się bez podziału na frakcję podsitową (pochodzącą ze zmieszanego strumienia odpadów) oraz odpady ulegające biodegradacji pochodzące z selektywnej zbiórki – tzn. wszystkie te odpady przetwarzane były wspólnie, w tych samych bioreaktorach. Miało to znaczący wpływ na rodzaj i jakość powstałych produktów – nie uzyskiwano wysokiej jakości kompostu, który mógłby być stosowany do użyźniania gleb. Tego rodzaju nawóz może

być wytwarzany wyłącznie z odpadów ulegających biodegradacji gromadzonych selektywnie.

Charakterystyka gminy Bodzanów – system gromadzenia odpadów komunalnych

Gmina Bodzanów zlokalizowana jest w odległości 30 km od miasta Płock i należy do powiatu płockiego. Położona jest w środkowo-zachodniej części województwa mazowieckiego. Gmina Bodzanów zajmuje łączną powierzchnię 137 km² i liczy 8379 mieszkańców (stan z dnia 31.12.2015 r.). Jest gminą wiejską, na terenie której nie występują zakłady przemysłowe, które w znaczący sposób wpływałyby na środowisko. Zgodnie z Wojewódzkim Planem Gospodarki Odpadami Województwa Mazowieckiego gmina ta należy do płockiego regionu gospodarki odpadami [4].

W dniu 1.07.2013 r. na terenie gminy Bodzanów został wdrożony nowy system gospodarowania odpadami komunalnymi, wynikający ze znowelizowanej ustawy o utrzymaniu czystości i porządku w gminach (Dz. U. 2005, Nr 236, poz. 2008, z późn. zm.) [7]. Według tego systemu właściciel danej nieruchomości może sam decydować o sposobie gromadzenia wytworzonych na tej nieruchomości odpadów komunalnych. Mogą być one gromadzone w sposób selektywny (segregacja „u źródła”) lub jako strumień zmieszany, choć oczywiście selektywna zbiórka jest rozwiązaniem rekomendowanym. Ponadto na terenie gminy funkcjonują dwa Punkty Selektywnej Zbiórki Odpadów Komunalnych (PSZOK-i), do których mieszkańcy mają możliwość przekazywania takich frakcji odpadów komunalnych jak: papier, tworzywa sztuczne, szkło, metale, opakowania wielomateriałowe, odpady zielone i inne odpady ulegające biodegradacji, meble i inne odpady wielkogabarytowe, odpady budowlane i rozbiórkowe, zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny, baterie i akumulatory, opony, leki, jak również popiół. Takie odpady jak zużyty sprzęt elektryczny i elektroniczny, a także odpady wielkogabarytowe są również odbierane w formie zbiórki mobilnej dwa razy do roku zgodnie z ustalonym harmonogramem. Zbiórka zużytych baterii odbywa się także we wszystkich placówkach oświatowych na terenie gminy.

Na koniec 2015 r. aż 6933 osoby zadeklarowały gromadzenie odpadów w sposób selektywny, zaś w sposób zmieszany tylko 491 [4].

Odpady komunalne odebrane z terenu gminy Bodzanów

W 2015 r. z terenu gminy Bodzanów odebrano łącznie 1820,8 Mg odpadów komunalnych, z czego do Zakładu Zagospodarowania Odpadów w Poświętnem trafiło 1077,3 Mg. Niesegregowane (zmieszane) odpady komunalne stanowiły 1073,8 Mg, zaś pozostałe 3,5 Mg to odpady wielkogabarytowe. Odpady zmieszane poddane zostały w pierwszej kolejności obróbce mechanicznej, a po wyodrębnieniu wszystkich użytecznych frakcji, obróbce biologicznej. Po zakończeniu procesu biologicznego powstały stabilizat przesiewany był przez sito mobilne o szerokości oczek równej 20 mm. Frakcja podsitowa wykorzystana została do rekultywacji zamkniętej kwatery składowiska znajdującego się w miejscowości Dalanówek, którego podmiotem zarządzającym również jest Przedsiębiorstwo Gospodarki Komunalnej. Frakcja nadsitowa przekazana została na składowisko odpadów w Dalanówku – jako odpad wytworzony przez w/w przedsiębiorstwo, a jego masa nie jest rozliczana indywidualnie dla obsługiwanych gmin. Sprawozdania roczne z realizacji zadań z zakresu gospodarowania odpadami komunalnymi informują tylko o ilości odpadów ulegających biodegradacji, które trafiają na składowisko. W 2015 r. odpady te nie zostały poddane procesowi składowania [8].

Bilans odpadów poddanych biologicznemu przetwarzaniu

W tabeli nr 1 przedstawiono bilans odpadów komunalnych, które zostały przekazane do biologicznego przetwarzania w Zakładzie Zagospodarowania Odpadów w Poświętnem oraz odpadów tam wytworzonych.

Tabela 1. Bilans odpadów przekazanych do biologicznego przetwarzania

Proces, któremu poddane zostały odpady	Odpady poddane procesowi przetwarzania w roku 2015			Odpady powstające podczas procesu przetwarzania w roku 2015		
	Kod odpadów	Rodzaj odpadów	Masa odpadów [Mg]	Kod odpadów	Rodzaj odpadów	Masa odpadów [Mg]
R3 Biologiczne przetwarzanie	19 12 12	Inne odpady z mechanicznej obróbki (frakcja 0-80 mm)	28 579,3	19 05 99	Inne nie wymienione odpady	20 997,2
	20 02 01	Odpady ulegające biodegradacji	441,8	Odpady nie są wytwarzane – produkcja kompostu		
R12 Przesiewanie w sicie mobilnym	19 05 99	Inne nie wymienione odpady	15 680,4	19 05 01	Nieprzekompostowane frakcje odpadów komunalnych	4 750,8
				19 05 03	Kompost nieodpowiadający wymaganiom	10 926,6

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych pochodzących z Zakładu Zagospodarowania Odpadów w Poświętnem

Z bilansu wynika, iż procesowi oznaczonemu symbolem R3 (biologiczne przetwarzanie) poddano 29 021,1 Mg odpadów. Po procesie uzyskano 20 997,2 Mg stabilizatu oraz kompost. Bilansując powyższe masy można stwierdzić, że w wyniku procesu biologicznego przetwarzania frakcji podsitowej pochodzącej ze zmieszanych odpadów komunalnych uzyskano ubytek masy na poziomie około 27%, co jest zgodne z doniesieniami literaturowymi w tym zakresie [3].

