

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA



POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW
I TECHNIKÓW SANITARNYCH



MONOGRAFIE
„INŻYNIERIA ŚRODOWISKA – MŁODYM OKIEM”
TOM 34
SIECI I INSTALACJE SANITARNE
pod redakcją
Iwony Skoczko
Dariusza Andraki
Bernadetty Wądołowskiej
Justyny Truskołaskiej



Białystok 2017

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA



POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW
I TECHNIKÓW SANITARNYCH



MONOGRAFIE
TOM 34
SIECI I INSTALACJE SANITARNE

MONOGRAFIE
TOM 34



*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.



Krajowa
Reprezentacja
Doktorantów



TERAZ
ŚRODOWISKO.pl

Aktualności i praca w ochronie środowiska



Regionalna Dyrekcja Lasów Państwowych
w Białymstoku



IKEA Industry
Orla



Polskie Towarzystwo
Inżynierii Ekologicznej

POLSKI
instalator

P.V. PREFABET KLUCZBORK S.A.

P.V.®

wrotapodlasia.pl



INŻYNIERIA ŚRODOWISKA – MŁODYM OKIEM

TOM 34

SIECI I INSTALACJE SANITARNE

**pod redakcją
Iwony Skoczko
Dariusza Andraki
Bernadetty Wądołowskiej
Justyny Truskolaskiej**

Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej
Białystok 2017

Redaktor tomu:

Iwona Skoczko
Dariusz Andraka
Bernadetta Wądołowska
Justyna Truskolaska

Zespół redakcyjny:

Iwona Skoczko – Redaktor Naczelny
Dariusz Andraka – Redaktor Naczelny
Bernadetta Wądołowska – skład monografii
Justyna Truskolaska – skład monografii

Redakcja językowa: Autorzy**Recenzenci monografii:**

dr hab. inż. Katarzyna Gładyszewska-Fiedoruk
dr inż. Dariusz Andraka

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 Sadauskienė
prof. Antonio Rodero Serrano
prof. Manuel Ruiz de Adana Santiago
prof. dr hab. inż. Mirosław Żukowski
prof. dr hab. Tadeusz Łoboda
prof. dr hab. inż. Józef Jasiczak
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 Piekutין
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 Szczukowska
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 978-83-65596-21-5

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

Technologia osuszania w wentylacji	11
inż. Tomasz Bartosz, inż. Krzysztof Gawrylczyk, dr inż. Dorota Krawczyk	
Konstrukcje wirników siłowni wiatrowych o osi pionowej – przegląd rozwiązań i badania modelowe wybranych rozwiązań.....	23
Agata Górniak, mgr inż. Michał Kamiński, mgr inż. Błażej Gaze, dr inż. Przemysław Kobel	
Analiza techniczno – ekonomiczna podgrzewania powietrza wentylacyjnego o niskiej temperaturze.....	42
Kamila Habiera, dr inż. Arkadiusz Dyjakon	
Szkodliwy wpływ soli transportowych pod wpływem wilgoci kapilarnej na przegrody w budynkach zabytkowych	61
mgr inż. arch. Piotr Koda, dr hab. inż. Irena Ickiewicz	
Analiza hydrauliki rurociągu tłocznego studni głębinowej	73
inż. Patryk Nowik, mgr inż. Beata Nowakowska, prof. dr hab. inż. Anatoli Hurynovich, mgr inż. Jarosław Jelski	
Siłownie wiatrowe – badanie emisji hałasu słyszalnego	83
mgr inż. Emilia Pogorzelska	
Analiza modelu hydrologicznego zlewni naturalnej Potoku Oliwskiego pod kątem ochrony przeciwpowodziowej oraz zdolności retencyjnej	97
inż. Michał Rościszewski	
Wentylacja pożarowa	119
mgr inż. Marlena Małgorzata Rowińska	
Instalacja fotowoltaiczna jako sposób na zrównoważony system energetyczny w gospodarstwie domowym	130
Monika Tokarczuk, dr inż. Arkadiusz Dyjakon	

inż. Tomasz Bartosz¹⁾, inż. Krzysztof Gawrylczyk, dr inż. Dorota Krawczyk
Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Katedra Systemów Inżynierii Środowiska,
Katedra Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji
¹⁾ ultimate3r@gmail.com

TECHNOLOGIA OSUSZANIA W WENTYLACJI

Technology of drying in ventilation

Słowa kluczowe: osuszanie, wentylacja, wilgotność

Keywords: drying, ventilation, humidity

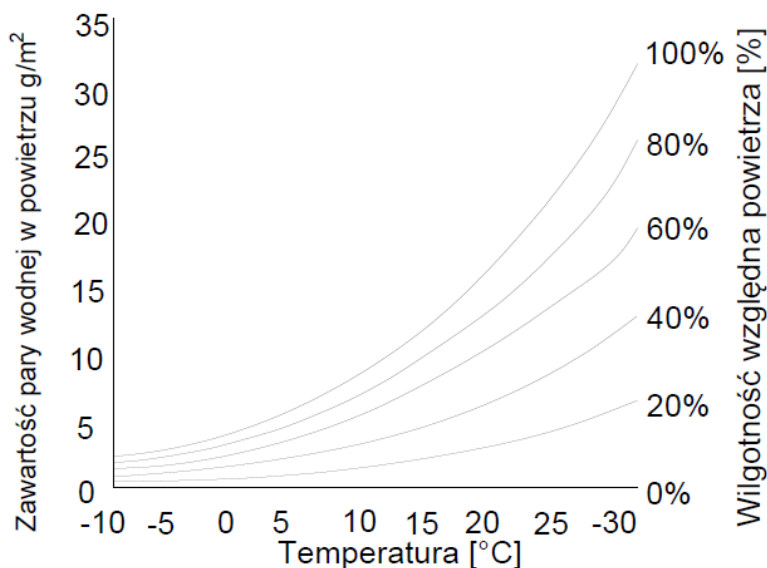
Streszczenie:

Prawidłowa wentylacja jest niezbędna zarówno w budynkach istniejących, jaki i nowo budowanych. Proces ten polega na wymianie powietrza między pomieszczeniami budynków, a przestrzenią na zewnątrz obiektów. Wyróżniamy wentylację naturalną i wymuszoną, czyli mechaniczną, przy czym jedynie w przypadku wentylacji mechanicznej możliwa jest regulacja parametrów powietrza wewnętrznego. Jednym z podstawowych parametrów, obok temperatury jest wilgotność powietrza. Zalecany zakres wilgotności względnej w większości pomieszczeń przeznaczonych do pobytu ludzi wynosić 40-60%, natomiast wilgotność powietrza zewnętrznego dostarczanego do budynku zależy od wielu czynników na przykład lokalizacji obiektu i od pory roku. Jeśli zaś wilgotność jest większa lub mniejsza od wyżej wymienionych zakresów to organizm ludzki odczuwa dyskomfort oraz niekorzystnie wpływa to na zdrowie i dobre samopoczucie człowieka. Niniejsza praca poświęcona jest osuszaniu powietrza, które jest niezbędna zarówno w celu osiągnięcia warunków komfortu użytkowników, jak i zapobiega zawilgoceniu elementów budowlanych, co prowadzi w dalszej konsekwencji do powstawania pleśni, czy grzy-

ba. Osuszanie powietrza wykorzystuje się nie tylko w budownictwie mieszkalnym, lecz i w przemyśle.

Wprowadzanie

Wilgotność jest podstawowym parametrem, który powinien być kontrolowany w budynkach mieszkalnych, czy też przemysłowych. Zawartość pary wodnej w powietrzu powinna być na optymalnym poziomie, między 40% a 60%. Minimalna zalecana wilgotność względna wynosi 30% [15]. Omawiany parametr jest ściśle związany z temperaturą powietrza, a co za tym idzie, duży wpływ na wahania wilgotności powietrza ma pora roku. W zimę podczas mrozu, przy działającej instalacji centralnego ogrzewania wilgotność jest niska i może spaść do 20%. Może to skutkować podrażnieniem błony śluzowej, pieczeniem oczu czy też nadmiernym wysuszeniem i spękaniami parkietu oraz mebli. Wilgotność względna jest zwykle najwyższa latem, podczas występowania wyższych wartości temperatury oraz występowania opadów atmosferycznych. Wartość wilgotności względnej będzie na poziomie nawet 90%. Na rysunku 1 przedstawiono zależność ilości pary wodnej w powietrzu od temperatury.



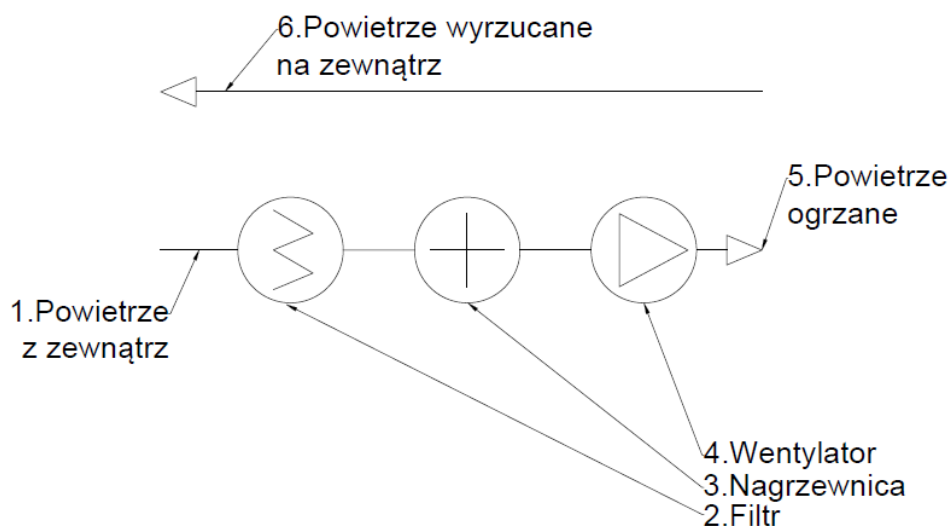
Rys. 1. Zależność zawartości pary wodnej od temperatury

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Fizyka budowy – podręcznik, Podstawy ochrony ciepło-wilgotnościowej [1]

W celu obniżenia wilgotności względnej stosujemy procesy osuszania.

Ogrzewanie i intensywna wentylacja

Osuszanie tą metodą opiera się na podwyższeniu temperatury powietrza określonego pomieszczenia i zwiększonej ilości wymian powietrza w ciągu godziny. Proces ten jest uzależniony od warunków zewnętrznych. Jest bardziej skuteczna, gdy temperatura na zewnątrz jest niższa, zaś wewnątrz pomieszczenia jest wyższa. Zatem największe rezultaty zmiany wilgotności można uzyskać zimą, a znacznie gorsze latem. Zwiększony strumień powietrza wentylacyjnego w sezonie grzewczym prowadzi jednak do zwiększonego zapotrzebowania na ciepło do ogrzania powietrza, a tym samym wyższych kosztów. Przykładowy schemat osuszania przy użyciu nagrzewnicy pokazano na rysunku 2 [13].



Rys. 2. Przykładowy schemat osuszania przez wentylację przy użyciu nagrzewnicy

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: „Ogrzewnictwo, wentylacja, klimatyzacja: podręcznik dla technikum” [2]

Nagrzewnica stosowana jest w celu uzyskania odpowiedniej temperatury, szczególnie w okresie zimy. Jej dobór polega na wyznaczeniu mocy obliczeniowej nagrzewnicy ze wzoru [3]:

$$Q_n = V\rho c_p \Delta t_N \quad (1)$$

gdzie:

V – strumień objętościowy powietrza wentylującego [m^3/s],

ρ – gęstość powietrza (standardowo $\rho = 1,2 \text{ kg/m}^3$),

c_p – ciepło właściwe powietrza ($c_p = 1,005 \text{ kJ/kg}$),

$\Delta t_N = t_2 - t_1$ – przyrost temperatury powietrza w nagrzewnicy [K],

t_1 – temperatura powietrza na wlocie do nagrzewnicy (w zależności od rozwiązania może to być temperatura: powietrza zewnętrznego t_z , powietrza za wymiennikiem do odzysku ciepła t_{zw} lub mieszaniny powietrza zewnętrznego i obiegowego t_m) [$^{\circ}\text{C}$],

t_2 – temperatura powietrza na wylocie z nagrzewnicy (standardowo jest to temperatura powietrza nawiewanego t_n) [$^{\circ}\text{C}$].

Najczęściej przy osuszaniu stosuje się nagrzewnice gazowe, olejowe, elektryczne oraz wodne.

W przypadku nagrzewnic olejowych źródłem ciepła jest olej opałowy. Jest on wtryskiwany do komory spalania poprzez dysze paliwową. W wyniku spalania powietrze przechodzące przez nagrzewnicę ulega ogrzewaniu. Wyróżniamy nagrzewnice z wymiennikiem oraz bezwymennikowe. W nagrzewnicach z wymiennikiem paliwo jest spalane w komorze spalania, a powietrze zostaje ogrzane przez wymiennik ciepła. Nagrzewnice bezwymennikowe nie posiadają wymiennika, czyli olej jest spalany i bezpośrednio ogrzewa przepływające powietrze. Znaczącą różnicą w tych nagrzewnicach jest fakt, że w nagrzewnicy bezwymennikowej miesza spaliny wraz z ogrzewanym powietrzem, zaś nagrzewnica wymiennikowa ma zamkniętą komorę spalania i odprowadza spaliny na zewnątrz.

Nagrzewnice gazowe pracują podobnie jak olejowe, jednakże paliwem w tym przypadku jest gaz. Nagrzewnice propan-butan wytwarzają ciepłe i czyste powietrze. Spalanie odbywa się w zamkniętej komorze spalania. Powietrze zostaje zasane przez wentylator, następnie w nagrzewnicy następuje jego ogrzanie. Nie posiadają one odprowadzenia spalin. Należy zapewnić dopływ powietrza, aby proces spalania zachodził prawidłowo. Najnowsze nagrzewnice posiadają regulację umożliwiającą zmianę mocy, przez co można zmniejszyć zużycie gazu [11].

Zasada działania nagrzewnicy elektrycznej opiera się na wymuszonym przepływie powietrza przez system grzałek elektrycznych lub na zasadzie promieniowania cieplnego. Wobec tego nagrzewnice można podzielić na: nagrzewnice wentylatorowe – w ich skład wchodzi wentylator osiowy o mniejszym sprężu, a przez to mniejszym zasięgu i wydajności. Temperatura powietrza wylatującego z nagrzewnicy wynosi maksymalnie 60°C , „działa” elektryczne – mają kształt rury oraz posiadają wentylator promieniowy o większym sprężu, zaś temperatura powietrza wylotowego dochodzi do około 100°C , przez co można stosować je do ogrzewania większych pomieszczeń, promienniki podczerwieni – nie posiadają wentylatora, mają stałą temperaturę promieniowania i służą do ogrzewania określonego punktu lub obszaru pomieszczenia [12].

Regulacja nagrzewnic elektrycznych zależy od ich mocy. Nagrzewnice o małej mocy, zasilane prądem jednofazowym (220/240 V) zazwyczaj regulowane są w dwóch położeniach. Z kolei większe dzieli się na sekwencyjnie załączane stopnie, dwupołożeniowo. Pracą nagrzewnic steruje regulator proporcjonalny, który wyłącza bądź włącza kolejne stopnie nagrzewnicy w zależności od potrzeb. Wyróżniamy również regulację płynną przy użyciu regulatorów tyrystorowych, które działają tak samo jak zawory regulacyjne [4].

Nagrzewnice wodne są urządzeniami, w których czynnik przepływa w rurach o małych średnicach, połączonych ze sobą w obiegi kolektorami bądź kolankami. Rury są ożebrowane oraz umieszczone w ramie profilowanej blachy stalowej, zwykle poziomo i łączone ze sobą w kształt węzownicy, tak aby możliwy był przepływ powietrza w sposób krzyżowy oraz przeciwpądowy (rzadko współpądowy). Na wydajność nagrzewnicy ma wpływ szereg parametrów między innymi ilość rur w jednym rzędzie, ilość rzędów, układ rur (szachownicowy bądź szeregowy), grubość żebra oraz rozstaw żeber wpływają na straty ciśnienia po stronie powietrza [4].

Podstawowe zalety nagrzewnic elektrycznych w porównaniu do wodnych to [5]:

- mają mniejszy ciężar przy takiej samej mocy grzewczej;
- grzałki niedługo po włączeniu zasilania osiągają pełną moc, zaś nagrzewnice wodne wykorzystujące wodę jako czynnik grzewczy posiadają dłuższy czas nagrzania czynnika (zależny od ilości wody w obiegu) od uruchomienia urządzenia (czas na osiągnięcie zadanej temperatury);
- nagrzewnica elektryczna nie może zamarznąć (brak wody w środku);
- proste doprowadzenie medium do nagrzewnicy- należy tylko podłączyć kabel elektryczny, bez żadnych spadków jak w przypadku nagrzewnicy wodnej, nie jest podatny na korozję i nie trzeba go izolować. Przy doborze typu i przekroju przewodu należy uwzględnić moc grzałek, napięcie zasilania, ochronę przeciwporażeniową oraz długość kabla.

Wady nagrzewnic elektrycznych w porównaniu do wodnych [5]:

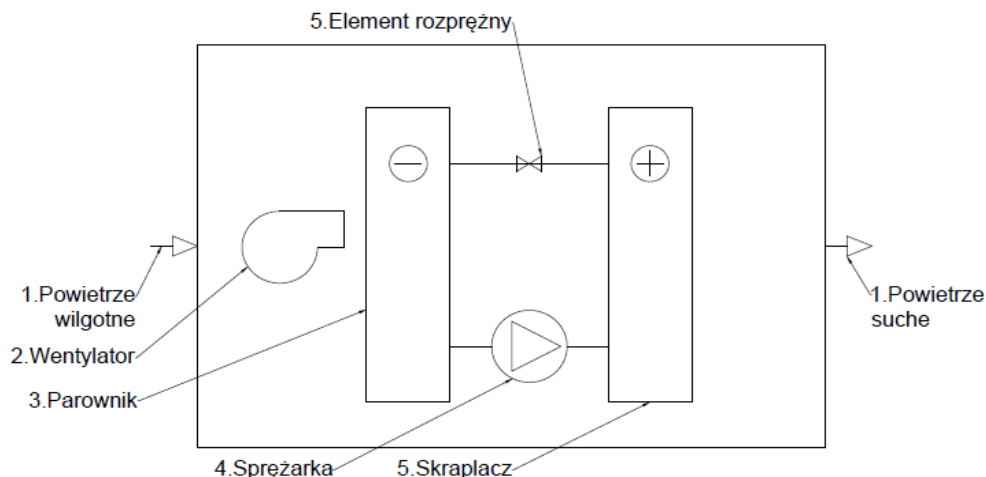
- w przypadku braku przepływu powietrza istnieje możliwość spalenia grzałek;
- wyższe koszty eksploatacji;
- trudności w regulacji mocy grzewczej (regulacja zwykle odbywa się poprzez okresowe włączanie i wyłączanie grzałek).

Osuszanie kondensacyjne

Osuszanie kondensacyjne jest dość często spotykane. Osuszacz działa podobnie jak chłodziarka i pracuje głównie w warunkach panujących wewnątrz pomieszczeń, czyli w zakresie od 0 do 40°C. Natomiast najlepszą efektywność osuszania otrzymujemy przy temperaturze od 20 do 25°C. Wydajność jest tym większa, im

większa jest temperatura i wilgotność względna w pomieszczeniu. Proces osuszania kondensacyjnego najlepiej zachodzi, gdy wilgotność względna powietrza wynosi od 30% do 90%. Wydajność osuszaczy kondensacyjnych jest różna – przykładowo przy niewielkiej mocy (2,5 kW) wynosi 5 dm³/doba. Większa moc urządzenia wynosząca 14 kW daje możliwość osuszenia około 1600 dm³ powietrza w ciągu doby. Praca tych urządzeń jest również możliwa w niskich temperaturach, gdyż posiadają automatyczne odszraniacze.

Zasada działania opiera się na odbieraniu wilgoci z wilgotnego powietrza. W metodzie tej wykorzystywane jest zjawisko kondensacji pary wodnej poprzez kontakt osuszanego powietrza z ciałami o temperaturze mniejszej niż punkt rosy. Elementem zasadniczym osuszacza kondensacyjnego jest skraplacz o dużej powierzchni, na który przepływa zasysane przez wentylator powietrze. Kondensat jest gromadzony w specjalnym pojemniku, który trzeba okresowo opróżniać, lub automatycznie odprowadzany poza układ. Obieg powietrza odbywa się w zamkniętym obiegu. Występuje tu nieznaczny wzrost temperatury powietrza w pomieszczeniu w wyniku zużywania energii przez urządzenie [13]. Schemat działania osuszacza kondensacyjnego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat działania osuszacza kondensacyjnego

Źródło: opracowanie własne na podstawie artykułu

<http://www.chlodnictwoiklimatyzacja.pl/artykuly/255-wydanie-3-2016/3755-systemyosuszania-cz-2-omowienie-sposobow-osuszania.html> [14]

Opis obiegu powietrza:

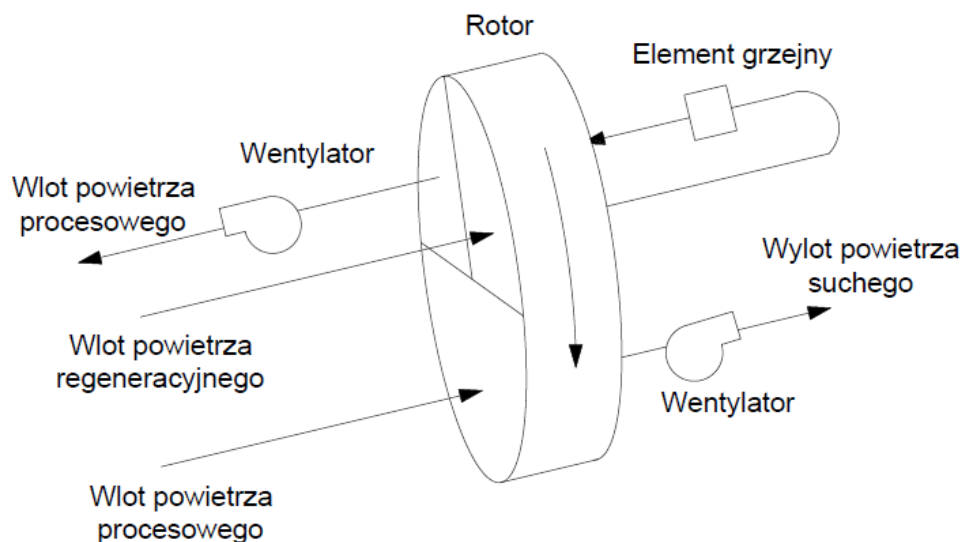
- wilgotne powietrze (1) jest zasysane z pomieszczenia przez wentylator (2),

- po przejściu przez filtr powietrze zostaje schłodzone na powierzchni parownika (3) do temperatury poniżej punktu rosy, co powoduje skroplenie się pary wodnej,
- skroplona para wodna jest magazynowana w zbiorniku znajdującym się w urządzeniu, bądź odprowadzona poza układ,
- następnie powietrze o zmniejszonym poziomie wilgotności jest podgrzewane na skraplaczu (5) i jako suche trafia ponownie do pomieszczenia,
- proces ochładzania, osuszania i podgrzania powietrza trwa mniej niż sekundę,
- ciągła praca osuszacza umożliwia stopniową redukcję wilgotności w pomieszczeniu.