W 2015 r. odpady oznaczone kodem 19 05 99 określone jako: „inne nie wymienione odpady” w ilości równej 15 680,4 Mg przesiano przez sito mobilne o wielkości oczek 20 mm. Frakcja podsitowa oznaczona kodem 19 05 03 (kompost nieodpowiadający wymaganiom) w ilości równej 10 926,6 Mg (co stanowiło około 70% stabilizatu) przeznaczona została na potrzeby rekultywacji zamkniętej kwatery składowiska w Dalanówku. Należy podkreślić, iż na takie działanie pozwalało rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 września 2012 roku w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych (Dz. U. 2012 poz. 1052) [9], które zostało uchylone 24 stycznia 2016 r. W związku z tym w 2016 r. już cały stabilizat trafił na składowisko odpadów, gdzie został poddany dalszemu unieszkodliwianiu.

Podsumowanie i wnioski

W powyższym artykule szczególną uwagę zwrócono na jedną z technologii przetwarzania odpadów komunalnych – mechaniczno-biologicznego przetwarzania. Dokonano bilansu odpadów poddanych biologicznemu przetwarzaniu na terenie Zakładu Zagospodarowania Odpadów w Poświętnem w 2015 r., jak również bilansu odpadów tam wytworzonych. Ponadto przeanalizowano system gromadzenia odpadów komunalnych w jednej z gmin województwa mazowieckiego – w gminie Bodzanów, która jest obsługiwana przez w/w zakład.

W 2015 r. aż 6933 osoby wytwarzające odpady komunalne na terenie gminy Bodzanów zadeklarowały ich zbieranie w sposób selektywny, co stanowi ponad 90% wszystkich deklaracji. Z danych sprawozdawczych wynika jednak, iż odpady gromadzone selektywnie stanowiły w tym okresie ok. 20% wszystkich odebranych odpadów komunalnych z tego rejonu. Zatem nie wszyscy mieszkańcy wywiązują się ze swoich deklaracji, a władze samorządowe powinny dołożyć wszelkich starań, aby rozszerzyć edukację w zakresie gospodarki odpadami.

Jako bardzo pozytywne zjawisko należy wymienić natomiast fakt, iż odpady ulegające biodegradacji pochodzące z odpadów komunalnych wytwarzanych w gminie Bodzanów nie są poddawane składowaniu (potwierdzają to dane z 2015 r.).

Analiza danych pochodzących z Zakładu Zagospodarowania Odpadów w Poświętnem wskazuje na jego prawidłowe działanie.

Wprowadzenie w 2016 r. oddzielnego przetwarzania frakcji podsitowej pochodzącej ze zmieszanego strumienia odpadów komunalnych oraz odpadów ulegających biodegradacji gromadzonych selektywnie (w odrębnych bioreaktorach), należy uznać za bardzo prawidłowe rozwiązanie technologiczne, które daje możliwość produkowania wysokiej jakości nawozu organicznego w postaci kompostu (z odpadów biodegradowalnych gromadzonych selektywnie), a tym samym unikania wytwarzania odpadów minimalizacji ich powstawania oraz wykorzystywania odpadów jako zasobów. Są to działania rekomendowane w ramach zalecanego przez Komisję Europejską pakietu dotyczącego gospodarki w obiegu zamkniętym. To rozwiązanie technologiczne jest tym bardziej słuszne, iż zgodnie z pakietem dotyczącym gospodarki o obiegu zamkniętym, instalacje MBP i inne instalacje dla strumienia odpadów komunalnych będą zmieniały swoje przeznaczenie – na instalacje doczyszczające odpady selektywnie zbierane, a część biologiczna będzie przeznaczona dla odpadów zielonych i innych ulegających biodegradacji [2].

W wyniku procesu biologicznego przetwarzania frakcji podsitowej pochodzącej ze zmieszanych odpadów komunalnych w Zakładzie Zagospodarowania Odpadów w Poświętnem uzyskuje się ubytek masy na poziomie około 27%, co jest zgodne z doniesieniami literaturowymi w tym zakresie [3] i wskazuje na prawidłowe prowadzenie procesu technologicznego.

W 2015 r. znaczną część stabilizatu wytwarzanego w tym procesie wykorzystywano na składowisku w celach rekultywacyjnych. Aktualnie przepisy prawa nie przewidują takich działań.

System zbiórki odpadów komunalnych realizowany w gminie Bodzanów umożliwia skierowanie części wyodrębnionych w ten sposób odpadów do biologicznego przetwarzania – do stabilizacji, a następnie składowania (zmieszany strumień odpadów) oraz do kompostowania (odpady ulegające biodegradacji gromadzone selektywnie). Władze samorządowe gminy powinny rozszerzyć edukację ekologiczną w zakresie gospodarki odpadami tak, aby więcej mieszkańców włączało się w selektywną zbiórkę odpadów komunalnych, ze szczególnym uwzględnieniem frakcji ulegającej biodegradacji, a nie jedynie ją deklarowało.

Literatura

- [1] Dyrektywa 99/31/WE Rady z dnia 26 kwietnia 1999 r. w sprawie składowania odpadów.
- [2] Uchwała Rady Ministrów z dnia 11 sierpnia 2016 r. w sprawie Krajowego planu gospodarki odpadami 2022 (M. P. Nr 88, poz. 784).
- [3] Jędrczak A., *Biologiczne przetwarzanie odpadów*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2007, s. 1, 261.
- [4] Wojewódzki Plan Gospodarki Odpadami Województwa Mazowieckiego na lata 2012-2017 z uwzględnieniem lat 2018-2023 (nieobowiązujący), Warszawa 2012.
- [5] Marszałek Województwa Mazowieckiego, *Decyzja Nr 58/16/PZ.Z*, Warszawa 2016.
- [6] Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz. U. 2013 r. poz. 21, z późn. zm.).
- [7] Ustawa z dnia 13 września 1996 roku o utrzymaniu czystości i porządku w gminach (Dz. U. 2005 r., Nr 236, poz. 2008, z późn. zm.).
- [8] Zygmuntowicz-Szulecka A., *Sprawozdanie wójta, burmistrza lub prezydenta z zakresu gospodarowania odpadami komunalnymi za rok 2015*, Bodzanów 2016.
- [9] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 11 września 2012 roku w sprawie mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów komunalnych (Dz. U. 2012 poz. 1052).