Osuszanie absorpcyjne

Jest to metoda mająca na celu osuszania powietrza wewnątrz budynków w celu zapobiegania powstawania wilgoci i grzybów na ścianach. Znajduje ona również szerokie zastosowanie w przemyśle np. farmaceutycznym, spożywczym oraz w systemach klimatyzacyjnych [14]. Osuszacze tego typu można podzielić na dwa rodzaje: urządzenia do zastosowań domowych, które skraplają wilgoć do zbiornika oraz do zastosowań profesjonalnych. W porównaniu do osuszaczy kondensacyjnych urządzenia adsorpcyjne są bardziej energochłonne, lżejsze ale i delikatniejsze – nie nadają się do montażu w miejscach o dużym zapyleniu ze względu na możliwość uszkodzenia rotora. Działanie oparte jest o zbiornik osuszający, w którym znajduje się adsorbent, zazwyczaj jest to żel krzemionkowy lub nanofiltr. Adsorbent ten jest bezpieczny dla zdrowia i strukturą przypomina piasek. Charakteryzuje się silnymi właściwościami adsorpcyjnymi wody [5]. W osuszaczach adsorpcyjnych wykorzystuje się zjawisko adsorpcji wilgoci. Zbiornik osuszający posiada wlot i wylot powietrza. W skład układu wchodzi też dwa wentylatory, rotor będący zasadniczo głównym elementem urządzenia, nagrzewnica, a także układ sterujący i zabezpieczeń [14]. Rotor zbudowany jest z naprzemiennie ułożonych warstw folii falistej i folii płaskiej tworzących strukturę podłużnych kanałków przez które przepływa powietrze procesowe [5]. Rotor pokryty jest na całej swojej powierzchni sorbentem i to on wraz ze zdolnościami sorbentu stanowi o efektywności całego procesu. Praca urządzenia polega na obróbce dwóch jednocześnie dopływających strumieni powietrza o stosunku 3:1. Strumień o większej objętości przepływu nazywany jest procesowym poddawany jest osuszaniu w momencie przejścia przez rotor [14]. Rotor po przejściu powietrza procesowego powoli się obraca tym samym przenosząc zaadsorbowaną parę wodną do strefy cyklu regeneracji [5]. Strumień mniejszy nazywany natomiast regeneracyjnym w momencie nagrzania przez nagrzewnicę do temperatury wynoszącej około 130°C przechodzi również przez rotor i jak nazwa strumienia wskazuje regeneruje układ odparowując i usuwając z niego zebraną się na powierzchni rotora pokrytego sorbentem wilgoć. Umożliwią tą ciągłą

prace układu. Ze względu na proces nagrzewania rotora przez powietrze regeneracyjne konieczne jest jego schłodzenie. Cykl chłodzenia polega na usunięciu ogrzanego powietrza regeneracyjnego od razu po usunięciu wilgoci z rotora. Powietrze usuwane jest z układu na zewnątrz budynku i pobierane jest nowe i cykl się powtarza [14]. Ze względu na wysoką temperaturę rotora podczas cyklu regeneracyjnego oraz niską wilgotność powietrza go opuszczającego odporny jest on na gromadzenie się szkodliwych bakterii [5].



Rys. 4. Proces osuszania sorbcyjnego. Osuszacz recusorb R.

Źródło: Opracowanie własne na podstawie: Wentylacja, Klimatyzacja, Ogrzewanie" - fachowy poradnik dla projektantów, wykonawców i użytkowników instalacji wentylacyjnej, klimatyzacyjnej i grzewczej [5]

Rysunek 4 przedstawia osuszacz z wewnętrznym odzyskiem energii. Zastosowanie takiej technologii umożliwia osiągnięcie niskiej temperatury punktu rosy. Podstawową zaletą takiego rozwiązania jest to, że powietrze suche opuszczające osuszacz jest chłodniejsze i bardziej osuszone niż w innych rozwiązaniach technologicznych. W czasie eksploatacji osuszaczy adsorpcyjnych należy zwrócić uwagę, aby do wnętrza nie dostał się olej ponieważ prowadzi to do zmniejszenia wydajności działania urządzenia. Proces regeneracji adsorbentu powoduje, że około 15% dostarczonego powietrza ulega utracie. Zaletą stosowania osuszaczy adsorpcyjnych jest możliwość osuszania w temp. poniżej 0°C [5].

Żel krzemionkowy stosowany w osuszaczu nazywany inaczej silikozelem tworzy się ze szkła wodnego mającego następującą strukturę chemiczną K_4SiO_4 . Najczęściej występuje on w postaci pyłu lub bezbarwnych porowatych ziaren przypominających drobny pył. Na potrzeby procesu osuszania stosuje się jednak odmianę tego tworzywa o niebieskim zabarwieniu, które nadane jest poprzez dodanie do niego chlorku kobaltu. Powoduje to zmianę konsystencji na taką przypominającą żel. Poprzez obserwacje barwy substancji możemy łatwo określić moment wystąpienia stanu nasycenia wodą i określić moment, w którym należy rozpocząć cykl regeneracji [4]. Parametrem doboru urządzenia jest wydajność osuszania wyrażona w kg/h. Wartość podawana jest dla parametrów powietrza procesowego na wlocie do osuszacza dla temperatury 20°C i wilgotności 60%RH. W razie wystąpienia innych parametrów należy obliczyć przeliczyć wydajność rzeczywistą mnożąc wartość katalogową wydajności przez współczynnik odczytany z wykresu podawanego przez producentów urządzeń. Aby uzyskać teoretyczną wartość osuszania należy zsumować wilgotność powstająca od wentylacji, ludzi, powierzchni wodnych, suszonych produktów i dyfuzji. Przy projektowaniu układów z osuszaczem zapewnić odpowiednie zasilanie elektryczne dla osuszacza. Wymagają tego takie podzespoły jak silnik napędzający rotor, automatyka sterująca a także grzałki znajdujące się w nagrzewnicy. Należy także zwrócić uwagę na zapewnienie odpowiedniego zabezpieczenia np. zamontować termostat zabezpieczający. Regulację wydajności osiąga się poprzez regulację temperatury powietrza regeneracyjnego za pomocą regulacji grzałek elektrycznych. Włączanie i wyłączanie osuszacza odbywać się może przez higrostat znajdujący się w kanale wentylacyjnym lub poprzez zewnętrzną automatykę sterującą. Możliwe są więc dwa rozwiązania albo steruje się pracą całego urządzenia czyli rotoru i grzałek elektronicznych lub też rotor pracuje przez cały czas, a załączana jest tylko grzałka [5].

Podsumowanie

W ostatnich latach zaobserwować można duże zainteresowanie tematyką osuszaczy powietrza. Publikacje [6]-[10] prezentują wyniki badań różnych typów osuszania możliwych do zastosowania w instalacjach klimatyzacyjnych budynków. Jest to niezwykle ważne, gdyż prawidłowa wilgotność wpływa zarówno na komfort użytkowników, czy też zapobiega niszczeniu obiektów. Osuszanie powietrza wykorzystuje się nie tylko w budownictwie mieszkalnym, lecz i w przemyśle, gdzie odpowiednia wilgotność poprawia sprawność przebiegu procesów technologicznych. Wydaje się, że dziedzina ta wymaga dalszych badań eksperymentalnych i symulacyjnych mających na celu optymalizację stosowanych dotychczas, bądź nowych konstrukcyjnie i materiałowo osuszaczy.

Artykuł został przygotowany w ramach programu współpracy pomiędzy Politechniką Białostocką, a University of Córdoba na lata 2015-2020, „Możliwości

wykorzystania odnawialnych źródeł energii w kontekście poprawy efektywności energetycznej i jakości powietrza w budynkach i innych obiektach” i sfinansowany w ramach pracy statutowej S/WBIIŚ/4/2014.

Literatura

- [1] Ujma A., *Fizyka budowli – podręcznik, Podstawy ochrony ciepłno-wilgotnościowej*, Politechnika Częstochowska, Warszawa 2014, s. 15-16.
- [2] Sewerynik J., Krygier K., Klinke T., *Ogrzewnictwo, wentylacja, klimatyzacja: podręcznik dla technikum*, Wydawnictwo WSiP, Warszawa 2007, s.443-444.
- [3] Kwiecień D., *Moce nagrzewnicy i chłodnicy powietrza wyznaczane w oparciu o dane klimatyczne*, Rynek instalacyjny 5/2013, Wydawnictwo Grupa Medium, Warszawa 2013.
- [4] Pełech A., *Wentylacja i klimatyzacja – podstawy cz.1*, Oficyna wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008, s.210-230, 286-304.
- [5] Fodemski T. R. i inni, *"Wentylacja, Klimatyzacja, Ogrzewanie" - fachowy poradnik dla projektantów, wykonawców i użytkowników instalacji wentylacyjnej, klimatyzacyjnej i grzewczej*, Verlag Dashöfer Sp. z o.o., Warszawa 2009, s. 1-6.
- [6] Duong H.C., Hai F.I., Al-Jubainawi A., Ma Z., He T., Nghiem L.D. *Liquid desiccant lithium chloride regeneration by membrane distillation for air conditioning*. Separation and Purification Technology, Volume 177, 28 April 2017, s. 121-128.
- [7] Wang X., Cai W., Yin X., *A global optimized operation strategy for energy savings in liquid desiccant air conditioning using self-adaptive differential evolutionary algorithm*, Applied Energy, Volume 187, 1 February 2017, s. 410-423.
- [8] Fazilati M.A., Alemrajabi A.A., Sedaghat A., *Liquid desiccant air conditioning system with natural convection*, Applied Thermal Engineering, Volume 115, 25 March 2017, s. 305-314.
- [9] Zouaoui A., Zili-Ghedira L., Nasrallah S.B., *Solid desiccant solar air conditioning unit in Tunisia: Numerical study* Energy and Thermal Systems Laboratory, National Engineering School of Monastir, University of Monastir, Avenue Ibn Aljazzar, 5019 Monastir, Tunisia.
- [10] Gadalla M., Saghafifar M., *Performance assessment and transient optimization of air precooling in multi-stage solid desiccant air conditioning systems*, Energy Conversion and Management, Volume 119, 1 July 2016, s. 187-202.
- [11] Wielu autorów dostępnych na poniższej stronie, *Nagrzewnica*, [online], dostęp zdalny: <https://pl.wikipedia.org/wiki/Nagrzewnica>, [data wejścia: 13.02.2017].
- [12] Adamczewski A., *Nagrzewnice powietrza*, [online], dostęp zdalny: <http://instsani.pl/814/nagrzewnice-powietrza>, [data wejścia: 15.02.2017].

- [13] Magott C., Rokieli M., *Osuszanie - cz. I*, [online], dostęp zdalny: http://www.inzynierbudownictwa.pl/technika,materialy_i_technologie,artykuly,osuszanie_-_cz__i,6106, [data wejścia: 16.02.2017].
- [14] Labuda T., *Systemy osuszania cz. 2. Omówienie sposobów osuszania*, [online], dostęp zdalny: <http://www.chlodnictwoiklimatyzacja.pl/artykuly/255-wydanie-3-2016/3755-systemy-osuszania-cz-2-omowienie-sposobow-osuszania.html>, [data wejścia: 16.02.2017].
- [15] Norma PN-78/B-03421 opublikowana 29 grudnia 1978r. Wentylacja i klimatyzacja. Parametry obliczeniowe powietrza wewnętrznego w pomieszczeniach przeznaczonych do stałego przebywania ludzi.

Agata Górniak¹⁾, mgr inż. Michał Kamiński*²⁾, mgr inż. Błażej Gaze²⁾,
dr inż. Przemysław Kobel³⁾

¹⁾ Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Przyrodniczo-Technologiczny,
a.gorkax@gmail.com

²⁾ Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Przyrodniczo-Technologiczny,
Instytut Inżynierii Rolniczej, Zakład Niskoemisyjnych Źródeł Energii i Gospodarki
Odpadami michal.kaminski@upwr.edu.pl, blazej.gaze@upwr.edu.pl

³⁾ Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Inżynierii Rolniczej, Zakład Pod-
staw Techniki, przemyslaw.kobel@upwr.edu.pl

KONSTRUKCJE WIRNIKÓW SIŁOWNI WIATROWYCH O OSI PIONOWEJ – PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ I BADANIA MODELOWE WYBRANYCH ROZWIĄZAŃ

Wind turbine rotor with vertical axis constructions –
overview and research of chosen solutions

Słowa kluczowe: odnawialne źródła energii, siłownia wiatrowa, konstrukcje wirników

Keywords: renewable energy sources, wind turbine, rotor constructions

Streszczenie:

Turbina stanowi najistotniejszą część siłowni wiatrowej. Jej celem jest zamiana energii kinetycznej przemieszczających się mas powietrza na pracę mechaniczną napędzającą generator lub inne urządzenie. Parametry konstrukcyjne turbiny decydują o uzyskiwanej mocy i sprawności siłowni. W energetyce zawodowej dominują elektrownie wiatrowe o osi poziomej z wirnikami trójłopatowymi. Wśród siłowni małej mocy, przeznaczonych do przydomowej produkcji energii lub celów innych

niż energetyczne spotyka się szeroki wachlarz rozwiązań konstrukcyjnych. Dużą grupę stanowią turbiny o osi pionowej charakteryzujące się możliwością pracy niezależnie od kierunku wiatru, mniejszymi wymaganymi prędkościami wiatru, prostszą konstrukcją oraz niskim poziomem hałasu. Ich zasadniczą wadą jest niska sprawność.

W pracy zaprezentowano przegląd literaturowy konstrukcji siłowni wiatrowych. Przedstawiono także wyniki badań laboratoryjnych mających na celu porównanie wybranych rozwiązań turbin wiatrowych.

Wstęp

Na rynku energetyki wiatrowej dostępny jest asortyment siłowni wiatrowych o różnych wielkościach, począwszy od małych przydomowych elektrowni wiatrowych do bardzo dużych struktur włączonych do systemu energetycznego [4]. Miniaturowe siłownie wiatrowe znajdują zastosowanie tam, gdzie dostęp do prądu jest ograniczony, budowa sieci energetycznej nieopłacalna, a zapotrzebowanie na energię waha się w granicach od 0,5 do 2 kW (np. przy hydrologiczno-meteorologicznych stacjach monitorujących obszary leśne, ciągach autostradowych, suszarniach, przy napowietrzaniu stawów rybnych oraz dostarczaniu energii do obiektów agroturystycznych).

Istnieje wiele rozwiązań konstrukcyjnych mających na celu zwiększenie efektywności i sprawności turbin urządzeń oraz zmniejszenie hałasu powstającego podczas ich pracy. Współcześnie oprócz funkcjonalności i komfortu użytkowania instalacji zwraca się także uwagę, na rozwiązania przyjazne środowisku i współgrające z otoczeniem. Elektrownie wiatrowe z reguły są proekologiczne, jednak często przy tego typu przedsięwzięciach nie uwzględnia się wyglądu i wpasowania konstrukcji w otaczający ją krajobraz. Ciekawe rozwiązania architektoniczne pasujące do scenarii miejsca mogą mieć wpływ na ich pozytywny odbiór przez społeczeństwo. Turbiny o osi pionowej posiadają ogromny potencjał do tworzenia różnorodnych koncepcji strukturalnych. Zazwyczaj są to konstrukcje o małych wielkościach, dlatego w prosty sposób można umieścić je na niewielkich metrażach, np. na powierzchniach użyteczności publicznej czy przydomowych działkach. Istotną kwestią podczas konstruowania rotora jest uwzględnienie materiału, z którego będzie on wykonany, ważna jest jego wytrzymałość, lekkość i odporność na warunki atmosferyczne. Jednak kluczowym zagadnieniem nadal pozostaje to, czy architektoniczne udoskonalenia polepszają także efektywność wytwarzania prądu przez turbinę wiatrową.

Turbiny wiatrowe o poziomej i pionowej osi obrotu

Głównym kryterium podziału elektrowni wiatrowych jest położenie osi obrotu wirnika w stosunku do kierunku napływającego wiatru, zgodnie z którym rozróżnia się dwa rodzaje elektrowni:

- z poziomą osią obrotu, tj. równoległą do powierzchni gruntu i strumienia powietrza – HAWT (ang. Horizontal Axis Wind Turbine);
- z pionową osią obrotu, tj. prostopadłą do gruntu i strumienia powietrza – VAWT (ang. Vertical Axis Wind Turbine).

Elektrownie z osią poziomą stanowią aż 95% wszystkich elektrowni [5] i ich głównym obszarem pracy jest energetyka zawodowa. Najczęściej spotykanymi typami turbin na farmach wiatrowych są turbiny trójłopatowe (rys. 1), charakteryzujące się wirnikiem zlokalizowanym przed wieżą. Rzadszym rozwiązaniem, ze względu na powstające turbulencje, jest tzw. zawietrzne zlokalizowanie wirnika, tj. za wieżą. Zaawansowane technologicznie siłownie wiatrowe wyposażone są w mechanizmy odpowiedzialne za ciągły monitoring pracy elektrowni. Jednym z takich elementów jest układ regulacji ustawienia łopat zgodnie z siłą wiatru, zapewniając tym samym wyższą sprawność konwersji energii. Zakres prędkości wiatru przy których elektrownia typu HAWT pracuje mieści się w zakresie 2-25 m/s [9]. Wyższa wartość prędkości wiatru powoduje załączenie hamulca uniemożliwiającego uszkodzenie siłowni wiatrowej. Sprawność takich jednostek w układzie z trzema łopatom w wirniku sięga 60% [2].

Siłownie wiatrowe małej mocy, nie włączone w Krajowy System Energetyczny, pracujące na rzecz indywidualnych odbiorców energii (np. gospodarstw domowych) ze względu na uproszczoną konstrukcję (m.in. nie posiadają układu regulacji kąta łopat) uruchamiają się przy prędkościach około 2 m/s, a w chwili przekroczenia bezpiecznej dla elektrowni prędkości wiatru wirnik wyhamowuje wykorzystując konstrukcję wieży.



Rys. 1. Trójłopatowa turbina wiatrowa o osi poziomej

Źródło: [18]

Innym rozwiązaniem elektrowni z osią poziomą są siłownie wiatrowe wykorzystujące efekt Magnusa. Różnią się przede wszystkim konstrukcją łopat, które kształtem zbliżone są do walca. Zasada działania elektrowni wiatrowej opiera się na obrocie wirnika wywołanym wpływem wiatru powodując powstanie siły bocznej działającej prostopadłe do kierunku siły wiatru, siła boczna jest tutaj odpowiednikiem siły nośnej (rys. 1b). Wirnik taki obraca się niemal trzy razy wolniej od tradycyjnych wirników, emitując przy tym znacznie mniej hałasu. Siłownie wiatrowe wykorzystujące efekt Magnusa wykazują się wyższą sprawnością przy niższych prędkościach wiatru [4].



Rys. 2. Trójłopatowa turbina wiatrowa o osi poziomej z rotorem Magnusa

Źródło: [10]

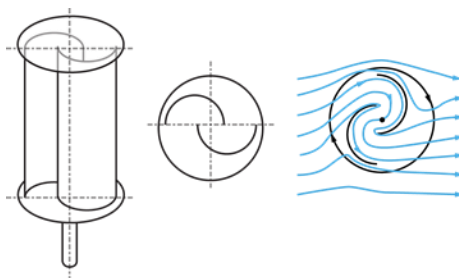
Turbiny wiatrowe typu VAWT charakteryzują się prostopadłą do powierzchni ziemi osią obrotu. Elektrownie tego typu są konstrukcjami małej mocy, pracującymi głównie jako przydomowe, dodatkowe źródło energii o mocy w zakresie $0,1 \div 10$ kW. Głównymi cechami charakteryzującymi turbiny VAWT są [5, 7]:

- brak mechanizmów ustawiających turbinę w kierunku wiatru – pracują niezależnie od kierunku wiatru,
- większy zakres pracy niż elektrowni o osi poziomej, zaczynają produkować prąd przy niższych prędkościach wiatru, w dodatku pracują nieprzerwanie aż do prędkości rzędu 40 m/s,
- nie generują hałasu,
- konstrukcja nie zawiera ruchomych elementów na zewnątrz turbiny co wpływa na wzrost niezawodności pracy urządzenia,
- niższy koszt inwestycyjny i eksploatacyjny w porównaniu do klasycznych konstrukcji,
- możliwość montażu zarówno na gruncie jak i na dachach budynków,
- zasadniczą wadą tego typu konstrukcji jest niska sprawność – średnio dwukrotnie mniejsza niż w turbinach o osi poziomej,

- siłownie wiatrowe o pionowej osi obrotu wymagają stosowania przekładni lub wolnobieżnych generatorów, ponieważ praca wirnika odbywa się przy niewielkich prędkościach obrotowych.

Najpopularniejsze konstrukcje elektrowni typu VAWT to turbiny: Savoniusa, Darrieusa oraz ich nieznaczne modyfikacje.

Turbina Savoniusa (rys. 3), wynaleziona w latach dwudziestych XX wieku, posiada wirnik przybliżony kształtem w przekroju poprzecznym do litery „S”. Ruch obrotowy wirnika jest możliwy poprzez działanie siły parcia wiatru na wewnętrzną (wklęsłą) część półcyindra. Występuje też siła hamowania powstająca na zewnętrznej części, jest ona jednak znacząco mniejsza od siły parcia. Powietrze przechodzące przez szczelinę pomiędzy dwoma półcyindrami zwiększa dodatkowo moc siły parcia. Turbina Savoniusa charakteryzuje się mniejszą wydajnością niż inne rodzaje turbin o tych samych wymiarach, jednak jej głównymi zaletami są prostota konstrukcji, moment startowy umożliwiający pracę przy bardzo słabych wiatrach oraz praktycznie bezgłośna praca samego wirnika.