mgr inż. Anna Żywicka¹⁾, dr hab. inż. Karol Fijałkowski²⁾
Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie
Wydział Biotechnologii i Hodowli Zwierząt
Katedra Immunologii, Mikrobiologii i Chemii Fizjologicznej
¹⁾anna.zywicka@zut.edu.pl

ANTYBAKTERYJNE I ANTYADHEZYJNE WŁAŚCIWOŚCI STOPÓW METALI O RÓŻNYM SKŁADZIE PIERWIASTKOWYM

Antibacterial and antiadhesive properties of metal
alloys with different chemical composition

Słowa kluczowe: adhezja, biofilm, właściwości antybakteryjne, metale, biokorozja
Keywords: adhesion, biofilm, antibacterial properties, metals, bio-corrosion

Streszczenie:

Adhezja jest to zdolność przylegania bakterii do powierzchni abiotycznych oraz biotycznych i stanowi pierwszy etap tworzenia biofilmu. Duże zainteresowanie procesem adhezji bakterii do powierzchni metali wynika z ekonomicznych, ekologicznych i zdrowotnych negatywnych skutków niekontrolowanej aktywności drobnoustrojów. Biorąc pod uwagę trudności związane z usunięciem biofilmu oraz negatywne skutki jego występowania, zapobieganie adhezji bakterii do powierzchni stałych wydaje się najlepszą strategią. We współczesnej inżynierii coraz częściej poszukuje się, materiałów które wykazują właściwości antyadhezyjne wobec bakterii chorobotwórczych. Antybakteryjne działanie czystych metali np. srebra, cynku czy miedzi jest znana od dawna i potwierdzona przez wielu autorów. Jednak, w porównaniu do czystych metali, stopy metali wykazują większą wytrzymałość mechaniczną.

na, wszechstronność oraz odporność na uszkodzenia i korozję. Dlatego, też z ekonomicznego punktu widzenia w przemyśle powszechnie wykorzystuje się stopy metali oraz materiały kompozytowe. Oprócz korzystnych cech technologicznych mogą one wykazywać właściwości antyadhezyjne i antibakteryjne. Wykorzystanie w medycynie oraz w przemyśle metali o właściwościach antyadhezyjnych oraz antibakteryjnych może ograniczyć lub nawet zapobiegać negatywnym skutkom adhezji bakteryjnej.

Wstęp

Większość bakterii posiada zdolność do adhezji (przylegania) do powierzchni biotycznych i abiotycznych [1]. Rezultatem adhezji jest agregacja bakterii i tworzenie biofilmu. Według Sorys i wsp. [39], biofilm jest przestrzenną strukturą złożoną z kolonii bakteryjnych umiejscowionych w masie zewnątrzkomórkowych polimerów, wykazujących zdolność przylegania do powierzchni oraz do siebie nawzajem. Biofilm jest jedną z podstawowych form bytowania mikroorganizmów [45].

Zarówno proces adhezji jak i tworzenia biofilmu stanowi mechanizm obronny, który pozwala stworzyć strukturę chroniącą bakterie przed zmiennymi, niekorzystnymi warunkami środowiska czy też substancjami antibakteryjnymi [39, 45]. Zewnątrzkomórkowe substancje polimerowe (Extracellular Polymeric Substances - EPS), wytwarzane przez bakterie, w głównej mierze wpływają na oporność biofilmu na antybiotyki i substancje przeciwdrobnoustrojowe [26]. Substancje te stanowią około 97% całego biofilmu, silnie łączą i spajają całą strukturę, co utrudnia penetrację środków antibakteryjnych do wnętrza biofilmu [15, 47]. Dodatkowo, biofilm stanowi strukturę bardzo zróżnicowaną pod względem gatunkowym, a bakterie wchodzące w jego skład rzadko ulegają podziałom i mają spowolniony metabolizm [21, 45].

Poznanie zjawiska adhezji bakteryjnej i jej wpływu na zdrowie publiczne oraz przemysł stało się powodem do poszukiwania materiałów o zwiększonej odporności na destrukcyjne działanie drobnoustrojów. Dodatkowo, biorąc pod uwagę fakt, że biofilm stanowi strukturę bardzo trudną do usunięcia, uzasadnionym jest poszukiwanie metod, które mogłyby ograniczyć lub całkowicie zapobiegać adhezji bakterii do powierzchni stałych. Z tego względu, we współczesnej inżynierii coraz częściej poszukuje się materiałów, w tym metali i ich stopów, które wykazują właściwości antyadhezyjne oraz antibakteryjne wobec mikroorganizmów.

Negatywne skutki występowania biofilmu

Medycyna

Zdolność przylegania bakterii chorobotwórczych do powierzchni wszczepionych biomateriałów odgrywa istotną rolę w patogenezie zakażeń wewnątrzszpitalnych. Adhezja bakterii do powierzchni biomateriałów, takich jak: protezy czy implanty, to pierwszy etap prowadzący do infekcji [26, 27]. Od 65% do nawet 80% wszystkich zakażeń wewnątrzszpitalnych jest wynikiem adhezji bakterii chorobotwórczych i tworzenia się biofilmu na powierzchniach biomateriałów [8]. Drobnoustroje, które najczęściej są przyczyną takich zakażeń to m.in.: *Staphylococcus epidermidis*, *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Escherichia coli*, *Streptococcus* spp. i *Candida* spp. [8, 9, 26, 45].

Tworzenie biofilmu na biomateriałach stanowi główną przeszkodę na drodze do długoterminowego korzystania z wszczepionych do organizmu urządzeń. Bakterie wchodzące w skład biofilmu są odporne na terapie antybiotykowe, jak i mechanizmy odpornościowe organizmu [9, 34, 45]. Zakażenia wywołane przez adhezję bakterii do biomateriałów są szczególnie niebezpieczne dla pacjenta, gdyż mają one najczęściej charakter przewlekły [27].

Tworzenie biofilmu na biomateriałach stanowi problem nie tylko w dziedzinie chirurgii, ale również w stomatologii. Tworzący się na aparatach ortodontycznych i protezach biofilm może przyczyniać się do demineralizacji szkliwa oraz chorób dziąseł [40].

Przemysł

Aktywne metabolicznie bakterie, tworzące biofilm na powierzchniach metalowych, wytwarzają zewnątrzkomórkowe metabolity, takie jak enzymy, polimery, kwasy pozakomórkowe, wywołując biokorozję – Microbiologically Influenced Corrosion (MIC) [1]. Jak podaje Sałek [30], biokorozja jest to proces korozyjny na powierzchni metali, wynikający z obecności drobnoustrojów i zachodzących w nich przemian metabolicznych. Różnorodność gatunkowa biofilmu sprzyja rozwojowi mikroorganizmów beztlenowych mających zdolność do utleniania jonów metali [45]. Bakterie redukujące siarczany (sulfate-reducing bacteria – SRB) są bakteriami najczęściej wywołującymi biokorozję [30]. Oprócz kwasu siarkowego, bakterie te mogą produkować zewnątrzkomórkowo kwasy organiczne (octowy, izo-masłowy, bursztynowy) oraz nieorganiczne (węglowy i azotowy). Powstające osady korozyjne stanowią doskonałe środowisko do rozwoju większych powierzchni biofilmu [29, 39].

Jak podają Flemming i wsp. [11], adhezja drobnoustrojów do powierzchni metalowych prowadzi do m.in. korozji powierzchni konstrukcji metalowych, wżer, ubytków, kruszenia, przebarwień, powstawania osadów, osłabienia wytrzymałości, co wiąże się z ogromnymi stratami finansowymi. Według Sałek [30], metale, które są używane do budowy systemów wodnych, są najbardziej narażone na zjawisko korozji oraz biokorozji. Biokorozja może dotyczyć wszystkich konstrukcji metalowych mających kontakt z wodą, tj. rurociągów, instalacji hydrotechnicznych, zbrojeń budowlanych [7]. Do metali, które najczęściej ulegają biokorozji należą m.in. żelazo, miedź, glin, cynk oraz stal [30].

Ze względu na zwiększoną odporność na chlorowanie, przyczepność bakterii chorobotwórczych do powierzchni metali może prowadzić do skażenia mikrobiologicznego, szczególnie w systemach dystrybucji wody [16, 17]. Adhezja bakterii i ich niekontrolowane namnażanie się, szczególnie bakterii z rodzaju *Legionella*, w instalacjach sieci wodociągowych, klimatyzacyjnych i w innych urządzeniach wytwarzających aerozol wodno-powietrzny może stanowić poważne zagrożenie dla zdrowia [16, 30]. Dodatkowo, biofilm w systemach klimatyzacyjnych i chłodniczych hamuje szybkość przepływu wody i zmniejsza wydajność procesu chłodzenia, co prowadzi do znacznych strat ekonomicznych [11, 16, 30].

Adhezja bakterii chorobotwórczych do powierzchni metalowych stanowi problem dla wielu zakładów przemysłowych, między innymi dla przemysłu browarniczego [30]. Zważywszy na odporność bakterii wchodzących w skład biofilmu na niskie pH (3,8 – 4,7) oraz etanol, istnieje ryzyko obecności bakterii w produkcie końcowym. Problem związany z przyleganiem bakterii do powierzchni metalowych pojawia się również w zakładach przemysłu spożywczego w kontekście higieny żywności [17]. Adhezja bakterii do powierzchni metalowych kontaktujących się z żywnością podczas procesu produkcyjnego, może prowadzić do skażenia drobnoustrojami chorobotwórczymi [8, 17]. Jak podają Kumar i Anand [17], w przemyśle mleczarskim przyleganie bakterii jest uważane za główne źródło skażenia mleka i przetworów mlecznych.

Adhezja mikroorganizmów do powierzchni metali stanowi również problem dla przemysłu stoczniowego. Obok biofilmu negatywnym zjawiskiem związanym z przyleganiem drobnoustrojów jest biofouling [1]. Jednak w tym przypadku, do powierzchni mających kontakt z wodą przylegają nie tylko bakterie, ale również rośliny, glony i / lub zwierzęta. Według Bakker i wsp. [1], tworzenie się tego rodzaju struktur na kadłubach statków zwiększa opory tarcia wody i zużycie paliwa nawet o 20%. Czynniki korodujące wytwarzane przez bakterie mogą nawet uszkadzać powierzchnię statku.

Mechanizm działania jonów metali

Wiele metali ciężkich (np. żelazo, miedź, cynk, mangan, srebro) zaliczanych jest do grupy tzw. pierwiastków śladowych, niezbędnych do wzrostu i prawidłowego przebiegu metabolizmu komórkowego [32, 42]. Jednak w zbyt wysokich stężeniach jony metali oddziałują toksycznie nie tylko na komórki organizmów wyższych, ale także hamują aktywność metaboliczną większości mikroorganizmów [45]. Antybakteryjne właściwości metali są wykorzystywane przez człowieka już od starożytności, jednak mechanizmy wpływające na destrukcyjne działanie metali względem mikroorganizmów nie zostały jak dotąd wyjaśnione [42].

Niektóre doniesienia sugerują, że jony metali wiążą się z DNA powodując uszkodzenia komórek i ich śmierć [42]. Yasuyuki i wsp. [45], analizując antybakteryjne właściwości dziewięciu czystych metali na *S. aureus* i *Escherichia coli* zaobserwowali, że gromadzone w komórkach jony metali podczas inkubacji, powodowały zakłócenia w budowie ściany komórkowej, a następnie jej pękanie i rozpad składników komórkowych. Faúndez i wsp. [10], podają, że toksyczne działanie metali polega na blokowaniu grup funkcyjnych białek, inaktywacji enzymów, produkcji wolnych rodników, co wpływa na zmiany integralności błon biologicznych.

Varkey [42] analizował właściwości antybakteryjne metali z różnych grup układu okresowego. Wykazał on, że miedź, srebro oraz cynk z grupy I i II układu okresowego wykazują najsilniejsze właściwości antybakteryjne, w porównaniu do aluminium z grupy III czy cyny oraz krzemu z grupy IV. Autor sugeruje, że aktywność antybakteryjna metali zależy od grupy funkcyjnej do jakiej metal należy w układzie okresowym pierwiastków. To jakie jony metali mają działanie bójcze wobec bakterii zależy także od fizykochemicznych interakcji jonów z błoną komórkową oraz od szybkości przenikania jonów do roztworu [19]. Toksyczność i właściwości antybakteryjne jonów metali zależą również od ich rozpuszczalności w roztworach [45].