Rys. 3. Turbina Savoniusa, rzut z góry, linie przepływu wiatru wewnątrz turbiny wiatrowej
Źródło: [19]

Modyfikacją turbiny Savoniusa jest turbina świderkowa (rys. 4). Różni się ona od typowej turbiny Savoniusa kształtem wirnika, który powoduje odmienny ruch powietrza przechodzącego przez turbinę.



Rys. 4. Wiatrowa turbina świderkowa
Źródło: [13]

Drugim najbardziej rozpowszechnionym typem siłowni wiatrowych o pionowej osi obrotu jest turbina Darrieusa (rys. 5). Turbina ta do napędu wirnika wykorzystuje siłę nośną powstałą w wyniku przepływu powietrza wokół parabolicznie wyprofilowanych łopat. Ze względu na wyższą wartość uzyskiwanej prędkości obrotowej wirnika (w porównaniu do turbiny Savioniusa) stwierdzić można, iż ten typ turbin charakteryzuje się większym potencjałem do zastosowań komercyjnych. Istotnymi wadami tego typu siłowni wiatrowych są ich gabaryty, a także bliska zeru wartość momentu startowego, w związku z czym konieczne jest jej wcześniejsze rozpędzenie. Do tego celu wykorzystuje się pomocnicze turbiny Savoniusa lub napęd elektryczny [9].



Rys. 5. Turbina Darrieusa z parabolicznymi łopatom

Źródło: [12]

Modyfikacją powyższego rozwiązania jest turbina H-Darrieus (rys. 6), polegająca na zastosowaniu równoległe do osi obrotu prostych łopat. Zasada działania tego typu turbiny jest analogiczna jak w przypadku turbiny Darrieusa, aczkolwiek praca turbiny rozpoczyna się przy znacznie mniejszych prędkościach wiatru, rzędu $1,5\div 4,0$ m/s [5]. Siłownie typu H-Darrieusa charakteryzują się wyższą sprawnością niż turbiny o parabolicznym kształcie łopat.



Rys. 6. Turbina Darrieusa typu H

Źródło: [23]

Z kolei modyfikacją siłowni wiatrowych typu H-Darrieus jest holenderska turbina – Turby (rys. 7). W miejscu łopat ustawionych równoległe do osi obrotu znajdują się łopaty w kształcie heliakalnym. Ze względu na swoją innowacyjną budowę wykorzystują wiatry wiejące z dowolnych kierunków. Turbina o mocy elektrycznej 2,5 kW przy prędkości wiatru wynoszącej około 4 m/s rozpoczyna pracę, maksimum mocy osiąga przy prędkości wiatru 14 m/s. Sprawność tego typu konstrukcji wynosi około 40%. Do jej zalet należy również cicha praca jak i niewrażliwość na zmiany kierunku wiatru [3].



Rys. 7. Turbina Turby

Źródło: [11]

Turbiny wiatrowe o nietypowym kształcie

W poniższym rozdziale przedstawione zostały siłownie wiatrowe o nietypowym kształcie, służące głównie do wytwarzania energii elektrycznej dla odbiorców indywidualnych. Wśród nich znajdują się m.in.:

- Turbina Helix,
- Turbina bębnowa,
- Turbina membranowa Windbelt,
- Turbina Energy Ball,
- Turbina Makani Power,
- Turbina Wind Tree.

Turbina wiatrowa Helix (rys. 8) – jest siłownią wiatrową powstałą na bazie turbiny świderkowej. Charakteryzuje się poprzecznie karbowaną powierzchnią łopat wirnika. Powszechnie stosowane turbiny charakteryzują się średnicą wirnika w zakresie 1,2÷1,8 m i mogą być montowane zarówno na wieżach (o wysokości pomiędzy 4,3 do 10,6 m) jak i na płaskich dachach. Zakres generowanej mocy przez tego typu siłownię wiatrową, w zależności od jej gabarytów zawiera się pomiędzy 2÷5 kW. Jak podaje producent, dla konstrukcji mocy 2 kW optymalna jest prędkość wiatru wynosząca 7 m/s oraz większa, natomiast uzysk mocy dla średniej rocznej prędkości 10 m/s wynosi około 4,5 MWh/rok. Model ten zapewnia niezwykle cichą pracę – emitowany hałas nie przekracza 5 dB powyżej szumu otoczenia. Powierzchnia czynna wirnika jest wykonana z tworzywa sztucznego. Jego kształt zapewnia pracę niezależnie od kierunku wiatru.



Rys. 8. Turbina wiatrowa Helix

Źródło: [16]

Turbina bębnowa

Konstrukcja turbiny pod nazwą handlową Zefir (ZVWT – Zephyr Vertical Wind Turbine) powstała na bazie turbiny wiatrowej typu Savioniusa. Turbina składa się

z dwóch elementów– wielołopatkowego wirnika, a także zamocowanej na zewnątrz współpracującej z nim kierownicy łopatkowej. Zwarta obudowa umożliwia tworzenie „segmentów” turbinowych poprzez ustawienie zespołów jeden na drugim. Pozwala to na instalowanie tego typu turbin w aglomeracjach miejskich, gdzie jest stosunkowo mało dużych i niezabudowanych przestrzeni. Konstrukcja wykazuje cechę samoregulacji prędkości obrotowej przy zmiennej sile i prędkości wiatru, oznacza to, że wartość produkowanej energii elektrycznej jest stała [1].



Rys. 9. Segmentowa turbina wiatrowa Zefir w miejscowości Kodeń (woj. lubelskie)

Źródło: [15]

Wdrożonym przykładem takiej elektrowni wiatrowej jest powstała w 2014 roku w miejscowości Kodeń (woj. lubelskie) 30-metrowy zespół składający się z trzech kolumn zawierających łącznie 27 turbin wiatrowych o sumarycznej mocy elektrycznej 0,5 MW (rys. 9).

Turbina membranowa Windbelt

Kolejnym rozwiązaniem umożliwiającym pozyskanie energii elektrycznej z wiatru jest turbina membranowa o handlowej nazwie Windbelt (rys. 10). Zasada działania takiej siłowni wiatrowej polega na oddziaływaniu siły wiatru na naprężoną membranę wprawiając ją w ruch drgający. Na końcu membrany znajdują się silne magnesy, których ruch pomiędzy cewkami wytwarza energię elektryczną. Siłownia wiatrowa charakteryzuje się niewielkimi wymiarami, a także możliwością łączenia w moduły.



Rys. 10. Turbina wiatrowa Windbelt

Źródło: [22]

Najmniejsze moduły Windbelt są wielkości telefonu komórkowego, a zakres ich pracy wynosi od 3 do 10 m/s. Dla przykładu przy wietrze wiejącym z prędkością 7,5 m/s siłownia wiatrowa tego typu osiąga moc 5 mW. Turbiny membranowe znajdują zastosowanie głównie w budownictwie, do zasilania systemów wentylacyjnych i oświetleniowych.

Turbina Energy Ball jest siłownią wiatrową o niekonwencjonalnym, kulistym kształcie mającym na celu wzrost wydajności produkcji energii elektrycznej przy ograniczeniu emisji hałasu wynikającego z pracy urządzenia. Energy Ball opiera się na zasadzie efektu Venturiego (wytworzenie podciśnienia). Jej budowa powoduje hamowanie wiatru wiejącego bezpośrednio na turbinę, co skutkuje zmniejszeniem ciśnienia wewnątrz niej. Następstwem tego zjawiska jest zasysanie wiatru opływającego konstrukcję napędzając jednocześnie łopaty (rys. 11). Rozruch następuje przy wietrze o prędkości $3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ natomiast zatrzymanie przy prędkości $20,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Moc wygenerowana przy średniej rocznej prędkości wiatru wynoszącej $7,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ wynosi 2200 kWh rocznie. Dla porównania – dla średniej rocznej prędkości $4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ jest to zaledwie 240 kWh rocznie. Rozwiązanie to jest dobre gospodarstw domowych o niewielkich potrzebach energetycznych. Proponuje się wykorzystanie jej także w stacjach przekąźnikowych czy też do zasilania samochodów elektrycznych [8].



Rys. 11. Turbina wiatrowa Energy Ball

Źródło: [17]

Turbina Makani Power

Kolejną, nietypową konstrukcję siłowni wiatrowej w 2013 roku zaproponowała firma Google. Projekt oddziału Google X pod nazwą Makani Power jest próbą implementacji instalacji opartych na odnawialnych źródłach energii w miejscach charakteryzujących się wysokim potencjałem energetycznym, ale niedostępnych dla konwencjonalnych siłowni wiatrowych. Zakres pracy urządzenia Makani wynosi od 80 do 250 metrów nad powierzchnią ziemi. Wygląd siłowni przypomina skrzydło z zainstalowanymi na jego powierzchni turbinami wiatrowymi (rys. 12), służącymi w początkowej fazie do wzniesienia urządzenia na odpowiedni pułap (wykorzystując zasilanie zewnętrzne) oraz produkcję energii elektrycznej. Makani porusza się po okręgu ze względu na przewód przesyłu energii. Jak podaje producent, elektrownia ta wykorzystuje 90% mniej materiałów potrzebnych do zbudowania konwencjonalnej elektrowni wiatrowej tej samej mocy. Turbina wiatrowa zaczyna produkować energię elektryczną przy prędkości wiatru około 4 m/s, prędkość maksymalna wynosi 20 m/s. Jak podaje producent porównuje swoje urządzenie z konwencjonalną, trójłopatową siłownią wiatrową o wysokości 150 m. charakteryzuje się współczynnikiem wykorzystania wiatru w wysokości 38%, tak Makani osiąga wartość tego współczynnika na wysokości 60%. Celem Google X jest budowa skrzydła o długości 70 m o mocy sięgającej 5 MW [6, 14].



Rys. 12. Latająca turbina wiatrowa Makani Power

Źródło: [20]

Turbiny Wind Tree

W 2011 roku firma NewWind z Francji stworzyła nietypowy zespół turbin wiatrowych o osi pionowej. Maszt tego zespołu tworzy stalowa konstrukcja rozłożystego drzewa, w których zamiast liści zainstalowano szereg modułów turbin wiatrowych o niewielkiej mocy (rys. 13). Zespół siłowni wiatrowych wzbudza się przy prędkości wiatru sięgającej 1,3 m/s, a produkcję energii przy prędkości wiatru około 2 m/s. Projektant określił zainstalowaną moc elektryczną na 4,1 kW przy zainstalowaniu 63 sztuk turbin wiatrowych na maszcie o wysokości 10 metrów i średnicy 8 metrów. Szacowana produkcja energii wynosi 2 400 kWh. Zaletami tego typu turbin jest ich nietypowy wygląd i cicha praca. Zostały stworzone w taki sposób, aby jak najlepiej integrować się z naturalnym otoczeniem. Takie działanie wpływa pozytywnie na odbiór odnawialnych źródeł energii przez społeczeństwo oraz przyczynia się do korzystnego wizerunku miast lub organizacji, które inwestują w tego typu rozwiązania.



Rys. 13. Latająca turbina wiatrowa Makani Power

Źródło: [21]

Przebieg i wynik badań

Czerpiąc inspirację z opisanych w części przeglądowej istniejących rozwiązań, zaprojektowano i wykonano w technologii druku przestrzennego trzy modele turbin o pionowej osi obrotu (rys. 14). Konstrukcje te, ze względu na kształty, zostały określone jako „gruszka”, „karambola” i „yin-yang”. Ostatnią z nich zbadano w wersji z przykryciem od góry i bez. Wymiary turbin zostały dobrane tak, aby każda z nich była wpasowana w walec o średnicy podstawy 9 cm i wysokości 10 cm. Pole powierzchni przekroju pionowego turbin wynosiło: „gruszka” – 69 cm², „karambola” – 77 cm², „yin-yang” – 90,0 cm².

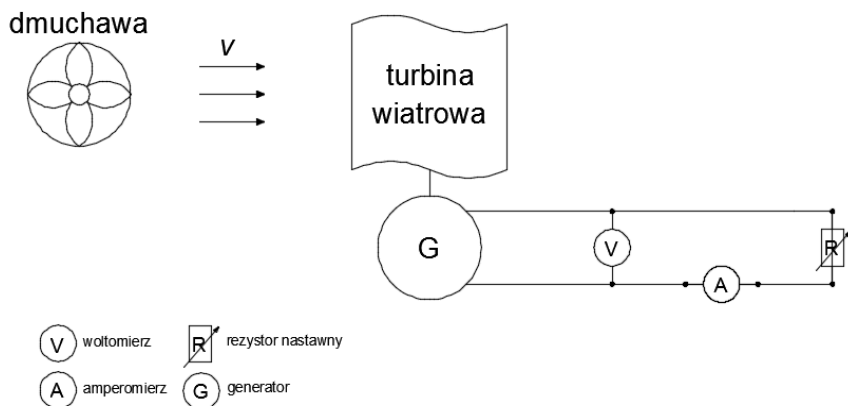


Rys. 14. Wykonane modele turbin wiatrowych (od lewej): „gruszka”, „karambola” oraz „yin-yang”

Źródło: Opracowanie własne

Celem przeprowadzonych pomiarów było porównanie stworzonych turbin pod względem osiąganego poziomu mocy i sprawności w ustalonych warunkach.

Badania wykonano z wykorzystaniem układu pokazanego na rys. 15.



Rys. 15 Schemat ideowy stanowiska badawczego

Źródło: Opracowanie własne

Badaną turbinę łączono z wałem generatora i umieszczano w zasięgu strugi powietrza generowanej przez dmuchawę. Uruchamiano dmuchawę i ustawiano jej obroty tak, aby uzyskać żadaną wartość prędkości strugi.

Generator obciążano rezystancyjnie w zakresie $R = 5 \div 115 \, \Omega$ i mierzono wartości natężenia prądu I i napięcia elektrycznego U na obciążeniu. Na tej podstawie wyznaczono charakterystyki obciążeniowe elektrowni wiatrowej.

Ponieważ wszystkie turbiny pracowały w tych samych warunkach i współpracowały z tym samym generatorem, różnice w osiągnięciach wynikają z samej konstrukcji turbin.

Warunki (przybliżone) panujące podczas pomiarów to: $p = 1013,25 \, \text{Pa}$, $T = 294,15 \, \text{K}$, $\varphi = 30\%$, gęstość powietrza wg tablic przyjęto $\rho_p = 1,201 \, \text{kg/m}^3$. Zdana prędkość wiatru wynosiła $v = 11 \, \text{m/s}$ (maksymalna osiągnięta przez urządzenie).

Teoretyczną dostarczoną moc N_w , strumienia powietrza przepływającego przez płaszczyznę pionowego przekroju wirnika (jej pole zostało wyznaczona na etapie projektowania) obliczono korzystając z następującej zależności:

$$N_w = \frac{1}{2} \rho_p \cdot S \cdot v_w^3 \quad (1)$$

gdzie:

ρ_p – gęstość powietrza w warunkach pomiarowych, kg/m^3 ;

S – powierzchnia przekroju wirnika, m^2 ;

v_w – prędkość wiatru, m/s .

Pole powierzchni przekroju wirnika zostało wyznaczona na etapie projektowania.

Uzyskana moc prądu stałego N_{el} , W oraz rzeczywista rezystancja obciążenia R , Ω wyznaczone zostały wg zależności:

$$N_{el} = U \cdot I \quad (2)$$

$$R = \frac{U}{I} \quad (3)$$

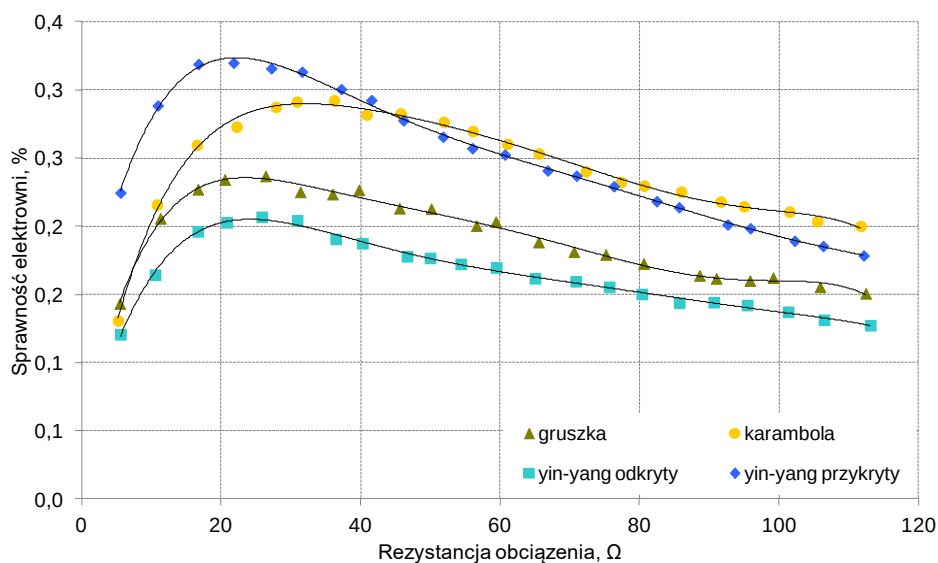
gdzie:

U – napięcie elektryczne, V;

I – natężenie prądu, A.

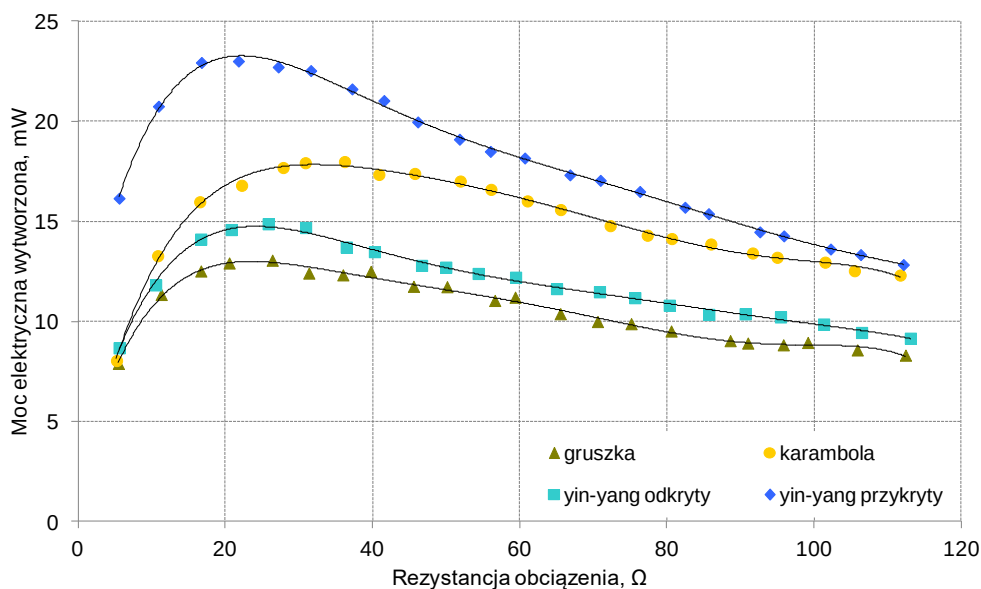
Sprawność turbiny η , % obliczono jako stosunek mocy uzyskanej do teoretycznej mocy wiatru:

$$\eta = \frac{N_{el}}{N_w} \quad (4)$$



Rys. 16. Charakterystyka sprawności elektrowni wyposażonej w badane turbiny

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 17. Charakterystyka mocy elektrowni wyposażonej w badane turbiny

Źródło: Opracowanie własne

Tab. 1 Zestawienie parametrów i wyników pomiarów

Typ turbiny	Pole powierzchni przekroju S	Moc dostarczona strumienia powietrza N_w	Maksymalna moc wytworzona N_{elmax}	Maksymalna uzyskana sprawność η_{max}
	cm ²	mW	mW	%
„gruska”	69	5515	13,1	0,24
„karambola”	77	6154	18,0	0,29
„yin-yang” odkryty	90	7193	14,9	0,21
„yin-yang” przykryty	90	7193	23,0	0,32

Źródło: Opracowanie własne

Podsumowanie

Dla wszystkich turbin wyznaczone zostały charakterystyki obciążeniowe: sprawności (rys. 16) oraz mocy wytworzonej (rys. 17). W przebiegu charakterystyk wyraźnie widoczny jest punkt maksymalnej mocy (dopasowania energetycznego), jego położenie dla wszystkich elektrowni jest zbliżone. W tym punkcie odczytane są maksymalne wartości mocy i sprawności użyte do porównania w tabeli 1.

Miarodajnym wyznacznikiem pozwalającym porównać turbiny jest sprawność elektrowni (należy jednak pamiętać, że wpływ na nią mają też straty w generatorze i innych elementach). Spośród badanych największą sprawność maksymalną osiągnęła turbina „yin-yang” z przykryciem. Nieco mniejszą sprawność maksymalną (ale za to większą przy obciążeniach rezystancją wyższą od optymalnej) osiągnęła turbina „karambola”. Mniej sprawna od niej była turbina „gruszka”, najmniej zaś turbina „yin-yang” bez przykrycia. W przypadku tej ostatniej znaczący spadek sprawności w stosunku do wersji przykrytej związany mógł być z zaburzeniami przepływu na odkrytym szczycie turbiny.

Przy porównaniu pod względem wytworzonej mocy maksymalnej uzyskano inną kolejność. Największą moc miała turbina „yin-yang” z przykryciem, następnie „karambola”, potem „yin-yang” bez przykrycia, a na końcu „gruszka”. Moc wytworzona nie może być wprost użyta do porównania, ponieważ turbiny mają różne pole powierzchni przekroju pionowego, a co za tym idzie, różna jest moc oddziałującej strugi wiatru.

Natomiast przyjmując jako kryterium porównawcze jednakową wielkość walca w przestrzeni zajmowanego przez wszystkie turbiny ($d = 9$ cm, $h = 10$ cm), można uznać, że osiągnięta moc stanowi miarę efektywności wykorzystania dostępnej przestrzeni.

Ogólnie badane turbiny miały niewielką sprawność, co wynikało z ich modelowego charakteru i braku optymalizacji pod względem aerodynamiki (dodatkowo stosunkowo niewielką sprawność miał też wykorzystywany w badaniach generator). Projektując i wykonując turbiny tego typu rzeczywistej skali możliwe jest osiągnięcie lepszych rezultatów.

Podziękowanie



Autorzy pracy składają serdeczne podziękowania firmie 3dl.tech, a w szczególności Panu Emilowi Najczukowi za nieodpłatne wykonanie modeli turbin wiatrowych do celów naukowych.

Literatura

- [1] Boczar T., *Energetyka Wiatrowa. Aktualne możliwości wykorzystania*, Wydawnictwo Pomiar Automatyka Kontrola 2008. ISBN: 978-83-926319-8-9.
- [2] Lewandowski W.M., *Proekologiczne odnawialne źródła energii*, WNT 2007, wyd. 4 uaktualnione. ISBN 978-83-204-3339-5.
- [3] Mols. B., *Turby – Sustainable Urban wind Power from the roof top*, 2005.
- [4] Nalepa K., Miąskowski W., Pietkiewicz P., Piechocki J., Bogacz P., *Poradnik małej energetyki wiatrowej*, Olsztyn 2011.
- [5] Romański L., *Odnawialne Źródła Energii*, Oficyna Wydawnicza ATUT, Wrocław 2013.
- [6] Singh T., *Makani's Wing 7 flying wind turbine can harness stronger winds at higher altitudes*, Inhabitat 2011.
- [7] Tytko R., *Odnawialne źródła energii*, OWG, Warszawa 2009, ISBN 978-83-928382-0-3.
- [8] Wagner S., *Venturi inspires Energy Ball*, TheEngineer, 2008.
- [9] Wolańczyk F., *Elektrownie wiatrowe.*, KaBe Krosno 2009. ISBN 978-83-89387-79-0.
- [10] http://1.bp.blogspot.com/_IL1ueu1Vu0/VVEXyfF2zDI/AAAAAAAAADc/I7J_o3-3PvQ/s1600/DSCN2159.JPG, [online], [data wejścia: 24.02.2017].
- [11] http://cdn6.bigcommerce.com/s-7wpeis/products/2102/images/1077/turby_large__59585.1407221752.500.750.png?c=2, [online], [data wejścia: 24.02.2017].
- [12] <http://eas.itc.pw.edu.pl/wp-content/uploads/2012/04/7.png>, [online], [data wejścia: 24.02.2017].
- [13] <http://eas.itc.pw.edu.pl/wp-content/uploads/2012/04/9.png>, [online], [data wejścia: 24.02.2017].
- [14] <http://google.com/makani>, [online], [data wejścia: 24.02.2017].
- [15] http://g0.forsal.pl/p/_wspolne/pliki/1913000/1913027-pionowa-elektrownia-wiatrowa-5.jpg, [online], [data wejścia: 24.02.2017].
- [16] <http://inhabitat.com/helix-wind-turbine-small-wind-gets-smart/helix8jpg/>, [online], [data wejścia: 24.02.2017].
- [17] <http://media.treehugger.com/assets/images/2011/10/energy-ball-wind-turbine-1.jpg>, [online], [data wejścia: 24.02.2017].
- [18] <http://oze.gep.com.pl/wp-content/uploads/2014/08/repower-wind-turbines-1024x733.jpg>, [online], [data wejścia: 24.02.2017].
- [19] <http://www.oze.otwartaskola.edu.pl/Biblioteka/Artyku%C5%82y/Turbinyopionowejosiobrotu.aspx>, [online], [data wejścia: 24.02.2017].
- [20] <https://labiomasa.files.wordpress.com/2013/05/makani-awt.jpg>, [online], [data wejścia: 24.02.2017].

- [21] <https://offgridworld.com/wp-content/uploads/2015/01/wind-tree-wind-turbine-3100-watt-wind-turbine.jpg>, [online], [data wejścia: 24.02.2017].
- [22] <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/48/13/13/481313e6dd24887de0fb3947b63a1f7d.jpg>, [online], [data wejścia: 24.02.2017].
- [23] https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/4/41/D%C3%BClmen_Hannorup_-_H-Darrieus_01_ies.jpg, [online], [data wejścia: 24.02.2017].

Kamila Habiera¹⁾, dr inż. Arkadiusz Dyjakon²⁾

¹⁾ Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wydział Przyrodniczo-Technologiczny, SKN BioEnergia, ul. C. K. Norwida 25, 50-375 Wrocław, Polska

²⁾ Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Inżynierii Rolniczej, Zakład Niskoemisyjnych Źródeł Energii i Gospodarki Odpadami, ul. Chełmońskiego 37a, 51-630 Wrocław, Polska

¹⁾ kamila.habiera@gmail.com

²⁾ arkadiusz.dyjakon@up.wroc.pl

ANALIZA TECHNICZNO – EKONOMICZNA PODGRZEWANIA POWIETRZA WENTYLACYJNEGO O NISKIEJ TEMPERATURZE

Technical and economical analysis of air heating
at low temperature in ventilation

Słowa kluczowe: wentylacja, rekuperacja, pompa ciepła, gruntowy wymiennik ciepła, nagrzewnica elektryczna

Keywords: ventilation, recuperation, heat pump, ground heat exchanger, electric heater

Streszczenie:

Nowoczesne budownictwo dąży do maksymalnego obniżenia strat energii z budynków. Konsekwencją tego trendu jest powstawanie nowych obiektów energooszczędnych, pasywnych, a nawet zeroenergetycznych, jak również modernizacja budynków już istniejących. Co więcej, w Polsce do roku 2021 wszystkie nowopowstające domy mają spełniać wymogi budynku energooszczędnego. Kluczowym systemem w tego typu budownictwie jest system wentylacji z rekuperacją. Instalacja

cja takiego układu pozwala odzyskać około 80% energii zawartej w wywiewanym powietrzu. Istotą działania rekuperacji jest wykorzystanie ciepłego powietrza wywiewanego z domu do podgrzania świeżego powietrza nawiewanego, pobieranego z czerpni znajdującej się na zewnątrz budynku. Prawidłowe działanie rekuperatora jest możliwe, gdy dostarczane do urządzenia powietrze ma dodatnią temperaturę. Ujemne wartości temperatury powodują skraplanie i zamarzanie wody w urządzeniu, uniemożliwiając tym samym jego pracę. Korzystanie z systemu wentylacji z odzyskiem ciepła w zimie możliwe jest dzięki połączeniu systemu rekuperacji z urządzeniami wstępnego nagrzewania powietrza.

Celem pracy jest analiza techniczno-ekonomiczna podgrzewania powietrza, dostarczanego do rekuperatora, o temperaturze -20°C do temperatury $+1^{\circ}\text{C}$. Porównano koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne trzech wybranych systemów wstępnego ogrzewania powietrza dla domu pasywnego o powierzchni 200 m^2 . Analizie poddano elektryczną nagrzewnicę wstępną, gruntowy wymiennik ciepła i gruntową pompę ciepła. Zwrócono także uwagę na efekt środowiskowy rozpatrywanych rozwiązań w budynku.

Wstęp teoretyczny

Obecnie, coraz większą uwagę zwraca się na jakość powietrza atmosferycznego, które wpływa bezpośrednio na zdrowie i życie ludzi. Do zwiększenia zanieczyszczeń w powietrzu przyczyniają się w głównej mierze takie czynniki antropogeniczne, jak przemysł, transport (wodny, lądowy i powietrzny) oraz ciepłownictwo. Największym zagrożeniem są zanieczyszczenia w postaci pyłów zawieszonych (aerozoli) w powietrzu atmosferycznym [1]. Do koncentracji zanieczyszczeń o charakterze lokalnym czy zjawiska smogu w aglomeracjach miejskich przyczyniają się stosowane w gospodarstwach domowych w celach grzewczych kotły, piece oraz różnej klasy kominki. W przypadku stosowania tego typu instalacji, kluczowym wskaźnikiem decydującym o ilości emitowanych zanieczyszczeń do atmosfery jest jakość i rodzaj spalnego paliwa. Spalanie w kotłach domowych, niskiej jakości, szczególnie węgla kamiennego, powoduje uwalnianie do atmosfery dużych ilości pyłów PM_{10} i $\text{PM}_{2,5}$. Kotły dużych mocy, stosowane w elektrowniach i elektrociepłowniach, mają obowiązek stosowania filtrów i elektrofiltrów ograniczających tę emisję do minimum. Niestety, urządzenia grzewcze spalające paliwa w domach jednorodzinnych nie posiadają takiego obowiązku, co powoduje znaczną emisję zanieczyszczeń do atmosfery [2]. Najgroźniejsze są pyły o wielkości cząstek poniżej $\text{PM}_{2,5}$, gdyż stosunkowo łatwo przedostają się do układu oddechowego człowieka powodując choroby nowotworowe i inne schorzenia. Niestety szacuje się, że w najbliższych latach stężenie tych pyłów, między innymi w Polsce, wciąż będzie wysokie, szczególnie na południu kraju i w dużych miastach, co obrazuje rysunek 1.

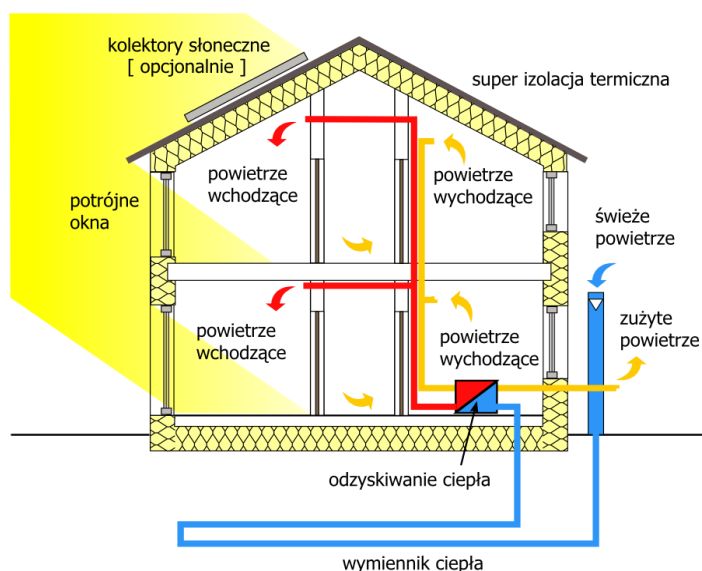


Rys. 1. Szacowane stężenie pyłów PM_{2,5} na terenie Polski w 2020 roku

Źródło: <http://powietrze.gios.gov.pl>

Za główną przyczynę powstawania smogu uważa się systemy grzewcze mieszkań i domów oparte o konwencjonalne paliwa stałe oraz dużą energochłonność budynków. Rozwiązaniem ograniczającym zużycie energii oraz emisję zanieczyszczeń do atmosfery przez gospodarstwa domowe jest budownictwo niskoenergetyczne, pasywne czy zeroemisyjne. Cechą klasyfikującą budynek jako pasywny jest nieprzekroczenie zapotrzebowania na energię potrzebną do ogrzania w ilości $15 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{rok}^{-1}$. Jest to ilość energii powstająca ze spalenia około 2,3 kg węgla kamiennego dobrej jakości. Należy zaznaczyć, że zapotrzebowanie na energię przez budownictwo pasywne jest ponad czterokrotnie niższe od budynków standardowych. Budynki pasywne ograniczają zużycie energii na ogrzewanie przez zwiększenie izolacji, eliminację mostków cieplnych, zachowanie szczelności budynku oraz odzysk ciepła. Dodatkowym warunkiem niezbędnym dla zapewnienia niskiego zużycia energii dla celów grzewczych budynku pasywnego jest zastosowanie systemu mechanicznej wentylacji z odzyskiem ciepła – rekuperacji. System ten pozwala na wymianę powietrza w całym budynku, dla zapewnienia komfortu osób przebywających wewnątrz, jednocześnie odzyskując ciepło z powietrza usuwanego na zewnątrz. Najbardziej efektywne systemy pozwalają na wymianę powietrza z ponad 80% sprawnością odzysku ciepła z powietrza wywiewanego z budynku. Uproszczony schemat działania na rysunku 2 pokazuje istotę działania rekuperatora. Powietrze dostaje się do wnętrza budynku przez czerpnię znajdującą się na zewnątrz,

następnie trafia do rekuperatora (wymniennika), w którym ogrzewane jest powietrze ciepłym zaczerpniętym wewnątrz budynku. Powietrze zużyte po oddaniu energii zostaje wyprowadzone na zewnątrz. Zaletą stosowania rekuperatora w budynku pasywnym jest zastąpienie centralnego ogrzewania, ponieważ zapotrzebowanie na ciepło w takim budynku jest niewielkie. Dodatkowe ciepło, które w niewielkim stopniu jest tracone, efektywnie można dostarczyć wraz z powietrzem nawiewanym. Źródłami ciepła dla domów pasywnych jest promieniowanie słoneczne ogrzewające ściany i dach budynku, jak również czynności wykonywane w domu takie jak gotowanie, użytkowanie ciepłej wody czy nawet użycie suszarki do włosów [4].



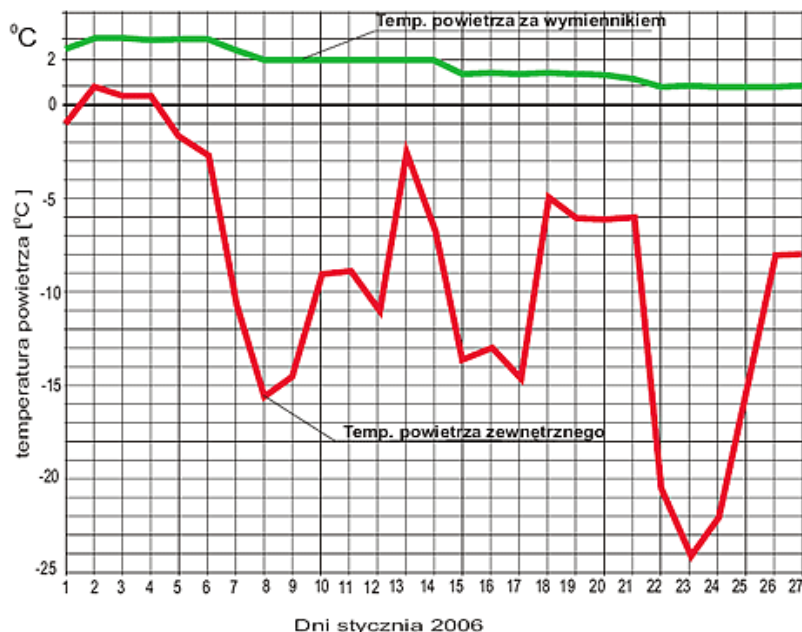
Rys. 2. Schemat wymiany powietrza w budynku z systemem rekuperacji

Źródło: http://www.bramyoknadrzwi.pl/Dom_pasywny_-_co_to_jest,4349.html

Warunkiem prawidłowego działania rekuperatora jest dostarczenie świeżego powietrza o dodatniej temperaturze. W przypadku dostarczania powietrza o temperaturze ujemnej, znajdujące się wewnątrz centrali skropliny ulegną zamrożeniu. Powstający wówczas lód powoduje znaczne straty w odzysku ciepła, nie usunięty może doprowadzić do całkowitego zablokowania układu i tym samym awarii systemu wentylacji. Aby uniknąć wszelkich niedogodności związanych z zatrzymaniem pracy urządzenia, mechaniczną wentylację z odzyskiem ciepła łączy się z dodatkowymi systemami lub urządzeniami podnoszącymi temperaturę powietrza nawiewanego [5].

Gruntowy wymiennik ciepła jest jednym z systemów umożliwiających wstępne ogrzanie powietrza dostarczanego zimą do rekuperatora (rys. 3). Wymiennik

wykorzystuje naturalne ciepło zakumulowane w gruncie na głębokości średnio 2-3 metrów. Dodatkowo, gdy centrala wentylacyjna wyposażona jest w by-pass (przewód omijający rekuperator) GWC może pełnić funkcję klimatyzatora w sezonie letnim [6].



Rys. 3. Temperatura pracy gruntowego wymiennika ciepła w okresie zimowym

Źródło: <http://www.warebud.pl/oferta/gruntowe-wymienniki-ciepła/>

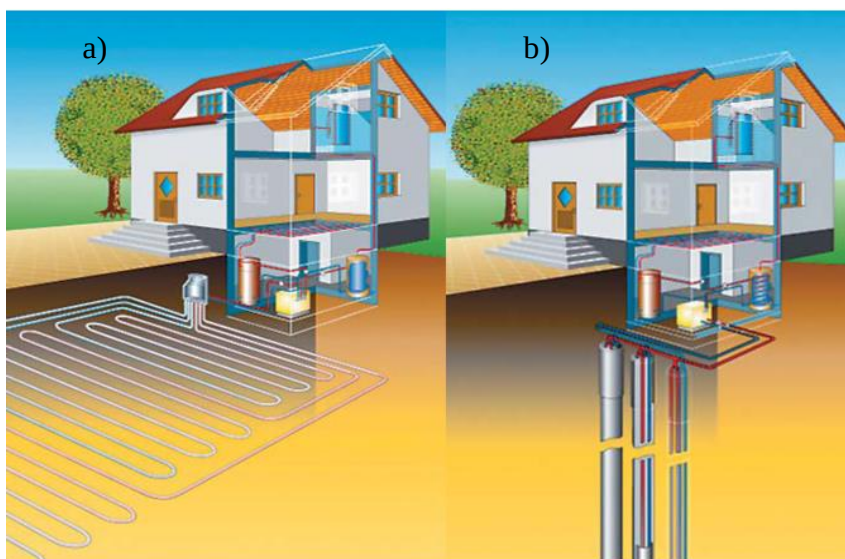
Wyróżnia się następujące rodzaje gruntowych wymienników ciepła:

- rurowe – gdzie przepływ medium (najczęściej powietrza) odbywa się przez rury umieszczone na odpowiedniej głębokości pod ziemią,
- żwirowe – w których powietrze przepływa przez specjalnie przygotowaną warstwę żwiru i kamieni znajdującą się pod ziemią,
- płytowe – przepływ powietrza odbywa się między płytą, a gruntem,
- żwirowo-wodne – w których powietrze przepływa przez rury aluminiowe zasypane od zewnątrz żwirem i zalane wodą.

Kolejnym systemem niskoemisyjnym wykorzystywanym w celach grzewczych (w instalacjach ciepłej wody użytkowej (c.w.u.), ogrzewania centralnego (c.o.) lub w systemie wentylacji budynków) jest pompa ciepła. Działanie pompy ciepła polega na przeniesieniu ciepła występującego lub zmagazynowanego w dolnym źródle (powietrzu, wodzie, gruncie) do górnego źródła (instalacji grzewczej w budynku) przy wykorzystaniu czynnika pośredniego o niskiej temperaturze wrzenia i pracy

sprężarki. Wyróżnia się trzy główne typy pomp ciepła, zależne od wykorzystywanego źródła ciepła [7].

Najprostsze powietrzne pompy ciepła czerpią energię z powietrza zewnętrznego ogrzewanego w sposób naturalny. Największe uzyski ciepła możliwe są w sezonie wiosenno-letnio-jesiennym, kiedy temperatura zewnętrzna jest wystarczająco wysoka do podgrzewania między innymi ciepłej wody użytkowej lub ogrzewania podłogowego. Niestety, w okresie zimowym ten rodzaj pompy jest nieefektywny ze względu na dużą różnicę w temperaturze źródła górnego i dolnego. Problem ten nie występuje w gruntowej pompie ciepła, która wykorzystuje energię zakumulowaną w gruncie. Wyróżnia się pompy pionowe, które wykorzystują ciepło od 15 metrów w głąb gruntu, jak również pompy poziome, umieszczane średnio na głębokości 1,5 metra, oba rodzaje pomp ciepła obrazuje rysunek 4.



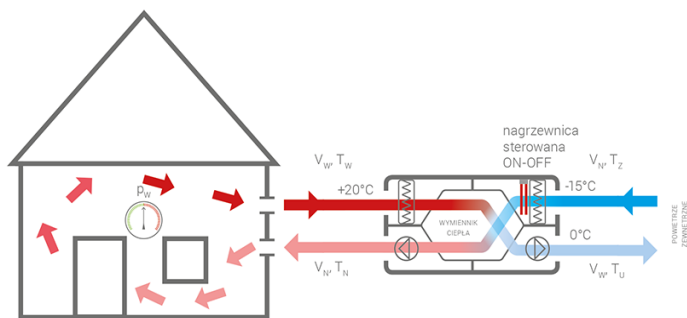
Rys. 4. Schemat instalacji z wykorzystaniem pompy ciepła: a) kolektor płaski, b) sonda pionowa

Źródło: <http://www.energyre.pl/przewaga-pompy-ciep322a-nad-innymi-sposobami-ogrzewania.html>

Trzecią grupę stanowią pompy ciepła pozyskujące energię z wody. Źródło ciepła stanowić mogą wody głębinowe, do których dostęp możliwy jest przez studnie, oraz stawy, jeziora czy przepływająca rzeka. Dostarczone ciepło wykorzystane może zostać do ogrzania wody – pompa ciepła typu woda – woda lub podgrzewania powietrza – pompa typu woda – powietrze [8].

Powietrze dostarczane do rekuperatora może być podgrzewane również przez elektryczną nagrzewnicę wstępną, przedstawioną na rysunku 5. Jest to najczęściej wykorzystywany sposób ze względu na prosty montaż i niewielki koszt zakupu. W kanale doprowadzającym świeże powietrze umieszcza się nagrzewnicę zbud-

waną najczęściej ze spirali, która ogrzewa powietrze o temperaturze ujemnej do temperatury dodatniej zapobiegając tym samym awarii rekuperatora, związanej z zamarzaniem wody zawartej w wilgotnym powietrzu. Wadą korzystania z nagrzewnicy elektrycznej jest jej wysoki koszt eksploatacji, oraz niekorzystny wpływ na środowisko związany z wysokim zużyciem energii elektrycznej pochodzącej z sieci elektroenergetycznej.



Rys. 5. Schemat systemu rekuperacji z zainstalowaną nagrzewnicą wstępną

Źródło: <http://thesslagreen.com/features/system-zabezpieczenia-wymiennika-ciepła-przed-zamrozeniem-kondensatu-fpx>

Celem pracy jest analiza ekonomiczna oraz środowiskowa instalacji umożliwiającej w okresie zimowym wstępne podgrzanie powietrza o ujemnej temperaturze

(-20°C) do temperatury dodatniej, które doprowadzane jest następnie do układu mechanicznej wentylacji z odzyskiem ciepła – rekuperacji.