Bakterie Gram-ujemne i Gram-dodatnie wykazują różne poziomy tolerancji wobec jonów metali, co może być związane z różnicami w strukturze ściany komórkowej tych grup mikroorganizmów. Ze względu na cieńszą warstwę peptydoglikanu w ścianie komórkowej bakterie Gram-ujemne są bardziej wrażliwe na toksyczne działanie jonów metali [45]. Bakterie Gram-dodatnie mogą wykazywać większy stopień przylegania do metali i mniejszą wrażliwość na ich działanie bakteriobójcze.

Drobnoustroje występujące w środowisku naturalnym, posiadają zdolność przystosowywania się do zmieniających się i niekorzystnych warunków otoczenia. Proces adhezji bakterii do powierzchni stałych i rozwój biofilmu jest jednym z mechanizmów obronnych i strategią przetrwania, wykorzystywaną przez praktycznie wszystkie bakterie [45]. Przekroczenie stężenia progowego jonów metali w środowisku działa toksycznie na drobnoustroje jednak z drugiej strony, niesprzyjające

warunki środowiska np. zwiększone stężenie jonów metali w środowisku, determinuje komórki do poszukiwania schronienia, jakim w tym przypadku może być biofilm [3, 45]. Jak podają Białas i wsp. [3] niewystarczająca dostępność składników pokarmowych w środowisku stwarza warunki stresowe dla mikroorganizmów i sprzyja procesowi adhezji drobnoustrojów do powierzchniach stałych. Według tych samych Autorów w warunkach głodowych bądź stresu środowiskowego wzrasta intensywność syntezy egzogennej białek oraz polisacharydów zewnątrzkomórkowych, co z kolei prowadzi do intensywnej agregacji komórek na powierzchniach stałych. Dodatkowo, obecność wysokich stężeń jonów metali w środowisku promuje rozwój mikroorganizmów posiadających genetyczne uwarunkowania odporności na określone metale [9, 27].

Antyadhezyjne i antybakteryjne właściwości metali

Czyste metale

Powszechnie znanym metalem o właściwościach antybakteryjnych jest miedź, co zostało potwierdzone przez wielu autorów [20, 31, 32, 42]. Jony miedzi są niezbędne do prawidłowego funkcjonowania żywych organizmów, ponieważ stanowią kofaktory dla metaloprotein oraz wielu enzymów [45]. Jednak, w dużych stężeniach jony miedzi mają toksyczne działanie, przez co hamują wzrost większości mikroorganizmów [31]. Miedź wykazuje działanie bakteriobójcze wobec wielu gatunków bakterii, m.in.: *E. coli* O157, *S. aureus*, *Salmonella enterica*, *Campylobacter jejuni*, *Clostridium difficile* oraz *Mycobacterium tuberculosis* [10, 43, 44, 45].

Żelazo jest również niezbędnym kofaktorem w wielu przemianach biochemicznych zarówno dla organizmów eukariotycznych, jak i prokariotycznych. Dowiedziono, że żelazo wpływa na ograniczenie wzrostu komórek bakteryjnych, mimo że nie wykazuje działania antybakteryjnego [41]. Jak podają Zięba i wsp. [48] w dezynfekcji żelazo jest stosowane jako katalizator aktywujący nadtlenek wodoru, który jest skutecznym i silnym utleniaczem hamującym wzrost bakterii i innych drobnoustrojów. Działanie dezynfekcyjne żelaza jako pierwiastka przeciwbakteryjnego jest zatem pośrednie, wspomagające działanie innych substancji antybakteryjnych. W medycynie stosuje się leki oparte na chelatorach żelaza w walce z chorobami bakteryjnymi, szczególnie w przypadku, gdy zastosowanie antybiotyków jest niemożliwe [41]. Z badań przeprowadzonych przez Thompsona i wsp. [41], wynika, że chelatory żelaza, hamują wzrost *Acinetobacter baumannii*, *P. aeruginosa* oraz *E. coli*.

Cynk również posiada właściwości przeciwbakteryjne, co zostało potwierdzone przez wielu autorów [5, 31, 45]. Dowiedziono, że tlenek cynku (ZnO) wykazuje

aktywność antybakteryjną i może zmniejszyć stopień przylegania bakterii do powierzchni biomedycznych [5]. Aktywność przeciwbakteryjna ZnO została potwierdzona względem wielu bakterii, np. *S. aureus*, *Vibrio cholera*, bakterii z rodzaju *Shigella* i *Salmonella*, a także enteropatogennych szczepów *E. coli* [45].

Páez i wsp. [23], oraz Shanker i wsp. [35], potwierdzili antybakteryjne właściwości chromu. Autorzy ci wykazali, że chrom w warunkach *in vitro* ma działanie bakteriobójcze wobec bakterii Gram-dodatnich (*Bacillus subtilis*, *S. aureus*) i Gram-ujemnych (*E. coli*, *Klebsiella pneumoniae*). Shanker i wsp. [35], wykazali również, że związki chromu posiadają większą aktywność przeciwbakteryjną wobec badanych bakterii niż antybiotyki, takie jak streptomycyna i ampicylina. Według Páez i in. [23], stosowanie chromu w nowoczesnej metalurgii i inżynierii materiałowej może pomóc w zapobieganiu adhezji bakterii i tworzenia biofilmu.

Duży potencjał antyadhezyjny i antybakteryjny przypisuje się jonom srebra. Ze względu na niską toksyczność dla organizmu ludzkiego srebro znajduje szerokie zastosowanie w medycynie np. w preparatach do gojenia ran oraz kosmetologii [14, 24, 37]. Srebro stosuje się również do dezynfekcji wody w basenach i szpitalach, w filtrach do dezynfekcji powietrza i powierzchni sanitarnych [42]. Dowiedziono, że w próbach wody wzbogaconej w jony miedzi i srebra następuje nawet 30% redukcja bakterii i grzybów z rodzajów *Cladosporium*, *Penicillium*, *Aspergillus* i *Fusarium* [24, 37]. Według Yokota i wsp. [46], skuteczność przeciwbakteryjna jonów srebra są kilkaset razy silniejsza niż w przypadku jonów miedzi czy niklu. Autorzy ci, podają, że wynika to z szybkości przenikania jonów srebra przez błony komórkowe drobnoustrojów.

Jak dotąd, zostały również potwierdzone antybakteryjne właściwości m.in. kobaltu, niklu, cyrkonu, molibdenu i ołowiu wobec bakterii Gram-dodatnich (*S. aureus*), Gram-ujemnych (*E. coli*, *Pseudomonas putida*), oraz drożdży (*Candida albicans*, *Candida tropicalis*) [38, 42, 45].

Stopy metali

Stop jest mieszaniną jednorodną metali stopionych w odpowiedniej proporcji. Stopy różnią się właściwościami fizycznymi i chemicznymi od pierwiastków wchodzących w ich skład. Ich właściwości fizyczne, np. twardość, odporność na korozję, przewodnictwo cieplne i elektryczne są zazwyczaj lepsze, co z ekonomicznego punktu widzenia, uzasadnia użycie stopów zamiast czystych metali. W przemyśle najczęściej wykorzystuje się stopy metali, w których skład wchodzi przede wszystkim: miedź, żelazo, cynk, chrom, nikiel [26, 27]. Wszechstronne zastosowanie tych pierwiastków w wielu gałęziach przemysłu wynika głównie z faktu, że są łatwo dostępne, tanie oraz odporne na korozję.

Skład pierwiastkowy stopów metali wpływa nie tylko na ich właściwości fizykochemiczne i technologiczne, ale również może w zasadniczy sposób determino-

wać właściwości antybakteryjne stopów metali. Dodatkowo, łączenie różnych metali czy innych materiałów kompozytowych daje szansę na uzyskanie nowych materiałów o optymalnych parametrach fizykochemicznych oraz właściwościach antybakteryjnych i antyadhezyjnych.

Stopy miedzi należą do najpowszechniej wykorzystywanych w przemyśle stopów. Miedź w czystej postaci jest miękka i niewytrzymała, dodatkowo łatwo matowieje. Jednak, łączenie miedzi z niklem, cyną czy innymi składnikami stopowymi eliminuje te ograniczenia a dodatkowo pozwala na zachowanie właściwości antybakteryjnych tego metalu [43, 44]. Wilks i wsp. [44], analizowali właściwości antybakteryjne stopów metali, w których skład wchodziły: miedź, cynk, cyna, nikiel, aluminium, mangan, żelazo, chrom, fosfor, krzem, tytan oraz magnez. Autorzy ci wykazali, silne właściwości antybakteryjne względem *L. monocytogenes* wszystkich stopów zawierających miedź m.in. mosiądzu, brązu, aluminium i brązu krzemowego. Wszystkie te stopy wykazywały wyższą aktywność przeciwbakteryjną w stosunku do stali nierdzewnej. Stop, dla którego wykazano najsilniejsze właściwości bójcze (65% miedzi, 18% niklu, 17% cynku) został określony przez Autorów jako „nowe srebro”. Potwierdzono, również antybakteryjne właściwości stopów miedzi względem Gram-ujemnych bakterii z grupy Coli [42, 43] oraz Gram-pozytywnej *Staphylococcus haemolyticus* [32]. Lewis i Keevil [18] oraz Varkey [42] wykazali dodatkowo, że aktywność przeciwbakteryjna stopów miedzi, zależy od procentowej zawartości miedzi w danym stopie.

Ze względu na antybakteryjne właściwości, stopy miedzi, powszechnie wykorzystywane są w przemyśle spożywczym, w zakresie bezpieczeństwa i higieny żywności, do dezynfekcji wody w basenach, w szpitalach (jako klamki, krany, przełączniki światła, deski sedesowe, blaty stołów i poręcze schodów), a także do dezynfekcji powietrza i powierzchni urządzeń sanitarnych [2, 4, 13, 32, 43].

Jak dotąd potwierdzono właściwości przeciwdrobnoustrojowe wielu stopów metali, m.in. miedzi, cynku, niklu, cyny, srebra i złota [12, 32 33, 42, 43]. Metale te mogą być wykorzystane do produkcji stali nierdzewnej, w celu nadania jej właściwości. Antybakteryjne właściwości stali nierdzewnej otrzymano poprzez zastosowanie dodatkowych powłok z wyżej wymienionych pierwiastków [34] lub przez wprowadzenie ich do stali w procesie produkcyjnym [22, 46]. Jak podaje Yokota i wsp. [46], dodatek srebra w czasie produkcji stali nierdzewnej umożliwił uzyskanie właściwości antybakteryjnych nie wpływając przy tym na właściwości antykorozyjne.

Intensywny rozwój nanotechnologii w ostatnich latach, pozwolił na wykorzystanie właściwości srebra, złota, miedzi czy platyny na poziomie atomowym i molekularnym w postaci nanocząstek [13]. Nanocząsteczki metali i tlenków metali, m.in. srebro, tlenek srebra (Ag_2O), dwutlenek tytanu (TiO_2), krzem (Si), tlenek miedzi (CuO), tlenek cynku (ZnO), tlenek wapnia (CaO) i tlenku magnezu (MgO), wykazują silną aktywność przeciwbakteryjną. Biobójcze nanocząst-

kek metali mogą zostać wykorzystane przede wszystkim w medycynie, ale także w systemach uzdatniania wody czy przetwórstwa żywności [28]. Coraz częściej pojawiają się również prace dotyczące wielocząsteczkowych układów kompozytowych w połączeniu z nanocząstkami metalicznymi w celu nadania klasycznym polimerom właściwości antybakteryjnych [25, 26, 28].

Podsumowanie

Zdolność bakterii do przylegania do metali stanowi realne zagrożenie dla przenoszenia chorób zakaźnych szczególnie w środowiskach wewnątrzszpitalnych [26, 27]. Przedmioty metalowe znajdujące się w bezpośrednim otoczeniu pacjentów (poręcz łóżka, uchwyty, krzesła) mogą stanowić źródło zakażenia drobnoustrojami chorobotwórczymi, również szczepami antybiotykoopornymi [26, 27]. Przyleganie bakterii do powierzchni metalowych w systemach sieci wodnych czy też w przemyśle spożywczym, może prowadzić do mikrobiologicznego skażenia wody lub żywności [17]. Adhezja bakterii i w konsekwencji powstanie biofilmu w przemysłowych wymiennikach ciepła, przewodach doprowadzających ciecze czy tankach fermentacyjnych, zwiększa zagrożenie biokorozją, co powoduje straty ekonomiczne [6, 30].