Metodyka badawcza

W pracy wybrano trzy możliwe źródła wstępnego ogrzewania powietrza wentylacyjnego, dostarczanego do systemu rekuperacji, w budynku pasywnym. Wybrane instalacje to gruntowy wymiennik ciepła, pompa ciepła i nagrzewnica elektryczna. Analizy dokonano w oparciu o następujące założenia:

- powierzchnia domu, $P = 200 \text{ m}^2$,
- liczba mieszkańców: 5 osób,
- wysokość pomieszczeń, $h = 2,75 \text{ m}$,
- III strefa klimatyczna Polski,
- grunty wilgotne, gliniaste,
- temperatura powietrza zewnętrznego, $T_1 = -20^{\circ}\text{C}$,
- temperatura powietrza dostarczanego do rekuperatora, $T_2 = 1^{\circ}\text{C}$,
- średnia gęstość powietrza, $\rho_{\text{pow}} = 1,32 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,

- ciepło właściwe powietrza, $c_p = 1,009 \text{ kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,
- strumień powietrza nawiewanego, $q_m = 320 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, tabela 1,
- cena energii elektrycznej, $Z_{EL} = 0,54 \text{ PLN} \cdot \text{kWh}^{-1}$,

Tabela 1. Wielkość strumienia powietrza nawiewanego w budynku

Pomieszczenie	Powierzchnia pomieszczenia, m^2	Kubatura pomieszczenia, m^3	Strumień powietrza nawiewanego, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$	Częstotliwość wymiany powietrza, h^{-1}	Suma strumienia nawiewanego q_m , $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$
Salon	50,0	137,5	140	1,0	320
Pokój do nauki	12,5	34,38	35	1,0	
Gabinet/pokój gościnny	15,0	41,25	40	1,0	
Sypialnia 1	20,0	55,0	55	1,0	
Sypialnia 2	18,0	49,5	50	1,0	

Źródło: Opracowanie własne na podstawie normy PN-83/B-03430

Dobór Gruntowego Wymiennika Ciepła

W celu dokonania analizy przyjęto, że temperatura zewnątrz $T_{zw} = -20^\circ\text{C}$ zostanie ogrzana do temperatury $T_{we} = 1^\circ\text{C}$, w rurowym gruntowym wymienniku ciepła umieszczonym na głębokości 1,5 metra. Na podstawie [9] wyznaczono długość wymiennika wynoszącą $L_{GWC} = 83 \text{ m}$ o średnicy $d_{GWC} = 0,2 \text{ m}$.

- Obliczenie wymaganej mocy grzewczej GWC, N_{GWC} :

$$N_{GWC} = \frac{q_m \cdot c_p \cdot \rho_{pow} \cdot (T_1 - T_2)}{3600} \quad (1)$$

gdzie:

N_{GWC} – moc grzewcza GWC, kW,

q_m – strumień powietrza nawiewanego, $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$,

c_p – ciepło właściwe powietrza w wymienniku, $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,

ρ_{pow} – średnia gęstość powietrza w wymienniku, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$,

T_1 – temperatura powietrza zewnętrznego (przed wymiennikiem GWC), $^\circ\text{C}$,

T_2 – temperatura powietrza dostarczanego do rekuperatora (za wymiennikiem GWC), $^\circ\text{C}$.

stąd:

$$N_{GWC} = \frac{320 \cdot 1,009 \cdot 1,32 \cdot (1 - (-20))}{3600} = 2,49 \approx 2,5 \text{ kW}$$

Na podstawie powyższych obliczeń dobrano wentylator o parametrach przedstawionych w tabeli 2.

Tabela 2. Dane techniczne wentylatora

VENT 150B	Wartość
Prędkość obrotowa	2100 obr·min ⁻¹
Maksymalny pobór mocy	70 W
Natężenie	0,30 A
Napięcie	230 V
Maksymalna wydajność	560 m ³ ·h ⁻¹
Maks. temperatura otoczenia	60 °C
Regulator, REB-1	46
Waga	5,0 kg

Źródło: <http://www.centrumklima.pl/pl,produkty-wentylacja-klimatyzacja,13,152,979,vent-150b-vent-150l.html>

- Określenie kosztów budowy GWC, K_{GWC} :

Na podstawie dokonanych obliczeń dobrano odpowiednie urządzenia oraz dokonano wyceny ich zakupu i montażu.

Tabela 3. Koszty budowy instalacji Gruntowego Wymiennika Ciepła

Koszt materiałów	Koszt, PLN
Wentylator	452
Czerpnia (AWADUKT Thermo)	2020
Przewody (rury zwykłe PCV)	4383
Koszt robocizny	
Prace ziemne i montażowe	3000
Razem	9855

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [10]

Dobór Pompy Ciepła

W obliczeniach założono moc grzewczą pompy ciepła równą mocy gruntowego wymiennika ciepła wynoszącą $N_{PO} = N_{GWC} = 2,5$ kW. Założono instalację gruntowej pompy ciepła z poziomym kolektorem umieszczonym na głębokości 1,5 m. Ze względu na stosunkowo niskie zapotrzebowanie na ciepło nie znaleziono gruntowej pompy ciepła o mocy projektowej, dlatego niezbędnych obliczeń dokonano dla pompy ciepła o wyższej mocy grzewczej (tabela 4). W celu oszacowania kosztów pompy ciepła dla mocy projektowej zastosowano wskaźnik odniesienia wartości mocy wybranej pompy do wartości mocy projektowej wynoszący 0,45.

Tabela 4. Dane techniczne pompy ciepła

Vikersonn Bjørn 6	
Pobór mocy elektrycznej	1,3 kW
Moc grzewcza	5,5 kW
COP	4,4
Wymagane zabezpieczenie prądowe	C 20 A

Źródło: <http://vikersonn.eu/pompa-ciepla-cennik/Vikersonn-Bjorn-6-gruntowa-pompa-ciepla>

- Obliczenie mocy elektrycznej pompy ciepła N_{EL} :

$$N_{EL} = \frac{N_{PC}}{COP} \quad (2)$$

gdzie:

N_{EL} – moc elektryczna pompy ciepła, kW,

N_{PC} – moc grzewcza pompy ciepła (przyjęto $N_{PC} = 2,5$ kW), kW,

COP – współczynnik efektywności pompy ciepła (przyjęto $COP = 4,4$, tabela 4), -
stąd:

$$N_{EL} = \frac{2,5}{4,4} = 0,59$$

- Obliczenie mocy dolnego źródła, N_{CH} :

$$N_{CH} = N_{PC} - N_{EL} \quad (3)$$

gdzie:

N_{CH} – moc dolnego źródła ciepła, kW,

N_{PC} – moc grzewcza pompy ciepła (przyjęto $N_{PC} = 2,5$ kW), kW,

N_{EL} – moc elektryczna pompy ciepła (przyjęto $N_{EL} = 0,59$ kW), kW.

stąd:

$$N_{CH} = 2,5 - 0,59 = 1,91 \text{ kW}$$

- Obliczenie długości kolektora poziomego pompy ciepła L_{PC} :

$$L_{PC} = \frac{N_{CH}}{N_G} \quad (4)$$

gdzie:

L_{PC} – długości kolektora poziomego pompy ciepła, m,

N_{CH} – moc dolnego źródła ciepła, kW,

N_G – wskaźnik ciepła gruntu (przyjęto $N_G = 15 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1}$, [11]), $\text{W} \cdot \text{m}^{-1}$,
stąd:

$$L_{PC} = \frac{1910}{15} = 127 \text{ m}$$

- Obliczenie kosztów budowy kolektora poziomego pompy ciepła, K_{PC} :

$$K_{PC} = L_{PC} \cdot K_{bud_PC} \quad (5)$$

gdzie:

K_{PC} – koszt budowy kolektora poziomego pompy ciepła, PLN,

L_{PC} – długości kolektora poziomego pompy ciepła, m,

K_{bud_PC} – jednostkowy koszt budowy kolektora poziomego pompy ciepła, $\text{PLN} \cdot \text{m}^{-1}$
(przyjęto $K_{bud_PC} = 25 \text{ PLN} \cdot \text{m}^{-1}$).

stąd:

$$K_{PC} = 127 \cdot 25 = 3175 \text{ PLN}$$

- Wyznaczenie kosztów budowy instalacji PC:

Tabela 5. Koszty budowy instalacji gruntowej pompy ciepła

Koszt materiałów	Koszt, PLN
Kolektor poziomy	3175
Pompa Ciepła	8413
Koszt montażu	
Prace ziemne i montażowe	2500
Razem	13818

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [12]

Dobór Wstępnej Nagrzewnicy Elektrycznej (WNE)

Moc grzewczą nagrzewnicy elektrycznej N_{WNE} przyjęto na podstawie wcześniejszych obliczeń (wzór 1), stąd $N_{WNE} = N_{PC} = N_{GWC} = 2,5 \text{ kW}$. Parametry dobranej nagrzewnicy przedstawiono w tabeli 6.

Tabela 6. Charakterystyka pracy nagrzewnicy elektrycznej

Venture Industries DH-200/25 S	
Moc elektryczna	2,5 kW
Moc grzewcza	2,5 kW
Napięcie	230 V
Temperatura pracy	-20 – 40 °C

Źródło: http://www.venture.pl/nagrzewnice/nagrzewnice-kanalowe/dh/dh_200_25

- Określenie kosztów budowy WNE, K_{WNE} :

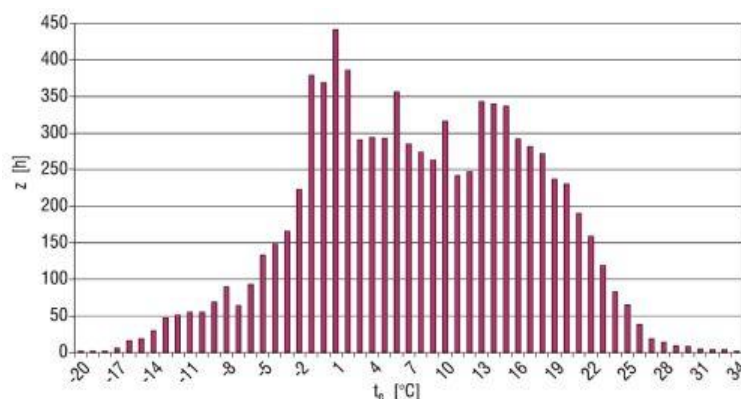
Tabela 7. Koszty instalacji nagrzewnicy elektrycznej

Koszt materiałów	Koszt, PLN
Nagrzewnica elektryczna	502
Koszt montażu	
Montaż	180
Razem	682

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [13]

Obliczenie kosztów eksploatacji urządzeń

Na podstawie wykresu częstotliwości występowania określonej temperatury w roku (rys. 6) wyznaczono ilość godzin w zakresie temperatury od -20°C do $+1^{\circ}\text{C}$. Następnie obliczono (wzór 6) roczne wykorzystanie energii przez pracujące urządzenia w zainstalowanych źródłach wstępnego ogrzewania powietrza (tabela 8).



Rys. 6. Częstotliwość występowania określonej temperatury w roku

Źródło: <http://www.rynekinstalacyjny.pl/artukul/id115,wspolpraca-wentylacji-mechanicznej-z-gwc-w-budynku-pasywnym/>

- Obliczenie kosztów zużycia energii elektrycznej podczas eksploatacji wybranej instalacji wstępnego ogrzewania powietrza:

$$K_{ROK} = E_{EL} \cdot Z_{EL} \quad (6)$$

gdzie:

K_{ROK} – koszt zużycia energii elektrycznej podczas eksploatacji wybranej instalacji, PLN·rok⁻¹,

E_{EL} – ilość zużytej energii elektrycznej przez daną instalację, kWh·rok⁻¹.

Z_{EL} – cena energii elektrycznej (przyjęto $Z_{EL} = 0,54 \text{ PLN} \cdot \text{kWh}^{-1}$), $\text{PLN} \cdot \text{kWh}^{-1}$,

Tabela 8. Roczne koszty eksploatacji instalacji wstępnego nagrzewania powietrza wentylacyjnego

T , °C	τ , h	Gruntowy wymiennik ciepła			Pompa ciepła			Nagrzewnica elektryczna		
		N_{EL_GWC} , kW	E_{EL_GWC} , kWh	K_{ROK_GWC} , PLN	N_{EL_PC} , kW	E_{EL_PC} , kWh	K_{ROK_PC} , PLN	N_{EL_WNE} , kW	E_{EL_WNE} , kWh	K_{ROK_WNE} , PLN
-20	4	0,07	0,28	0,15	0,59	2,36	1,28	2,49	9,95	5,37
-19	4	0,07	0,28	0,15	0,56	2,25	1,22	2,37	9,47	5,12
-18	4	0,07	0,28	0,15	0,53	2,14	1,15	2,25	9,00	4,86
-17	10	0,07	0,70	0,38	0,51	5,06	2,74	2,13	21,31	11,51
-16	18	0,07	1,26	0,68	0,48	8,61	4,65	2,01	36,23	19,57
-15	20	0,07	1,40	0,76	0,45	9,00	4,86	1,89	37,89	20,46
-14	28	0,07	1,96	1,06	0,42	11,82	6,38	1,78	49,73	26,85
-13	50	0,07	3,50	1,89	0,39	19,70	10,64	1,66	82,88	44,76
-12	51	0,07	3,57	1,93	0,37	18,66	10,07	1,54	78,50	42,39
-11	53	0,07	3,71	2,00	0,34	17,90	9,66	1,42	75,31	40,66
-10	52	0,07	3,64	1,97	0,31	16,10	8,69	1,30	67,73	36,57
-9	75	0,07	5,25	2,84	0,28	21,10	11,40	1,18	88,80	47,95
-8	90	0,07	6,30	3,40	0,25	22,79	12,31	1,07	95,91	51,79
-7	70	0,07	4,90	2,65	0,23	15,76	8,51	0,95	66,31	35,81
-6	93	0,07	6,51	3,52	0,20	18,32	9,89	0,83	77,08	41,62
-5	130	0,07	9,10	4,91	0,17	21,95	11,85	0,71	92,36	49,87
-4	150	0,07	10,50	5,67	0,14	21,10	11,40	0,59	88,80	47,95
-3	170	0,07	11,90	6,43	0,11	19,13	10,33	0,47	80,51	43,48
-2	225	0,07	15,75	8,51	0,08	18,99	10,26	0,36	79,92	43,16
-1	380	0,07	26,60	14,36	0,06	21,39	11,55	0,24	89,99	48,59
0	221	0,07	15,47	8,35	0,03	6,22	3,36	0,12	26,17	14,13
Suma	1898		133	72		300	162		1264	683

T – temperatura zewnętrzna, °C, τ – czas występowania danej temperatury w roku, h, N_{EL_GWC} – moc elektryczna wentylatora GWC, kW, E_{EL_GWC} – zużycie energii elektrycznej przez wentylator GWC, kWh, K_{ROK_GWC} – roczne koszty eksploatacji rozpatrywanej instalacji GWC, PLN·rok⁻¹, N_{EL_PC} – moc elektryczna PC, kW, E_{EL_PC} – zużycie energii elektrycznej przez PC, kWh, K_{ROK_PC} – roczne koszty eksploatacji rozpatrywanej instalacji PC, PLN·rok⁻¹, N_{EL_WNE} – moc elektryczna WNE, kW, E_{EL_WNE} – zużycie energii elektrycznej przez WNE, kWh, K_{ROK_WNE} – roczne koszty eksploatacji rozpatrywanej instalacji WNE, PLN·rok⁻¹

Źródło: Opracowanie własne

- Obliczenie kosztów instalacji wstępnego ogrzewania powietrza w rozpatrywanym okresie eksploatacji, K_{EKS} :

$$K_{EKS} = t \cdot K_{ROK} + K \quad (7)$$

gdzie:

K_{EKS} – koszt sumaryczny wstępnego ogrzewania powietrza w rozpatrywanym okresie eksploatacji, PLN,

t – czas eksploatacji urządzenia, rok,

K_{ROK} – roczne koszty eksploatacji rozpatrywanej instalacji, PLN·rok⁻¹,

K – koszt inwestycyjny (budowy) rozpatrywanej instalacji (K_{GWC} , K_{PC} , K_{WNE}), PLN.

Obliczenie efektu środowiskowego

Dla poszczególnych przypadków obliczono także roczną emisję dwutlenku węgla do atmosfery (tabela 9) wykorzystując wskaźnik emisji CO₂ ($We_{CO_2} = 825,412 \text{ kg} \cdot \text{MWh}^{-1}$) dla energii elektrycznej z konwencjonalnych źródeł spalania opartych na węglu kamiennym z uwzględnieniem energii elektrycznej dostarczonej do sieci oraz strat przesyłowych [14], zgodnie ze wzorem:

$$E_{CO_2} = We_{CO_2} \cdot E_{EL} , \quad (8)$$

gdzie:

E_{CO_2} – emisja CO₂, kg·rok⁻¹,

We_{CO_2} – wskaźnik emisji CO₂ (przyjęto $We_{CO_2} = 0,825412 \text{ kg} \cdot \text{kWh}^{-1}$), kg·kWh⁻¹,

E_{EL} – ilość zużytej energii elektrycznej przez daną instalację, kWh·rok⁻¹.

Tabela 9. Roczna emisja dwutlenku węgla do atmosfery

Instalacja	Gruntowy wymiennik ciepła	Pompa ciepła	Wstępna nagrzewnica elektryczna
Emisja CO ₂ do atmosfery, kg·kWh ⁻¹	110	248	1043

Źródło: Opracowanie własne

Dyskusja wyników

Wszystkie rozpatrywane w pracy instalacje źródła ciepła mogą być wykorzystane w okresie zimowym do wstępnego podgrzewania powietrza doprowadzanego do mechanicznej wentylacji z układem rekuperacji. Wstępna nagrzewnica elek-

tryczna charakteryzuje się najniższymi kosztami inwestycyjnymi, wynoszącymi 682 PLN (tabela 10). Zastosowanie nagrzewnicy elektrycznej jest najprostszym rozwiązaniem, które jest w pełni przystosowane do montażu w systemie rekuperacji, dlatego koszty inwestycyjne ograniczają się wyłącznie do zakupu i prostego jej montażu w kanale doprowadzającym powietrze do rekuperatora. Z kolei, najwyższe koszty inwestycyjne związane są z instalacją gruntowej pompy ciepła z kolektorem poziomym, i wynoszą prawie 14 000 PLN. Tak duża różnica wynika przede wszystkim ze złożoności systemu poziomej, gruntowej pompy ciepła, która składa się z wielu elementów (kolektor poziomy, pompa ciepła), oraz wymaga znacznie szerszego zakresu prac budowlanych (prace ziemne). Stosunkowo wysokie koszty inwestycyjne powstają również podczas zakupu i montażu gruntowego wymiennika ciepła, jest to prawie 10 000 PLN. Instalacja GWC wymaga także czasochłonnych prac ziemnych z wykorzystaniem maszyn budowlanych. Dodatkowo, GWC zbudowane jest z wielu przewodów rurowych wymagających odpowiedniego połączenia oraz układu odprowadzania skroplin, co w znaczący sposób zwiększa nakłady inwestycyjne.

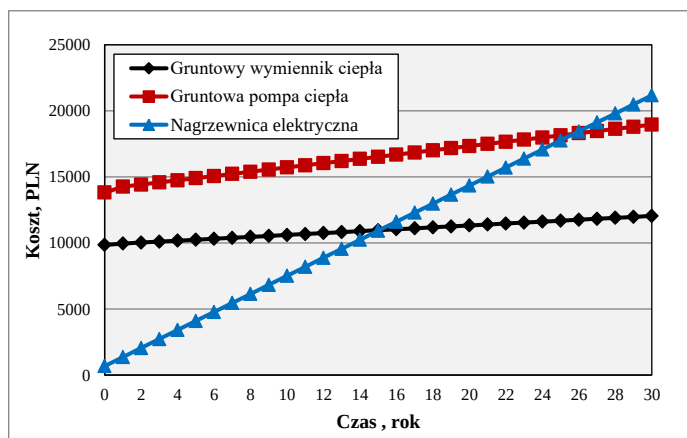
Tabela 10. Koszty eksploatacji instalacji wstępnego ogrzewania powietrza

	Koszty inwestycyjne, PLN	Koszty rocznej eksploatacji K_{ROK} , PLN	Koszty 10-letniej eksploatacji, $K_{EKS_{10}}$, $PLN \cdot (10 \text{ lat})^{-1}$	Koszty 20-letniej eksploatacji, $K_{EKS_{20}}$, $PLN \cdot (20 \text{ lat})^{-1}$	Koszty 30-letniej eksploatacji, $K_{EKS_{30}}$, $PLN \cdot (30 \text{ lat})^{-1}$
Gruntowy wymiennik ciepła	9 855	72	10 575	11 295	12 015
Pompa ciepła	13818	162	15 438	17 058	18 678
Wstępna nagrzewnica elektryczna	682	683	7 512	14 342	21 172

Źródło: Opracowanie własne

Opłacalność inwestycji należy jednak rozpatrywać także pod kątem kosztów eksploatacji i ich bilansu końcowego w okresie wieloletniej eksploatacji. Na rysunku 7 przedstawiono zmianę sumarycznych kosztów inwestycyjnych i eksploatacyjnych na przestrzeni 30 lat. Każdy z wariantów zasilany jest energią elektryczną, ale odznacza się zróżnicowanym zapotrzebowaniem na energię elektryczną. Najniższym zużyciem energii charakteryzuje się gruntowy wymiennik ciepła, moc wentylatora wynosi zaledwie $N_{EL_GWC} = 70 \text{ W}$, a zużycie energii w okresie zimowym na zapewnienie przepływu powietrza wynosi $133 \text{ kWh} \cdot \text{rok}^{-1}$. co w porównaniu z elektryczną nagrzewnicą generującą moc $N_{EL_WNE} = 2500 \text{ W}$ i wymaganym czasie jej pracy powoduje (zużycie energii elektrycznej wynosi

1264 kWh-rok⁻¹), że po 15 latach eksploatacji inwestycja w GWC staje się opłacalna. Warto dodać, że zaletą GWC jest możliwość klimatyzacji domu w okresie letnim przy zachowaniu niskiego poziomu zużycia energii elektrycznej. W przypadku nagrzewnicy elektrycznej konieczny jest zakup dodatkowego klimatyzatora, którego zużycie energii elektrycznej jest wysokie.

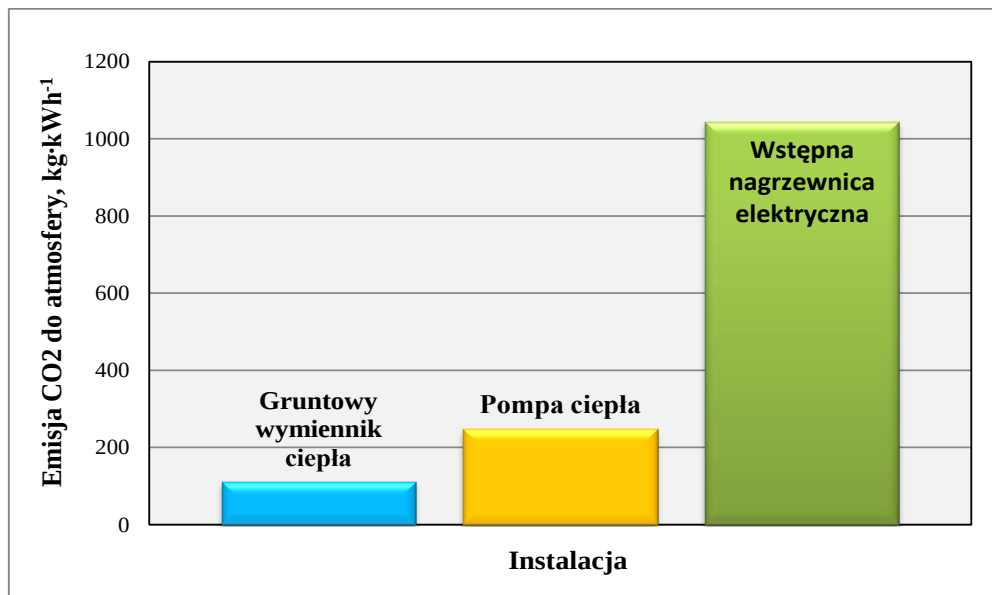


Rys. 7. Koszty inwestycyjne i eksploatacyjne w funkcji czasu

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku gruntowej pompy ciepła opłacalność inwestycji, w stosunku do nagrzewnicy elektrycznej, możliwa jest dopiero po ok. 27 latach eksploatacji. Należy jednak zwrócić uwagę, że w praktyce nie wykorzystuje się takiego rozwiązania pompy ciepła wyłącznie do podgrzewania powietrza wentylacyjnego. Zazwyczaj służy ona także do podgrzewania ciepłej wody użytkowej oraz dodatkowego podgrzewania powietrza nawiewanego do pomieszczeń za rekuperatorem. Wówczas sumaryczna moc grzewcza pompy ciepła jest wyższa i nie ma problemu z jej dostępnością na rynku.

Uzyskane wyniki wskazują, że na wybór rozwiązania duży wpływ ma okres eksploatacji i użytkowania domu pasywnego. W przypadku krótkoterminowej inwestycji, zastosowanie nagrzewnicy elektrycznej jest najlepsze, ale związane z wyższymi późniejszymi kosztami inwestycyjnymi. Z kolei, zastosowanie GWC to wybór perspektywiczny i racjonalny w dłuższym okresie czasu. Wysokie nakłady początkowe są rekompensowane niskimi kosztami eksploatacji. Co więcej, biorąc pod uwagę aspekt ograniczenia emisji CO₂, rozwiązanie oparte na gruntowym wymienniku ciepła w najmniejszym stopniu przyczynia się do jego emisji (rys. 8).



Rys. 8. Emisja CO₂ podczas podgrzewania powietrza o niskiej temperaturze z tytułu zużycia energii elektrycznej

Źródło: Opracowanie własne

Podsumowanie

System mechanicznej wentylacji z odzyskiem ciepła jest niezbędny dla budynków pasywnych, jednak wymaga dostarczania do rekuperatora powietrza o dodatniej temperaturze dla zapewnienia jego poprawnego funkcjonowania. Ze względów ekonomicznych i środowiskowych, istotą jest jednak dobór odpowiedniego rozwiązania wstępnego ogrzewania powietrza wentylacyjnego. W dłuższym okresie eksploatacji (minimum 15 lat) dobrym rozwiązaniem wydaje się zatem montaż gruntowego wymiennika ciepła, dla którego całkowite koszty eksploatacji są niższe od standardowego typu nagrzewnic elektrycznych. Dodatkowo jest to instalacja przyjazna dla środowiska i wspierająca redukcję emisji dwutlenku węgla oraz innych szkodliwych związków do atmosfery. Gruntowy wymiennik ciepła ma także duży potencjał chłodniczy w okresie letnim przy zachowaniu niskiego poziomu zużycia energii elektrycznej.

Literatura

- [1] Gładysz J., Grzesiak A., Nieradko-Iwanicka B., Borzęcki A., *Wpływ zanieczyszczenia powietrza na stan zdrowia i spodziewaną długość życia ludzi*, Probl Hig Epidemiol 2010, 91(2), str. 178 – 180.
- [2] Oleniacz R., Kasietczuk M., Kępka M., *Wpływ rodzaju spalanych paliw i działań termomodernizacyjnych na oddziaływanie budynku jednorodzinnego na jakość powietrza*, [w:] Gaj K., Kuroпка J., *Powietrze atmosferyczne. Jakość – zagrożenia – ochrona*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2016, str. 253 – 256.
- [3] Piechociński, *Budynki pasywne – mistrzowie oszczędzania energii*, Krajowy Ruch Ekologiczno – Społeczny 2006, [online], dostęp zdalny: <http://www.knaufinsulation.pl/sites/pl.knaufinsulation.net/files/budynkipasywne2.pdf>, [data wejścia: 16.02.2017].
- [4] Grygier G., Szyperski P., *Wytyczne dla instalacji wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła (systemu rekuperacji) w domach jednorodzinnych*, Stowarzyszenie Polska Wentylacja, Warszawa 2011.
- [5] Pełech A., *Wentylacja i klimatyzacja – podstawy*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2008.
- [6] Danielak M., *Alternatywne systemy chłodzenia i klimatyzacji. Przewodnik*, Grupa Medium, Warszawa 2014, str. 62 – 64.
- [7] Foit H., *Zastosowanie odnawialnych źródeł ciepła w ogrzewnictwie i wentylacji*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2010, str. 84 – 89.
- [8] Laskowski P., *Rodzaje pomp ciepła i zasada ich działania: powietrze, woda czy grunt*, MuratorDom 2015, [online], dostęp zdalny: http://murator-dom.pl/instalacje/kolektory-pompy-ciepala/zasada-dzialania-pompy-ciepala-powietrze-woda-grunt,30_3744.html, [data wejścia: 16.02.2017].
- [9] Firląg S., Mijkowski M., *Projekt gruntowego wymiennika ciepła*, Narodowa Agencja Poszanowania Energii S.A., Warszawa 2004.
- [10] <https://www.rehau.com/download/1647762/342300-5-pl-07-2015.pdf>, [data wejścia: 18.02.2016].
- [11] Teliżyn A., *Grunt to dobry grunt, czyli jak dobrać dolne źródło*, 2011, [online], dostęp zdalny: <http://www.blog.karbon.com.pl/ogrzewanie/grunt-to-dobry-grunt-czyli-jak-dobrac-dolne-zrodlo/>, [data wejścia: 15.02.2017].
- [12] <http://vikersonn.eu/pompa-ciepala-cennik/Vikersonn-Bjorn-6-gruntowa-pompa-ciepala>, [data wejścia: 15.02.2017].
- [13] <http://www.venture.pl/nagrzewnice/nagrzewnice-kanalowe/dh/>.
- [14] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, *Wskaźnik emisyjności CO₂ dla energii elektrycznej u odbiorców końcowych*, [online], dostęp zdalny:

http://www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/wskazniki_emisyjnosci/160616_WSKAZNIKI_CO2, [data wejścia: 15.02.2017].

mgr inż. arch. Piotr Koda¹⁾, dr hab. inż. Irena Ickiewicz
Politechnika Białostocka, ul. Wiejska 45A, 15-001 Białystok
Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
Zakład Podstaw Budownictwa i Fizyki Budowli
¹⁾koda-koda@wp.pl

SZKODLIWY WPŁYW SOLI TRANSPORTOWYCH POD WPŁYWEM WILGOCI KAPILARNEJ NA PRZEGRODY W BUDYNKACH ZABYTKOWYCH

The harmful effect of salt transported under the
influence of capillary moisture divisions in historic
buildings

Słowa kluczowe: wilgoć kapilarna, ochrona obiektów przed wilgocią, pleśń budowlana

Keywords: capillary moisture, protection of buildings against moisture, mold buildings

Streszczenie:

W zamieszczonym referacie, na przykładzie wybranych zabytkowych obiektów budowlanych wykonanych z cegły ceramicznej pełnej, przedstawiono analizę przyczyn wilgoci kapilarnej oraz przedstawiono skutki jakie za sobą niesie długotrwałe zawilgocenie murów. Analizowane obiekty zlokalizowane są w woj. podlaskim oraz warmińsko-mazurskim.

Podstawową przyczyną problemów z wilgocią w obiektach jest brak właściwej izolacji przeciwwilgociowej przez długi okres czasu, czego następstwem jest kapi-

larne podciąganie wody. Również nieumiejętnie wykonane remonty i zabezpieczenia przed wodą są dodatkową przyczyną występowania wilgoci kapilarnej w obiekcie.

Następstwem braku zabezpieczenia przed wnikaniem wilgoci w konstrukcję obiektu (ściany) jest pojawienie się wysoleń i grzybów budowlanych. Sole występujące w murach powodują zwiększoną zdolność higroskopijnego przyjmowania wilgoci, co prowadzi do dodatkowego zawilgocenia obiektu.

Wilgoć kapilarna w przegrodach budowlanych, poza niszczeniem konstrukcji (cegła), jest przyczyną pogorszenia się mikroklimatu w pomieszczeniach (np. dodatkowe straty ciepła), niszczenia powłok ścian oraz sprzętów. Zawilgocone wilgocią kapilarną mury ze względu na obniżoną izolacyjność termiczną są narażane dodatkowo do wytrącania się wilgoci kondensacyjnej, która jest bezpośrednią przyczyną pojawienia się pleśni i toksycznych grzybów budowlanych. Obecność pleśni i toksycznych grzybów budowlanych prowadzi do wielu groźnych schorzeń i powikłań zdrowotnych powodujących przewlekłe stany chorobowe (np. astmy, a w skrajnych przypadkach do wystąpienia nowotworów).

Wprowadzenie

Współcześnie użytkowane budynki zabytkowe bardzo często zmagają się z wieloma problemami związanymi z nadmiernym zawilgoceniem. Zniszczenia powodowane przez niekorzystne warunki panujące w budynkach narażają użytkowników i inwestorów na ponoszenie kosztów związanych z cyklicznie powtarzającymi się remontami nie przynoszącymi zadowalających efektów, narażaniem mienia na zniszczenia oraz zagrożeniem zdrowia.

Silnie zawilgocone materiały budowlane tracą swoje właściwości fizykochemiczne powodując dodatkowe narażenie konstrukcji budynku, niszczenie detali architektonicznych stanowiących niekiedy o wartości historycznej i kulturalnej budynku zabytkowego.

Pojawienie się wysoleń na przegrodach w budynkach towarzyszy często pojawienie się wilgoci kondensacyjnej co dodatkowo pogłębia już istniejący problem w budynku. Użytkownicy stający przed trudnym zadaniem likwidacji wilgoci, nie zdają sobie sprawy jak bardzo może być złożona przyczyna wystąpienia zawilgocenia w budynku. Dopiero wykonanie specjalistycznych badań, analiz i wyciągnięcia właściwych wniosków prowadzi do likwidacji problemu powszechnie uznanego za trudny do rozwiązania.

Przyczyny zawilgocenia i zasolenia przegród budowlanych w budynkach zabytkowych

Budynki zabytkowe na terenie północno-wschodniej Polski wykonane zostały w przeważającej części z cegły ceramicznej pełnej oraz drewna. Zastosowanie tego materiału determinowało sposób budowania i technikę ochrony budynków przed wilgocią zarówno kapilarną jak też wilgocią kondensacyjną. Wraz z upływem czasu oraz zmieniającymi się warunkami zewnętrznymi, budynki zabytkowe narażone zostały na działanie wody wnikającej z zewnątrz, podciąganej kapilarnie i wytrącającej się w wyniku kondensacji.

Skomplikowane procesy chemiczne powodujące zawilgocenie budynków pogłębiają niekorzystny mikroklimat panujący w zawilgoconych pomieszczeniach budynków. Dodatkowymi czynnikami wpływającymi na zawilgocenie wilgocią kondensacyjną budynków zabytkowych jest brak właściwej wentylacji (głównie w przypadku wentylacji grawitacyjnej), niedostosowanie pomieszczeń do sposobu użytkowania przez inwestorów czy też wprowadzenie do wnętrza urządzeń zaburzających równowagę wilgotnościową.

Brak zabezpieczenia lub odpowiedniego mikroklimatu (np. w przypadku wilgoci kondensacyjnej) przed wnikaniem wilgoci w przegrody (zawilgocenie wgłębne) jest przyczyną pojawienia się wysoleń (wilgoć kapilarna) i grzybów budowlanych (wilgoć kondensacyjna). Przykłady wilgoci kapilarnej przedstawia rysunek 1.



Rys. 1. Wilgoć kapilarna - widoczne wytrącone sole

Źródło: z archiwum I. Ickiewicz

Pojawiające się w murach związki soli (rys. 2) zazwyczaj powodują zwiększoną zdolność higroskopijnego przyjmowania wilgoci, co sprzyja występowaniu wilgoci kondensacyjnej. Proces krystalizacji kryształów soli powoduje zwiększanie objętości, co prowadzi do powstania dużych naprężeń rozciągających powodujących destrukcję murów na skutek powstania ciśnienia krystalizacji. Zniszczona struktura przegród budowlanych, odpajanie się tynków, łuszczenie wymalowań

i wykwyty solne są pierwszym objawem destrukcyjnego działania wilgoci na budynek (rys. 3).



Rys. 2. Związki soli

Źródło: z archiwum I. Ickiewicz

Niedoświadczony inwestor widząc nalot na powierzchni ściany interpretuje to zjawisko jako pojawienie się szkodliwych grzybów budowlanych i podejmuje działania zmierzające do likwidacji widocznych zniszczeń. Zastosowanie niewłaściwych materiałów i środków chemicznych zamiast zlikwidować problem, powoduje nasilenie zjawiska.



Rys. 3. Jednoczesne występowanie wilgoci kapilarnej i kondensacyjnej

Źródło: z archiwum I. Ickiewicz

Badania własne - analiza skutków zawilgocenia przegród budowlanych budynków zabytkowych

Analiza zjawiska

Następstwem silnego zawilgocenia budynków zabytkowych jest szybkie niszczenie substancji przegród budowlanych, niekorzystny mikroklimat pomieszczeń oraz zwiększający się problem zasolenia przegród budowlanych.

Przy silnie zawilgoconych przegrodach budowlanych najczęściej spotykanym problemem jest występowanie związków soli. Rozpuszczalne sole odgrywają bardzo dużą rolę przy powstawaniu zniszczeń budowlanych i pojawienia się wilgoci.

Powtarzające się cyklicznie procesy krystalizacji i rozpuszczania soli prowadzą do niszczenia struktury materiału budowlanego. Destrukcyjne działanie soli na strukturę ścian wynika głównie z faktu, iż wykryształowaniu się związków chemicznych soli towarzyszy wzrost objętości ich kryształów. Znajdujący się w kapilarach i porach materiału budowlanego nasycony roztwór soli, oddając nadmiar wody na skutek parowania zwiększa swoją objętość wywierając ciśnienie krystalizacyjne na pory materiału. Proces ten powtarzający się regularnie wysychania i zawilgocenia nasila jego destrukcyjne działanie. Ciśnienie krystalizacyjne w powtarzającym się procesie prowadzi do rozsadzania wewnętrznej spoiwości materiału i w efekcie powoduje kruszenie się i odłupywanie struktur muru. [Frossel F., 2007, s.63].

Wśród najbardziej niekorzystnych czynników wpływających destrukcyjnie na budynek zabytkowy są związki chemiczne soli (sole i ich pochodne).

Najczęściej spotykanymi związkami są chlorki, siarczany i azotany. Związki soli podczas zjawiska krystalizacji i hydratacji niszczą strukturę porów w materiale budowlanym oraz przyczyniają się do podwyższonego zawilgocenia struktur przegród budowlanych za sprawą zjawiska higroskopijności.

Jednym z najbardziej szkodliwych związków zawartych w zawilgoconych przegrodach budowlanych są związki soli kwasu siarkowego. W wyniku spalania kopalnych źródeł energii jakimi są produkty ropopochodne oraz węgiel, powstaje dwutlenek siarki, który utlenia się w wyniku reakcji chemicznych. Powstały kwas siarkowy wraz z wilgocią wnika w strukturę materiałów budowlanych, tworząc jednocześnie rozpuszczalny w wodzie siarczan wapnia. Zjawisko reakcji siarczanów z fazami gliniankowymi cementu powoduje powstanie związku zwanego glinianosiarczanem wapnia o bardzo wysokiej zawartości wody hydratacyjnej. Pęcznienie związków siarczanu przyczynia się do zwiększania objętości powodując korozję pęczniącą zwaną inaczej korozją rozsadzającą. Wielkie siły działające podczas pęcznienia, powodują znaczne szkody w materiale budowlanym i powodują rozsądzenie i osłabienie struktury przegród budowlanych. Wraz

z zastosowaniem spoiw zawierających magnez w wyniku reakcji chemicznych powstają związki siarczanu magnezu.

Siarczan magnezu wraz z hydratami krzemianów tworzy wodorotlenek magnezu i żel krzemionowy prowadzący do osłabienia struktury materiałów budowlanych i w efekcie do utraty wytrzymałości konstrukcji przegrody budowlanej. [Frossel F., 2007, s.235].

Ze względu na najczęściej spotykane związki soli w materiale budowlanym przyjęto klasyfikację określającą stopnie zasolenia, którą zamieszczono w tablicy 1.

Tabela 1. Klasyfikację stopni zasolenia murów ceglanych [WTA. Markblatt 2-9-04/D Sanierputzsystem].

Rodzaj soli	Zawartość masowa soli (%)		
Chlorki	<0,2	0,2 - 0,5	>0,5
Azotany	<0,1	0,1 - 0,3	>0,3
Siarczany	<0,5	0,5 – 1,5	>1,5
Stopień zasolenia	niski	średni	wysoki

Źródło: badania własne Piotr Koda

Budynek Liceum Ogólnokształcącego nr VI przy ul. Warszawskiej 8 w Białymstoku

Przykładem silnego zawilgocenia jest budynek użytkowany przez Liceum Ogólnokształcące w Białymstoku. Przedmiotowy budynek jest obiektem zabytkowym, Budynek wchodzi w skład XIX-wiecznego zespołu budynków powstających w latach 1832, 1895, 1913 oraz lata 30-te XX w. Kamienica została zbudowana około 1900 roku.

Budynek jest obiektem złożonym z trzech prostokątnych skrzydeł z wysuniętymi ryzalitami o układzie zbliżonym do cyfry „4” w układzie blokowym. Skrzydła budynku – centralne i jedno z bocznych zamykają prostokątny dziedziniec szkoły z jednej strony, z przeciwległej strony centralne i drugie boczne zamykają boisko szkolne. Do starego budynku szkoły przylega nowo wybudowana sala gimnastyczna wraz z łącznikiem.

Problemem który pojawił się w omawianym budynku były zniszczenia spowodowane podciąganiem kapilarnym wilgoci w pomieszczeniach piwnic i parteru oraz niewłaściwie przeprowadzone remonty wynikające z błędnej oceny zachodzących

zjawisk fizycznych i chemicznych. W krótkim czasie po wykonanych remontach, problem z wilgocią powrócił i spowodował ponowne zniszczenia i niekorzystny mikroklimat panujący w budynku.

Dodatkowym czynnikiem niekorzystnie wpływającym na stan techniczny budynku jest ukształtowanie terenu wokół budynku, który ukształtowany został ze spadkiem w kierunku ścian, co powoduje dodatkowe zawilgocenie budynku podczas opadów atmosferycznych. W wyniku przeprowadzonego wywiadu z użytkownikiem budynku powzięto informację o okresowym zalewaniu niektórych pomieszczeń i pojawiających się zawilgoceniach. Obecne ukształtowanie terenu utrudnia odprowadzenie wody od budynku, powierzchnia terenu wyłożona jest kostką betonową oraz trylinką bez zachowania odpowiedniego spadku, co dodatkowo obciąża budynek wodą napływową. Skrzydła budynku dodatkowo zostają obciążone wodą napływową z powierzchni betonowych okalających budynek jak również z okalających terenów biologicznie czynnych. Obiekt budowlany usytuowany na dużym spadku terenu w kierunku cieku wodnego znajdującego się w pobliżu obciążony jest wodą spływającą z okolicznych ulic, co w połączeniu z brakiem właściwej izolacji, podniesionym poziomem terenu, niewłaściwym ukształtowaniem opaski i chodników wokół budynku przyczynia się do ogromnego zawilgocenia budynku i destrukcyjnego działania wilgoci i związków chemicznych, jakie są transportowane wraz z wodą.

W tabeli 2 zostały przedstawione wyniki badań laboratoryjnych pobranych w dniach 4,5,11 listopada 2016 r. próbek substancji muru oraz tynku budynku szkoły w Białymstoku.

Tabela 2. Zestawienie wyników zawartości szkodliwych soli w pobranych próbkach (Białystok)

Numer próbki	Szkodliwe sole budowlane w%		
	Azotany	Siarczany	Chlorki
Próbka nr 1	0,10	0,25	0,04
Próbka nr 2	0,01	0,54	0,2
Próbka nr 3	0,01	0,39	0,25
Próbka nr 4	0,01	0,38	0,45
Próbka nr 5	0,10	0,18	0,08
Próbka nr 6	0,04	4,02	0,14
Próbka nr 7	0,02	0,17	0,66
Próbka nr 8	0,05	4,45	0,33
Próbka nr 9	0,01	0,27	0,49

Numer próbki	Szkodliwe sole budowlane w%		
	Azotany	Siarczany	Chlorki
Próbka nr 10	0,10	0,56	4,39
Próbka nr 11	0,09	1,52	2,14
Próbka nr 12	0,03	0,27	0,38
Próbka nr 13	0,14	0,63	1,96
Próbka nr 14	0,11	2,42	3,49
Próbka nr 15	0,02	0,31	0,18
Próbka nr 16	0,01	0,23	0,04
Próbka nr 17	0,012	0,24	0,08
Próbka nr 18	0,10	0,35	1,32
Próbka nr 19	0,02	0,27	0,13
Próbka nr 20	3,50	0,39	2,98
Próbka nr 21	3,50	0,71	7,46
Próbka nr 22	0,01	0,18	0,05
Próbka nr 23	3,50	0,19	2,77
Próbka nr 24	0,04	0,24	0,68
Próbka nr 25	0,08	0,24	3,92
Próbka nr 26	0,04	0,22	1,8

Źródło: badania własne - Piotr Koda

Przeprowadzone oznaczenia zawartości szkodliwych soli w murach przyziemia wykazują ich wysoki stopień zasolenia. Na podstawie badań laboratoryjnych oszacowano występowanie następujących związków chemicznych: jony azotanowe występują w ilościach zmiennych tj. w ilościach od 0,01% do 3,50% świadczą o wysokim poziomie ich zawartości w murze.