W kontekście zagrożenia zdrowia publicznego i strat ekonomicznych zapobieganie przylegania bakterii jest uważana za najlepszą strategię [45]. W związku z tym, poszukiwanie antybakteryjnych i antyadhezyjnych materiałów wydaje się być bardzo istotne. Wykorzystanie w medycynie oraz w przemyśle metali o właściwościach antybakteryjnych może ograniczyć lub nawet zapobiegać negatywnym skutkom adhezji bakteryjnej [27]. Przypuszcza się, że stosowanie na szeroką skalę tego typu rozwiązań przyczyni się również do obniżenia liczby bakterii chorobotwórczych ulegających adhezji do powierzchni stałych w zakładach przemysłowych i szpitalach. Stosowanie metali antybakteryjnych zamiast biologicznie-obojętnych materiałów w rurach wymiany ciepła, filtrach i rurach ściekowych mogłoby również zapewnić dodatkową ochronę i zmniejszyć ryzyko skażenia.

Stosowanie metali o właściwościach antybakteryjnych może być również korzystne w kontekście ochrony środowiska. Stosowanie tego typu materiałów ograniczyłoby używanie substancji przeciwbakteryjnych, takich jak biocydy, farby lub pasty zawierające toksyczne dla środowiska związki [45]. Stosowanie metali o właściwościach antybakteryjnych mogłoby być zatem realnym, efektywnym, opłacalnym środkiem ochronnym [27]. Dalsze badania nad zastosowaniem metali w procesach przeciwdrobnoustrojowych z pewnością przyczynią się do szerszego ich użycia jako dodatkowych czynników wspomagających procesy bójcze zarówno w medycynie jak i przemyśle.

Literatura

- [1] Bakker D.P., Postmus B.R., Busscher H.J., van der Mei H.C., *A generalized mechanism for bacterial adhesion to surfaces: a Myth?*, Bacterial adhesion to modified polyurethanes, Applied and Environmental Microbiology 2003, 7, s. 127–132.
- [2] Beer C.W., Guilmartin L.E., McLoughlin T.F., White T.J., *Swimming pool disinfection: efficacy of copper/silver ions with reduced chlorine levels*, Journal of Environmental Health 1999, 61 (99), s. 9–13.
- [3] Białas W., Czaczyk K., Myszk K., *Kinetyka tworzenia biofilmów bakteryjnych na materiałach technicznych w zależności od dostępności składników odżywczych*, Żywność. Nauka. Technologia. Jakość 2005, 3, s. 127–137.
- [4] Blanc S.S., Carrara P.H., Zenetti G., Francioli P., *Water disinfection with ozone, copper, and silver ions, and temperature increase to control legionella: seven years of experience in a university teaching hospital*, Journal of Hospital Infection 2005, 60 (1), s. 69–72.
- [5] Brayner R., Ferrari-Iliou R., Brivois N., Djediat S., Benedetti M.F., Fiévet F., *Toxicological impact studies based on Escherichia coli bacteria in ultrafine ZnO nanoparticles colloidal medium*, Nano Letters 2006, 6 (4), s. 866–870.
- [6] Chmielewski W., *Algi, bakterie i grzyby. Korozja mikrobiologiczna w instalacjach chłodniczych i klimatyzacyjnych*, Magazyn Instalatora 2005, 11, s. 23.
- [7] Coughlan A., *Slime city*, New Scientist 1996, 15, s. 1–21.
- [8] Czaczyk K., Myszk K., *Biosynthesis of extracellular polymeric substances (EPS) and its role in microbial biofilm formation*, Polish Journal of Environmental Studies 2007, 16, s. 799–806.
- [9] Drenkard E., Ausubel F.M., *Pseudomonas biofilm formation and antibiotic resistance are linked to phenotypic variation*, Nature 2002, 18, s. 740–743.
- [10] Faúndez G., Troncoso M., Navarrete P., Figueroa G., *Antimicrobial activity of copper surfaces against suspensions of Salmonella enterica and Campylobacter jejuni*, Microbiology 2004, 4, s. 19–26.
- [11] Flemming H.C., Geesey G.G., *Biofouling and biocorrosion in industrial water systems*, Proceedings of the International Workshop on Industrial Biofouling and Biocorrosion, Stuttgart 1990.
- [12] Fricker S.P., *Medicinal chemistry and pharmacology of gold compounds*, Transition Metal Chemistry 1996, 21, s. 377–383.
- [13] Grass G., Rensing C., Solioz M., *Metallic copper as an antimicrobial surface*, Applied and Environmental Microbiology 2011, 77 (5), s. 1541–1547.
- [14] Hamilton-Miller J.M.T., Shah S., *A microbiological assessment of silver fusidate, a novel topical antimicrobial agent*, International Journal of Antimicrobial Agents 1996, 7, s. 97–99.