Chlorki w ilościach od 0,04 do 7,46% świadczą o niskim poziomie ich zawartości w murze

Siarczany, które są najbardziej agresywne dla murów wykazują bardzo wysoki i średni stopień zasolenia, gdzie ich poziom zawartości w murze mieści się w granicach od 0,18% do 4,02%

Budynek Sądu Okręgowego w Łomży

Innym przykładem budynku zabytkowego poddanego badaniom jest budynek Sądu Okręgowego w Łomży wybudowany w roku 1888 r., przylegając ścianą frontową bezpośrednio do ulicy, z bramą wjazdową na zaplecze obiektu. Budynek 3-kondygnacyjny został wykonany w technologii tradycyjnej – murowany z cegły ceramicznej pełnej. Bryła budynku o zabudowie zwartej z bezpośrednio przyległymi ścianami bocznymi do budynków. Budynek posiada pomieszczenia piwnic znajdujące się poniżej poziomu gruntu.

Fundamenty i ściany budynku wykonano z cegły ceramicznej pełnej o grubości 94 cm. Pomieszczenia piwnic zostały otynkowane tynkiem cementowo-wapiennym. W miejscach zniszczonych przez wilgoć dokonano napraw tynkiem gipsowym, co dodatkowo spowodowało silne zawilgocenie pomieszczeń.

W tabeli 3 przedstawiono wyniki badań laboratoryjnych pobranych próbek substancji muru oraz tynku budynku Sądu Rejonowego w Łomży.

Tabela 3. Zestawienie wyników zawartości szkodliwych soli w pobranych próbkach (Łomża)

Numer próbki	Szkodliwe sole budowlane w%		
	Azotany	Siarczany	Chlorki
Próbka nr 1	0,23	0,50	0,13
Próbka nr 2	0,12	0,41	0,06
Próbka nr 3	0,14	1,01	0,07
Próbka nr 4	0,16	0,49	0,09
Próbka nr 5	0,07	0,20	0,04
Próbka nr 6	0,20	0,03	0,03
Próbka nr 7	0,16	0,18	0,04
Próbka nr 8	0,11	0,16	0,04
Próbka nr 9	0,17	0,41	0,02

Źródło: badania własne - Piotr Koda

Przeprowadzone oznaczenia zawartości szkodliwych soli w przegrodach budowlanych wykazują wysoki stopień zasolenia. Na podstawie badań laboratoryjnych oszacowano występowanie następujących związków chemicznych:

Jony azotanowe występują w ilościach zmiennych tj. w ilościach od 0,07%.do 0,23% świadczą o średnim poziomie ich zawartości w murze.

Chlorki w ilościach od 0,02% do 0,13% świadczą o niskim poziomie ich zawartości w murze

Najbardziej agresywne dla murów siarczany wykazują średni stopień zasolenia, gdzie ich poziom zawartości w murze mieści się w granicach od 0,16% do 1,01%.

W przypadku budynku szkoły zawartość soli w murach – w przypadku chlorków i siarczanów (najbardziej agresywnych dla murów) jest w ponad 30% szacowany jako średni, natomiast w przypadku budynku Sądu stopnia zasolenia ścian ocenia się jako średni.

W obydwu analizowanych budynkach zaproponowano wykonanie izolacji poziomych wszystkich ścian parteru i piwnic zarówno wewnętrznych jak i zewnętrznych w poziomie posadzki, dwustronnie – dla ścian o gr. większej niż 60 cm i jednostronnie dla ścian o gr. mniejszej niż 60 cm, skucie odspojonych i łuszczących się tynków w pomieszczeniach i wykonanie nowych – renowacyjnych, pomalowanie farbami krzemianowymi, dyfuzyjnymi pomieszczeń.

Podsumowanie i wnioski

W zamieszczonych przykładach zabytkowych budynków wykonanych z cegły ceramicznej pełnej, przedstawiono analizę przyczyn zawilgocenia ścian budynków, stopnia zasolenia murów oraz skutków wilgoci kapilarnej jakie za sobą niesie długotrwałe zawilgocenie.

Podstawową przyczyną problemów z wilgocią w analizowanych budynkach jest brak właściwej izolacji przeciwwilgociowej przez długi okres czasu, czego następstwem jest kapilarne podciąganie wody.

Następstwem braku zabezpieczenia przed wnikaniem wilgoci w konstrukcję budynków (ściany) jest pojawienie się wysoleń i grzybów budowlanych.

Sole występujące w murach spowodowały zwiększoną zdolność higroskopijnego przyjmowania wilgoci, co doprowadziło do dodatkowego zawilgocenia budynku wilgocią kondensacyjną.

Zabezpieczenie budynków zabytkowych przed niszczącym wpływem wilgoci należy do jednych z podstawowych problemów z którymi spotka się użytkownik tych budynków.

Przystępując do planowania prac renowacyjnych w pierwszej kolejności powinno się dokładnie zdiagnozować czynniki niekorzystnie wpływające na strukturę budynku zabytkowego.

Wykonanie skutecznej izolacji zależy w dużym stopniu od zrozumienia zachodzących procesów podczas kapilarnego podciągania wody i właściwej interpretacji zachodzących zjawisk. [Gosztyła M., Pastor P. ,2013, s.67]

Zabytkowe budynki dodatkowo wymagają indywidualnego podejścia do problemów z wilgocią kapilarną i kondensacyjną podczas planowania prac renowacyj-

nych, gdyż w przeważającej większości nie istnieje archiwalna dokumentacja, która pozwoliłaby na zapoznanie się z technologią wykonania zabytkowego obiektu. Zmusza to wszystkie strony procesu renowacji do dokładnego zapoznania się z aktualnym stanem technicznym budynku, stopniem zawilgocenia, wykonaniem niezbędnych badań i podjęciem właściwych decyzji związanych z planowanym procesem renowacji;

- od trafności podjętych decyzji zależy stopień zachowania substancji historycznej, koszt bieżącej eksploatacji oraz wiele innych czynników, które bezpośrednio wpływają na to w jakim stanie zachowania przekaże się budynki zabytkowe przyszłym pokoleniom.
- od prawidłowości i rzetelności wykonania zaproponowanych prac renowacyjnych i naprawczych zależy stan zachowania substancji historycznej budynków zabytkowych,,
- w przypadku budynków zabytkowych należy rozpatrywać prace naprawcze nie tylko przez pryzmat kosztów poniesionych na zachowanie substancji historycznej, ale należy też mieć na uwadze wartości i przesłania emocjonalne, historyczne i kulturowe, jakie niosą ze sobą zachowane budynki zabytkowe.

Literatura

- [1] Frossel F., *Osuszanie murów i renowacja piwnic*, Polcen Sp. z Sp. o., 2007, s. 63, s. 235.
- [2] Rouba B.J., *Pielęgnacja Świątyni i innych zabytków*, Wydawnictwo Naukowe Uniwersytetu Mikołaja Kopernika, 2014.
- [3] Gosztyła M., Pastor P., *Konserwacja i ochrona zabytków architektury*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, wydanie II, 2014.
- [4] Koda P., *Ekspertyza techniczno - mykologiczna o stanie zawilgocenia i zasolenia ścian budynku VI Liceum Ogólnokształcącego w Białymstoku*, 2016, s.7.
- [5] Koda P., *Ekspertyza techniczno - mykologiczna o stanie zawilgocenia i zasolenia ścian budynku Sądu Okręgowego w Łomży*, 2007, s.4.
- [6] *Instrukcja WTA. Merkblatt 2-9-04/D Sanierputzsystem, Neues WTA-Merkblatt Sanierputzsysteme 2-9-04/D*, 2006 .

inż. Patryk Nowik¹⁾, mgr inż. Beata Nowakowska²⁾, prof. dr inż. Anatoli Hurynovich
Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska
mgr inż. Jarosław Jelski

Wodociągi Białostockie Sp. z o.o.

¹⁾patryknowik07@gmail.com

²⁾beata-lorenc@wp.pl

ANALIZA HYDRAULIKI RUROCIĄGU TŁOCZNEGO STUDNI GŁĘBINOWEJ

Analysis of hydraulic pressure pipe line water wells

Słowa kluczowe: wody podziemne, studnie, analiza, ujęcia

Keywords: ground water, wells, analysis, water intakes

Streszczenie:

W trakcie eksploatacji ujęć wód podziemnych, wewnątrz rurociągu tłoczego oraz pompy głębinowej, rozwijają się osady chemiczne i obrosty hydrobiologiczne, które zależą od składu fizykochemicznego wody w studni. W porównaniu z nowymi rurami gładkimi (w warunkach hydraulicznych) wzrost chropowatości ścianki rury w czasie staje się istotnym czynnikiem przyczyniającym się do wzrostu oporu hydraulicznego, spowodowanego głównie zmniejszeniem przekroju rury. Analizy chemiczne wody mogą być traktowane jako narzędzie do wstępnej oceny zmniejszenia średnicy wewnętrznej i chropowatości rur, które prowadzą do wzrostu kosztów energii elektrycznej przy podnoszeniu wody przez pompy głębinowe. Przeprowadzone badania hydrauliki i procesów odkładania się osadów na ściankach rurociągu tłoczego i pompy studni ujęcia wody „Jurowce” wskazały na konieczność okresowego czyszczenia z osadów wewnętrznej powierzchni rur.

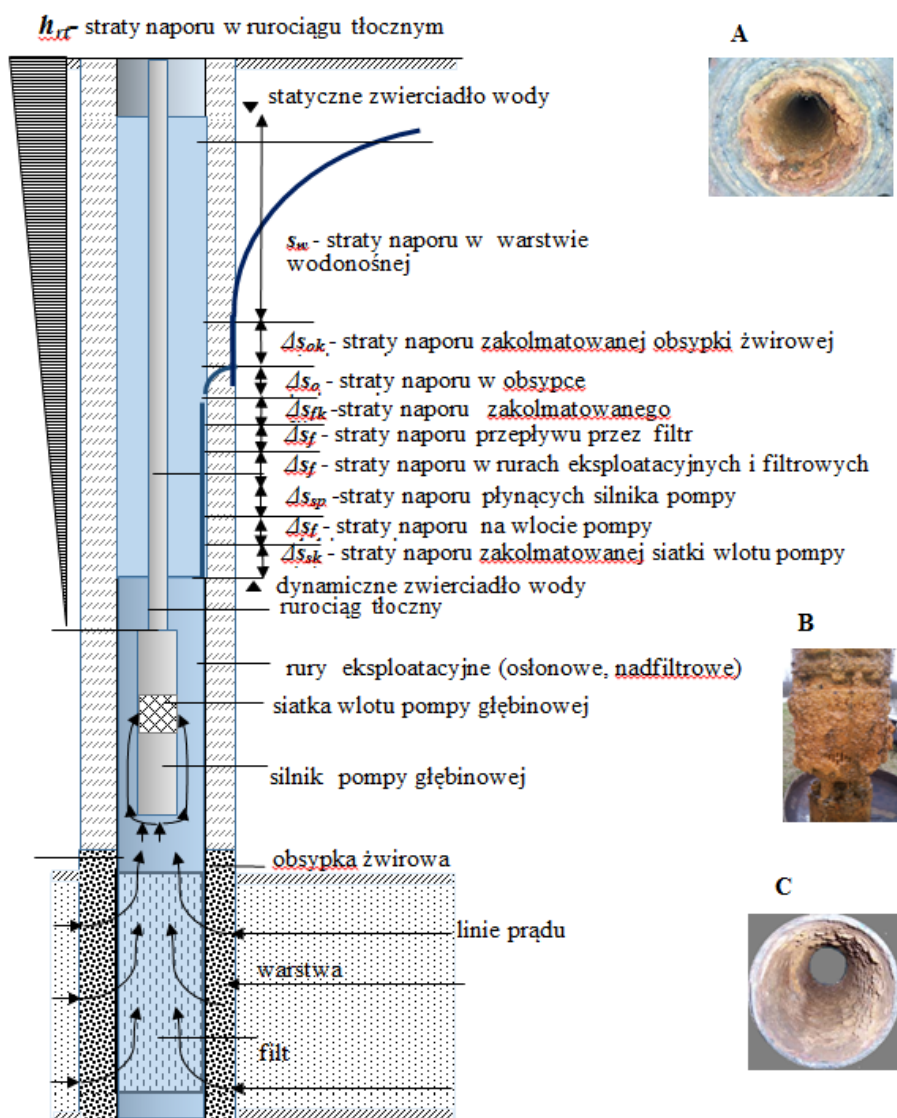
Problemy hydrauliki rurociągu tłocznego studni głębinowej

Istnieje bardzo wiele rodzajów problemów powiązanych z hydrauliką systemu „warstwa wodonośna wraz z studnią pompą głębinową, rurociągiem tłocznym”, które zostały przedstawione na rysunku 1 [1, 2].

Głównymi problemami związanymi z rurociągiem tłocznym studni głębinowej są:

- tworzenie osadów,
- chropowatość materiału z jakiego są wykonane rury.

W trakcie eksploatacji ujęć, wewnątrz rurociągu tłocznego raz pompy głębinowej, rozwijają się osady chemiczne i obrosty mikrobiologiczne, które zależą od składu fizykochemicznego wody (rysunek 1 A, B). Osady te powodują wtórne zanieczyszczenie wody oraz stanowią źródło substratów pokarmowych dla mikroorganizmów. Ze względu na dużą porowatość (40-50%) i niejednorodność osadów, pod ich warstwą może przebiegać korozja podosadowa. Osady zakłócają hydrauliczną przepływ wody oraz zwiększają chropowatość i oporność hydrauliczną rurociągów, co powoduje wzrost kosztów eksploatacji systemu dystrybucji wody [3, 4, 5]. W porównaniu z nowymi rurami gładkimi (w warunkach hydraulicznych) wzrost chropowatości ścianki rury w czasie staje się istotnym czynnikiem przyczyniającym się do wzrostu oporu hydraulicznego, spowodowanego głównie zmniejszeniem przekroju rury. Analizy chemiczne i mikrobiologiczne wody mogą być traktowane jako narzędzie do wstępnej oceny zmniejszenia średnicy wewnętrznej i chropowatości rur, które prowadzą do wzrostu ciśnienia oraz kosztów energii elektrycznej przy podnoszeniu wody przez pompy głębinowe. Chropowatość ścianek rurociągu tłocznego o konkretnym składzie fizyczno-chemicznym wody wzrasta z czasem eksploatacji studni.



Rysunek 1. Hydraulika systemu „warstwa wodonośna - studnia - pompa głębinowa - rurociąg tłoczny”

A – rurociąg tłoczny z osadem, B -Kolmatacja siatki wlotu pompy, C - kolmatacja filtra

Rys. 1. Hydraulika systemu „warstwa wodonośna - studnia - pompa głębinowa - rurociąg tłoczny

Źródło: A. Hurynovich, E. Sycziowa „Optymalizacja wielootworowych ujęć wód podziemnych” Technologia wody nr 5, 2016

Ogólna charakterystyka ujęcia wód podziemnych Jurowce

Ujęcie Jurowce jest jednym z dwóch zbiorników wody pitnej dla Białegostoku. Komunalne ujęcie wód podziemnych w Jurowcach bazuje na studniach wierconych, ujmujących do eksploatacji przypowierzchniowy poziom aluwialny oraz zespół plejstoceniowych głębszych warstw wodonośnych. Obecnie ujęcie Jurowce składa się z 18 zespołów studziennych, gdzie każdy z nich stanowi studnię podstawową oraz studnię awaryjną. Głębokości poszczególnych studni mieszczą się w zakresie 16 m– 122 m. Wydajności eksploatacyjne poszczególnych studni oscylują w granicach 50m³/h- 250 m³/h, przy wydajności jednostkowej od kilku - kilkunastu do ponad 40m³/h/mS. Dziesięć z zespołów wydobywa wodę z warstwy aluwialnej, a pozostałe studnie ujmują wody z warstw głębszych. Lokalnie warstwy przypowierzchniowa i głębsza są połączone [6, 7].

Jakość wody zarówno warstwy aluwialnej jak i głębszych warstw wodonośnych jest średnia. Są to wody słodkie typu HCO₃ – Ca, zazwyczaj średnio-twarde, słodkie o niskiej suchej pozostałości (generalnie poniżej 400 mg/dm³), cechujące się ponadnormatywną zawartością żelaza do ~ 1,5 mg/dm³ i manganu do ~ 0,2 mg/dm³, przy czym zawartość wyżej wymienionych pierwiastków jest wyraźnie większa w warstwach głębszych, szczególnie w rejonach utrudnionego kontaktu z warstwą aluwialną. Wraz ze wzrostem głębokości wzrasta także zawartość amoniaku, która jest najwyższa w warstwie spągowej i dochodzi do ~ 1,4 mg/dm³. Jest to amoniak pochodzenia mineralnego (naturalnego) a jego wysoka zawartość w warstwie spągowej jest cechą charakterystyczną także dla obszarów wysoczyzny [7].

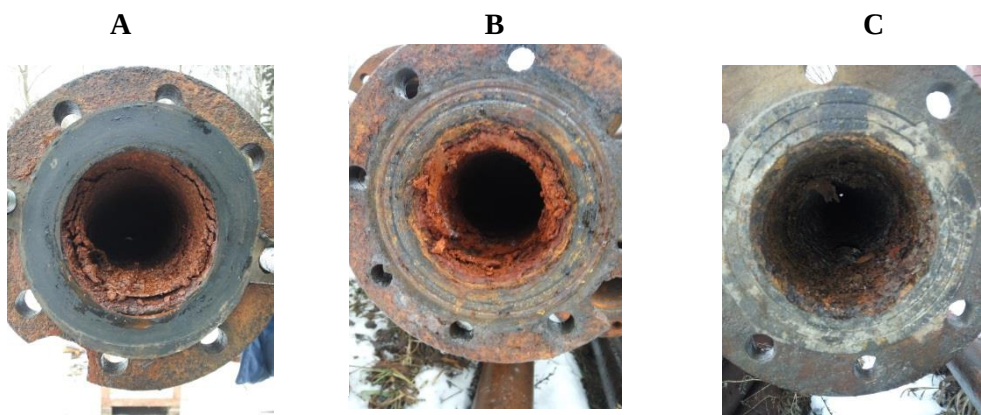
Tab. 1. Jakość wody podawanej do sieci wodociągowej w GRUDNIU 2016 r.

Parametr	Jednostka	Woda głębsza JUROWCE	Zawartość dopuszczalna wg norm polskich*
Mętność	NTU (mg/L)	<0,20	1
Barwa	mg Pt/L	<5	15
Stężenie jonów wodoru (pH)	pH	7,2	6,5 - 9,5
Żelazo ogólne	µg/L	22	200
Mangan	µg/L	<10	50
Chlorki	mg/L	7,1	250

Parametr	Jednostka	Woda wgłębna JUROWCE	Zawartość dopuszczalna wg norm polskich*
Jon amonowy	mg/L	<0,1	0,5
Azotyny	mg/L	<0,03	0,5
Azotany	mg/L	4,7	50
Utlenialność z KMnO ₄	mg/L	2,3	5,0
Aluminium (glin)	µg/L	<40	200
Fluorki	mg/L	<0,10	1,5
Siarczany	mg/L	<5	250
Trichlorometan (chloroform)	µg/L	12,4	30

Źródło: opracowanie własne [7]

We wszystkich studniach głębinowych znajdują się rurociągi tłoczne zrobione ze stali nierdzewnej. Na rysunku 2 można zauważyć wewnętrzne osady w rurociągu tłocznym różnych studni głębinowych, które pracowały bliżej nieznanego czasu.



Rys. 2. Rurociągi tłoczne wraz z osadem z różnych studni A, B, C

Źródło: opracowanie własne

Podstawy badań hydrauliki rurociągów tłocznych

Dla oceny rzeczywistych oporów hydraulicznych w rurociągu tłocznym były prowadzone badania na stanowisku. Badania były prowadzone dla przepływu turbulentnego. Wiadomo, że opory hydrauliczne rurociągów z naturalną makrochropowatością nie nadają się do teoretycznego opisu, a określone są w oparciu o podsumowanie wyników lokalnych pomiarów. Dlatego przy opracowaniu wyników rzeczywistych pomiarów w celu określenia rzeczywistego współczynnika oporu była stosowana formuła Darcy'ego-Weisbacha, z której szeroko korzysta się w praktyce inżynierskiej [8, 9, 10].

$$\Delta p = \lambda \frac{l}{d} \frac{w^2 \rho}{2} \quad (1)$$

Δp – wielkość strat ciśnienia [Pa],

λ – współczynnik oporu zależny od liczby Reynoldsa Re i chropowatości względnej rury [-],

l – długość przewodu [m],

d – średnica wewnętrzna przewodu [m],

w – prędkość płynu [m/s],

ρ – gęstość płynu [kg/m^3].

$$w = \frac{Q}{F} \quad (2)$$

w – prędkość płynu [m/s],

Q – natężenie przepływu [m^3/s],

F – przekrój [m^2].

$$F = \frac{\pi d^2}{4} \quad (3)$$

$$Re = \frac{wd\rho}{\eta} \quad (4)$$

Re – liczba Reynoldsa [-],

ρ – gęstość płynu [kg/m^3],

η – lepkość dynamiczna płynu μ [$\text{N} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}^2}$].