- [15] Herzberg M., Kang S., Elimelech M., *Role of extracellular polymeric substances (EPS) in biofouling of reverse osmosis membranes*, Environmental Science and Technology 2009, 43, s. 4393–4398.
- [16] Krogulska B., Matuszewska R., *Bakterie Legionella w instalacjach ciepłej wody – naświetlenie problemu*, Polski Instalator 2006, 12, s. 23–27.
- [17] Kumar C.G., Anand S.K., *Significance of microbial biofilms in food industry*, International Journal of Food Microbiology 1998, 42, s. 9–17.
- [18] Lewis A., Keevil C.W., *Antibacterial properties of alloys and its alloys in VAC&R systems*, International Copper Association, New York 2004.
- [19] Li B., Logan B.E., *Bacterial adhesion to glass and metal-oxide surfaces*, Colloids and Surfaces B: Biointerfaces 2004, 36, s. 81–90.
- [20] Molteni C., Helge K., Solioz M., *Killing of bacteria by copper surfaces involves dissolved copper*, Applied and Environmental Microbiology 2010, 76, s. 4099–4101.
- [21] Monroe D., *Looking for chinks in the armor of bacterial biofilms*, PLoS Biology 2007, 5 (11), s. 307
- [22] Okubo N., Nakamura S., Hasegawa M., Yamamoto M., Miyakusu K., *Anti-microbial activity and basic properties of antimicrobial stainless steels*, NSSAM Series Nisshin Steele 1998, 77, s. 69–81.
- [23] Páez P.L., Bazán C.M., Bongiovanni M.E., Toneatto J., Albasa I., Becerra M.C., Argüello G.A., *Oxidative stress and antimicrobial activity of chromium (iii) and ruthenium (ii) complexes on Staphylococcus aureus and Escherichia coli*, BioMed Research International 2013, 12, s. 7.
- [24] Pedro-Botet M.L., Sanchez I., Sabria M., Sopena N., Mateu L., Garcia-Nunez M., Rey-Joly C., *Impact of copper and silver ionization on fungal colonization of the water supply in health care centers: implications for immunocompromised patients*, Clinical Infectious Diseases 2007, 45 (1), s. 84–86.
- [25] Roth P.J., Theato P., *Versatile synthesis of functional gold nanoparticles: Grafting polymers from and onto*, Chemistry of Materials 2008, 20 (4), s. 1614–1621.
- [26] Różalska B., *Biofilmy drobnoustrojów i ich rola w zakażeniach*, Sepsis 2008, 1, s. 49–53.
- [27] Różalska B., Sadowska B., Walencka E., *Wykrywanie biofilmów stanowiących problemy medyczne i perspektywy ich eradykacji*, Zakażenia 2010, 10, s. 13–21.
- [28] Ruparelia J.P., Chatterjee A., Duttagupta S.P., Mukherji S., *Strain specificity in antimicrobial activity of silver and copper nanoparticles*, Acta Biomaterials 2008, 4, s. 707–716.
- [29] Sałek A., *Powstawanie biofilmu w warunkach przemysłowych. Zagrożenia bakteriami Legionella pneumophila Cz. 3.*, Przemysł fermentacyjny

- i owocowo-warzywny 2008, 10, s. 16–23.
- [30] Sałek A., *Biokorozja w systemach przemysłowych. Biokorozja w przemysłowych systemach wodnych Cz. 2. Biokorozja tlenowa i beztlenowa*, Przemysł fermentacyjny i owocowo-warzywny 2009, 12, s. 16–18.
- [31] Sani R.K., Peyton B.M., Brown L.T., *Copper – induced inhibition of growth of Desulfovibrio desulfuricans G20: assessment of its toxicity and correlation with those of zinc and lead*, Applied and Environmental Microbiology 2001, 67, s. 4765–4772.
- [32] Santo C.E., Quaranta D., Grass G., *Antimicrobial metallic copper surfaces kill Staphylococcus haemolyticus via membrane damage*, Microbiologyopen 2012, 1 (1), s. 46–52.
- [33] Sasahara T., Niiyama N., *Bactericidal activity and sensitization capacity of copper and its alloy*, Journal of the JRICu 2008, 47 (1), s. 365–371.
- [34] Schierholz J.M., Lucasi L.I., Rump A., Puerer G., *Efficacy of silver-coated medical devices*, Journal of Hospital Infections 1998, 40, s. 257–262.
- [35] Shanker K., Muralidhar P.R., Rohini R., Ravinder V., *Antibacterial active tetraaza macrocyclic complexes of chromium (III) with their spectroscopic approach*, International Journal of ChemTech Research 2009, 1 (2), s. 367–372.
- [36] Sharma V.K., Yngard R.A., Lin Y., *Silver nanoparticles: green synthesis and their antimicrobial activities*, Advances in Colloid and Interface Science 2009, 145 (1–2), s. 83–96.
- [37] Shih H-Y., Lin Y.E., *Efficacy of copper-silver ionization in controlling biofilm- and plankton-associated waterborne pathogens*, Applied and Environmental Microbiology 2010, 76 (6), s. 2032–2035.
- [38] Sönmez M., Berber İ., Akbaş E., *Synthesis, antibacterial and antifungal activity of some new pyridazin one metal complexes*, European Journal of Medicinal Chemistry 2006, 41, s. 101–105.
- [39] Sorys K., Sorys P., Poloczek A., *Metoda zapobiegania rozwojowi biofilmu*, Ekologia, Badania i Technologie 2007, 3, s. 20–21.
- [40] Strużycka I., Stępień I., *Biofilm - nowy sposób rozumienia mikrobiologii*, Borgis - Nowa Stomatologia 2009, 3, s. 85–89.
- [41] Thompson M.G., Corey B.W., Si Y., Craft D.W., Żurawski D.V., *Antibacterial activities of iron chelators against common nosocomial pathogens*, Antimicrobial Agents and Chemotherapy 2012, 56 (10), s. 5419–5421.
- [42] Varkey J., *Antibacterial properties of some metals and alloys in combating coliforms in contaminated water*, Scientific Research and Essays 2010, 5, s. 3834–3839.
- [43] Wilks S.A., Michels H.T., Keevil C.W., *The survival of Escherichia coli*

- O157 on a range of metal surfaces*, International Journal of Food Microbiology 2005, 105 (3), s. 445–454.
- [44] Wilks S.A., Michels H.T., Keevil C.W., *Survival of Listeria monocytogenes Scott A on metal surfaces: implications for cross-contamination*, International Journal of Food Microbiology 2006, 111 (2), s. 93–98.
- [45] Yasuyuki M., Kunihiro K., Kurissery S., Kanavillil N., Sato Y., Kikuchi Y., *Antibacterial properties of nine pure metals: a laboratory study using Staphylococcus aureus and Escherichia coli*, Biofouling 2010, 26, s. 851–858.
- [46] Yokota T., Tochihara M., Kobayashi M., *Antibacterial ferrite stainless steel containing stainless silver*, Kawasaki Steele 1998, 30, s. 53–54.
- [47] Zielenkiewicz U., *Biofilm – systemowe życie zbiorowe mikroorganizmów. Społeczne życie bakterii*, Academia - Magazyn Polskiej Akademii Nauk 2005, 11, s. 25.
- [48] Ziemba B., Jakimiak B., Chojecka A., Röhm-Rodowald E., Wiercińska O., Kancłerski K., *Działanie przeciwdrobnoustrojowe metali*, Zakażenia, 2013, [online], dostęp zdalny: www.zakazenia.org.pl/index.php?okno=7&id=1228&art_type=16