Dla rur gładkich przy $10^5 < Re < 10^8$ była zastosowana formuła równanie Nikuradsego:

$$\lambda = 0,0032 + \frac{0,221}{Re^{0,237}} \quad (5)$$

Opis stanowiska

Stanowisko badań zostało zlokalizowane na ujęciu Jurowce, przy studni głębinowej numer 17B. Stanowisko zostało zbudowane z rur ze stali nierdzewnej, które do niedawna pracowały w studniach, tłocząc wodę do sieci dzięki działaniu pompy. Wcześniejszy okres użytkowania w/w rur wynosił około sześć miesięcy. Rury te miały widoczne ślady osadu lecz nie była to znacząca ilość. Wygląd rur przed badaniem został przedstawiony na rysunkach 1 i 2. Doświadczenie polegało na odczytaniu stanu wodomierza oraz pomiarze ciśnienia w dwóch punktach na rurociągu oddalonych od siebie o 11,53 m. Zmiany strumienia przepływu wody regulowano zaworem poprzez, przykręcanie ze 100% otwarcia zaworu na mniejszą wartość, powtarzając dla różnych wartości aż do osiągnięcia 10% otwartego zaworu. Podczas badania tłoczona woda ze studni głębinowej miała 10,2°C. Do pomiaru ciśnienia został zastosowany elektroniczny manometr Kellermodel LEO RecordEi, do pomiaru przepływu został zastosowany wodomierz.

Stanowisko zostało zbudowane według poniższego schematu (rysunek 3).



Rys. 3. Stanowisko badawcze na ujęciu Jurowce (A – schemat, B – zdjęcie stanowiska)

Źródło: opracowanie własne

Analiza wyników przeprowadzonych badań

Zakres liczby Reynoldsa dobrano tak aby wysypywał przepływ turbulentny. W tabeli 2 przedstawione zostały wyniki współczynnika oporu dla rurociągów tłocznych starych z osadem (λ_1) obliczonych wg wzory (1) po przeprowadzonym badaniu oraz dla rurociągów tłocznych nowych gładkich (λ_2) wg wzoru (5).

Tab. 2. Wyznaczenie chropowatości starych rur i porównanie współczynnika λ starych i nowych rur

Nr	Q	w	Re	λ_1 ø0,0952 m	λ_2 ø0,101 m
	[m ³ /s]	[m/s]	[-]	[-]	[-]
1	0,0244	3,423033	249444,8	0,042981	0,014987
2	0,0242	3,39452	247367,1	0,041997	0,01501
3	0,0237	3,331752	242793	0,041615	0,015063
4	0,0225	3,158613	230175,9	0,038409	0,015214
5	0,0220	3,087836	225018,2	0,04019	0,015278
6	0,0190	2,673417	194818,5	0,040613	0,015698
				0,040968	0,015208

Źródło: opracowanie własne

Chropowatość wewnętrznej powierzchni rurociągu tłocznego wzrasta w porównaniu starych rur z nowymi rurami o 2,69 razy lecz przeważający wpływ ma jednak zmniejszenie średnicy wewnętrznej przewodu tłocznego. Zarastanie rur powoduje nierównomierne niezbilansowanie pracy ujęcia w stosunku projektowych wydajności i ciśnienia. W przeciągu 2 – 3 lat taka sytuacja prowadzi do 1,5 razy wzrost wydatków na energię elektryczną.

Badanie pokazuje, że procesy obrastania wewnętrznych ścianek rurociągów tłocznych osadami są kształtowane pod wpływem dużej liczby niezależnych i słabo zależnych od siebie czynników (jakość materiału rur, prędkość przepływu, pH, różnych mikroorganizmów, chemicznego składu wody, O₂ rozpuszczonego, średnicy rur, itp.). Każdy z tych czynników powoduje ilościowe zmiany grubości osadów, które są losowej wielkości i podlega badaniom w każdym konkretnym przypadku.

Podsumowanie

W wyniku analizy stanu rurociągu tłocznego ujęcia wód podziemnych w Jurawcach zostało ustalone, że większość rurociągów znajduje się w złym stanie ze względu na wytwarzanie się osadów na wewnętrznych ściankach rur, który niekorzystnie wpływa na parametry eksploatacyjne rurociągów zmniejszając ich przepustowość, a tym samym staje się istotnym czynnikiem przyczyniającym się do wzrostu oporów hydraulicznego. Taka sytuacja prowadzi do wzrostu kosztów ener-

gii elektrycznej przy podnoszeniu wody przez pompy głębinowe. Z tego względu należy dbać o parametry i jakość wody.

Na podstawie teoretycznych eksperymentalnych badań wykazano, że wielkość grubości osadów w przewodach jest losowej wielkości w zależności od właściwości fizyko – chemicznych materiału z jakich zbudowane są rurociągi tłoczne, składu chemicznego oraz pH wody, zawartości O₂ rozpuszczonego, obecności w wodzie mikroorganizmów, itp.

Następnym etapem badań jest wyjaśnienie przyczyn zjawiska pojawiania się osadów w czasie oraz działań związanych z zapewnieniem czystych rurociągów bez zanieczyszczeń osadem.

Literatura

- [1] A. Hurynovich, E. Sycziowa, *Optymalizacja wielootworowych ujęć wód podziemnych*, Technologia wody nr 5, 2016.
- [2] A. Hurynovich, *Sistemy pite vogovodosnabzheniya s vodozabornymiskvazhi-nami: planirovanie, proektirovanie, stroitelstvo i ekspluatatsiya*, Minsk, Technoprint, 2004.
- [3] A. Kotowski, *Analiza hydrauliczna zjawisk wywołujących zmniejszenie przepływności rurociągów*, Artykuł Ochrona Środowiska Nr 1 , Vol 32, 2010
- [4] Z. Dymaczewski, *Poradnik eksploatatora oczyszczalni ścieków*, Polskie Zrzeszenie Inżynierów i Techników Sanitarnych, Warszawa 2011
- [5] M. Świdarska-Bróż, M. Wolaka, *Główne przyczyny zanieczyszczenia wody w systemie dystrybucji*, Ochrona środowiska, 2006
- [6] E. Syczewa, A. Hurynovich, C. Bednarczyk, *Optimization of water wells design and construction*, Warszawa: Water supply and sewage systems inside buildings - design, construction and operation, Vol.1 Seidelprzywecki, Warszawa, 2013.
- [7] Z. Nowicki, *Wody podziemne miast wojewódzkich Polski*, Informator Państwowej Służby Hydrogeologicznej, Warszawa 2007
- [8] Janusz Ciborowski, *Inżynieria procesowa*, WNT, Warszawa 1973, Wydanie drugie
- [9] K. Jeżowiecka-Kabsch, H. Szewczyk, *Mechanika płynów*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2001
- [10] H. Walden, *Mechanika płynów*, WPW, Warszawa 1978

mgr inż. Emilia Pogorzelska¹⁾

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Zakład Podstaw Budownictwa i Fizyki Budowli

¹⁾emilia.pogorzelska72@gmail.com

SIŁOWNIE WIATROWE – BADANIE EMISJI HAŁASU SŁYSZALNEGO

Wind turbines – study of noise emission

Słowa kluczowe: siłownie wiatrowe, hałas, badanie natężenia dźwięku

Keywords: wind turbines, noise, study of acoustic intensity

Streszczenie:

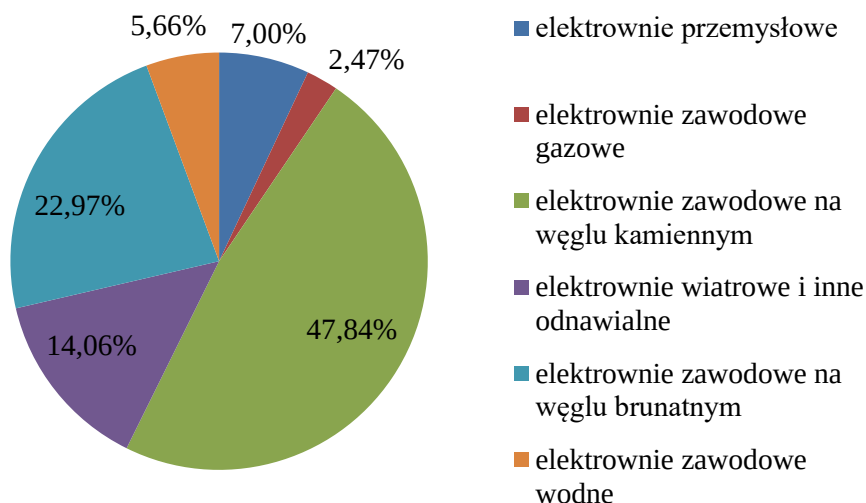
Energia wiatru jest źródłem odnawialnym, którego wykorzystanie w ostatnich latach rośnie najszybciej spośród wszystkich źródeł odnawialnych. W rejonach, w których zainstalowano dużą liczbę siłowni wiatrowych, lokalne społeczności zaczynają dostrzegać ich negatywny wpływ na środowisko naturalne. Jednym z nich jest hałas. Źródłem uciążliwego hałasu są turbiny wiatrowe, a emitowany hałas jest słyszalny z odległości dochodzących do 1km. Między innymi z tego tytułu konieczne jest zbadanie oddziaływania siłowni wiatrowych na środowisko. W tym celu na etapie wniosku o wydanie decyzji o środowiskowych uwarunkowaniach położenia na danym terenie siłowni wiatrowej sporządzany jest raport oddziaływania na środowisko. Na raport składa się m.in. opis kryteriów oceny hałasu, obliczenie poziomu dźwięku A w środowisku, wyniki obliczeń akustycznych oraz hałas turbin wiatrowych w zakresie infradźwięków.

W artykule przedstawiono procedury badania poziomu dźwięku emitowanego przez siłownię wiatrową na podstawie normy PN-EN 61400-11 „Turbozespoły wiatrowe, część 11: Procedury pomiaru hałasu” [1]. Obiektem badawczym jest maszt telekomunikacyjny z własną siłownią wiatrową o pionowej osi obrotu z gene-

raturem o mocy 25 kW. W okolicy usytuowanego obiektu zostały wykonane pomiary akustyczne, otrzymane wyniki zostały poddane analizie, co pozwoliło na wyciągnięcie wniosków dotyczących wielkości parametrów akustycznych hałasu i ewentualnego ich zagrożenia dla środowiska.

Energetyka wiatrowa w Polsce

Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w znacznym stopniu ma zmniejszyć szkodliwe oddziaływanie na środowisko naturalne występujące podczas wydobywania i eksploatacji paliw stałych. W Unii Europejskiej, a więc również w Polsce, zakres wykorzystywania energii ze źródeł odnawialnych regulują odpowiednie dyrektywy oraz akty normatywne. Jedną z dyrektyw określa udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto w 2020 r. dla poszczególnych państw członkowskich. Zgodnie z tą dyrektywą, udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto w 2020 r. powinien wynosić 15,0%. 7 grudnia 2010 r. Rada Ministrów przyjęła „Krajowy plan działań w zakresie energii ze źródeł odnawialnych”, który zakłada, że podstawą zwiększenia udziału energii ze źródeł odnawialnych będzie większe wykorzystanie biomasy oraz energii elektrycznej z wiatru [2]. Wzmoczone wykorzystanie energii wiatru staje się więc nieuniknione w świetle obowiązujących przepisów. Elektrownie wiatrowe pod względem mocy zainstalowanej są największą pozycją w kategorii odnawialnych źródeł energii zasilających Krajowy System Elektroenergetyczny. Łączna moc siłowni wiatrowych stała się wyższa od łącznej mocy elektrowni wodnych już przed 2012 rokiem. Udział mocy zainstalowanej pochodzącej z wiatraków w stosunku do łącznej mocy zainstalowanej przekroczył barierę 5 %, uznawaną za graniczną wartość pojedynczego bloku energetycznego dla bezpieczeństwa prawidłowego funkcjonowania systemów elektroenergetycznych [4]. Jak pokazuje raport KSE za rok 2015, udział mocy zainstalowanej elektrowni wiatrowych i innych odnawialnych osiągnął wartość 14,06% [5]. Dane na ten temat przedstawia Rys. 1.



Rys. 1. Struktura procentowa mocy zainstalowanej w KSE, wg stanu na 31.12.2015.

Źródło: [5]

Powyższe dane wskazują na nieunikniony przyrost wykorzystania energii wytwarzanej w siłowniach wiatrowych, a co za tym idzie, coraz większą liczbę budowanych farm wiatrowych. Budowa farm wiatrowych wzbudza wiele kontrowersji. Głównym czynnikiem negującym słuszność tego przedsięwzięcia jest emitowany przez siłownie wiatrowe hałas (drżania), który negatywnie oddziałuje na środowisko (budowle) oraz zamieszkałą w sąsiedztwie ludność. Ekolodzy wskazują również, że farmy wiatraków stwarzają zagrożenie dla ptaków oraz niekorzystnie wpływają na krajobraz [6]. Stąd też w niniejszej pracy zwrócono uwagę na negatywne aspekty jakie może nieść ze sobą budowanie wiatraków w nieodpowiednich lokalizacjach.

Hałas wytwarzany przez siłownie wiatrowe

W przypadku turbin wiatrowych zgodnie z [7] klasyfikowane są następujące rodzaje hałasu, emitowane przez odrębne części wiatraków:

- hałas aerodynamiczny, emitowany przez obracające się łopaty wiatraka,
- hałas mechaniczny, emitowany przez gondolę.

Hałas słyszalny turbin mieści się w zakresie od ok. 20 Hz do ok. 20 kHz, zaś infradźwiękowy do 0,5 Hz do 20 Hz. Głównym źródłem hałasu emitowanego przez turbiny wiatrowe są łopaty wirnika, które podczas ruchu obrotowego pokonują aerodynamiczny opór powietrza. Krawędzie śmigieł wykonują drżania wywołane przepływającym wokół nich powietrzem, przez co największa emisja hałasu pocho-

dzi z końcowych fragmentów śmigieł (największa prędkość obrotowa). Hałas ten cechuje się wyrównaną charakterystyką widmową bez dominacji składowych tonalnych. Na całkowity poziom hałasu generowanego przez turbinę ma wpływ również układ przetwarzający energię, do którego zalicza się wirnik, przekładnia oraz generator [7].

Poziom mocy akustycznej w dużej mierze zależy również od prędkości wiatru, która ma wpływ na hałas aerodynamiczny. Turbina wiatrowa jest kierunkowym źródłem dźwięku i maksymalna emisja hałasu występuje w kierunku zgodnym z kierunkiem wiatru. Z tego powodu kierunek wiatru jest bardzo istotnym czynnikiem podczas dokładnego określania poziomu dźwięku w otoczeniu siłowni wiatrowej. Ponadto natężenie hałasu emitowanego przez kompleks kilku siłowni wiatrowych zależy od:

- sposobu rozmieszczenia turbin,
- modelu elektrowni wiatrowej,
- ukształtowania terenu.

Hałas infradźwiękowy generowany jest przez łopaty przy przejściu obok wieży turbiny, a jego częstotliwość i natężenie zależą od prędkości obrotowej wirnika. Przy analizie wietrzności uwzględnia się również jej zmienność w skali roku. W okresie letnim prędkość wiatru stanowią 50÷70% wartości średniorocznych, zaś w okresie zimowym 150÷170% [8].

W nowoczesnych systemach gondol hałas mechaniczny został ograniczony do minimalnego poziomu, dzięki zaawansowanej technologii izolacji. Jednak ten rodzaj hałasu jest ciągle emitowany w starszych turbinach. Badania przeprowadzone w Szwecji na zespole turbin wiatrowych o mocy 600kW lub 6600kW oraz wysokości gondoli 40÷50m, wykazały, że hałas mechaniczny mierzony u źródła, przy prędkości wiatru 8m/s, dochodzi do 102dBA [9]. Hałas mechaniczny może jednak zostać zminimalizowany na etapie konstruowania siłowni, głównym problemem pozostaje więc hałas emitowany przez łopaty wirnika, tzw. szum aerodynamiczny, który dominuje w bezpośrednim sąsiedztwie siłowni. Im większa prędkość obracania się skrzydeł, tym emitowany do środowiska hałas wzrasta. Szum ten może być zmniejszany poprzez obniżenie prędkości końcówek śmigła lub wprowadzenie regulacji ustawienia kąta łopat. Mimo tych zabiegów nie uda się całkowicie wyeliminować szumu [4]. Zagrożenie hałasem aerodynamicznym potęguje fakt, że emitowany szum wzrasta wraz ze zwiększeniem rozmiarów turbin wiatrowych. Im większe rozmiary wiatraków, tym więcej produkowanej energii, ale też większe narażenie na szkodliwy szum [9].

Im bliżej siłowni wiatrowej znajdują się zabudowania, tym hałas aerodynamiczny jest bardziej odczuwalny. W związku z tym kluczowym narzędziem w ochronie przed hałasem siłowni wiatrowych jest utrzymanie odpowiedniej odległości pomiędzy wiatrakiem a zabudową mieszkalną. Odległość ta powinna wynikać z przeprowadzonych analiz, które ustalą granice terenu, na którym dopuszczal-

ny poziom hałasu nie będzie przekroczony. Lokalizację elektrowni wiatrowych określa Ustawa z dnia 20 maja 2016r o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych [10]. Zgodnie z tą ustawą, odległość elektrowni wiatrowej od budynku mieszkalnego albo budynku o funkcji mieszanej, w skład której wchodzi funkcja mieszkaniowa, jest równa lub większa od dziesięciokrotności wysokości masztu elektrowni wiatrowej, mierzonej od poziomu gruntu do najwyższego punktu budowl, wliczając elementy techniczne, w szczególności wirniki wraz z łopatami (całkowita wysokość elektrowni wiatrowej). Opisana odległość powinna być zachowania nie tylko w stosunku do budynków mieszkalnych, ale również w odniesieniu do form ochrony przyrody. Uregulowania zawarte w przytoczonej ustawie dotyczą profesjonalnych elektrowni wiatrowych. Gabaryty elektrowni wiatrowej zależą od mocy generatora. Ponieważ zgodnie z ustawą odległość elektrowni wiatrowej od obiektów lub terenów mieszkalnych nie może być mniejsza niż 10-krotna jej wysokość, to przykładowo elektrownia o mocy od 2,5 do 5 MW i wysokości 169 m wymaga 1690 m odstępu, a o mocy od 5 do 10 MW i wysokości 210 m – 2100 m, czyli ponad 2 kilometry. Co więcej, zgodnie z ustawą lokalizacja elektrowni wiatrowej jest możliwa jedynie w miejscach wskazanych w miejscowym planie zagospodarowania przestrzennego. Nie ma więc możliwości zrealizowania nowych inwestycji w zakresie budowy elektrowni wiatrowych w miejscu, dla którego nie został uchwalony taki plan [11]. Przy ocenie szkodliwości hałasu turbin wiatrowych należy odnieść się do wytycznych dopuszczalnego poziomu dźwięku w środowisku zewnętrznym, które określa Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (Dz. U. z r. 2007 Nr 120, poz.826 z późniejszymi zmianami zawartymi w Dz. U. z r. 2012, poz. 1109 z dnia 8 października 2012 r [12]. Według rozporządzenia dopuszczalne wartości równoważnego poziomu dźwięku A , $L_{Aeq T}$ dla hałasu pochodzącego od obiektów i grup źródeł innych niż drogi i linie kolejowe określa się w przedziałach czasu równych odpowiednio ośmiu najmniej korzystnym godzinom pory dziennej, która przypada, pomiędzy godziną 600 – 2200, oraz jednej najmniej korzystnej godzinie w porze nocnej, pomiędzy godziną 2200 – 600. Dla terenów zabudowy zagrodowej, wartości te wynoszą odpowiednio:

- pora dzienna – $L_{Aeq D} = 55 \text{ dB(A)}$,
- pora nocna – $L_{Aeq N} = 45 \text{ dB(A)}$.

Powyższe rozporządzenie nie określa dopuszczalnych poziomów infradźwięków (w zakresie częstotliwości od 1 do 16 Hz). Tylko Norma PN-Z-01338:2010 „Pomiar i ocena hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy” [13] określa równoważny dopuszczalny poziom ciśnienia akustycznego skorygowanego charakterystyką częstotliwościową G , równy $L_{Geq} = 102 \text{ dB(G)}$, dla prac koncepcyjnych, oraz młodocianych i kobiet w ciąży, równy $L_{Geq} = 86 \text{ dB(G)}$ bez rozróżnienia pory dziennej i nocnej. Nie są określone wymagania prawne ograniczające hałas infradźwiękowy emitowany do środowiska.

Wpływ hałasu słyszalnego oraz infradźwięków emitowanych przez siłownie wiatrowe stał się obiektem wielu badań. W 2000 roku w Szwecji przeprowadzono sondaż odczuć hałasu emitowanego przez zlokalizowaną w pobliżu farmy wiatrową. Badania wykazały, że szum nieprzekraczający 32,5 dB jest niezauważalny, 79% badanych wyraziło przyjazne nastawienie do wiatraków, zaś 25% respondentów oceniło je jako uciążliwe (z czego większość była narażona na hałas o wyższym natężeniu). Dźwięk słyszany w pobliżu turbin wiatrowych badani określili jako „chlupot”, świst oraz gwizdanie. Dwa ostatnie określenia odnoszą się do dźwięków na poziomie od 2 kHz do 4 kHz, zaś „chlupot” odnosi się do specyficznego hałasu słyszanego w tle. Uważa się, że percepcja hałasu emitowanego przez wiatraki, może być zaburzona przez oddziaływanie akustyczne środowiska, głównie wiatru. Pogląd ten traci jednak zasadność, ponieważ nowoczesne elektrownie wiatrowe posiadają systemy stabilizujące prędkość obrotu łopat. Skrzydła obracają się z taką samą prędkością, bez względu na prędkość wiatru. W warunkach bezwietrznych, słyszalność hałasu wiatraków, nie jest więc zakłócana [9].

Badania własne na przykładzie małej siłowni wiatrowej

W niniejszym artykule przedstawiono badania poziomu dźwięku w otoczeniu małej siłowni wiatrowej o mocy 25 kW, stanowiącej układ zasilający masztu telekomunikacyjnego. Siłownię można zaliczyć do małych ze względu na jej moc (mieści się w przedziale mocy od 100 W do 50 kW).

Wprowadzenie

Małe siłownie wiatrowe są w stanie zapewnić energię elektryczną w pojedynczych gospodarstwach domowych, a nawet małych farmach [14]. Ponieważ małe siłownie wiatrowe lokalizowane są blisko gospodarstw domowych, szczególnie istotne jest możliwe narażenie mieszkańców na hałas przez nie emitowany. W artykule [6] stwierdzono, że dotychczasowe pomiary nie potwierdzają nadmiernej emisji szkodliwych dźwięków przez przydomowe elektrownie wiatrowe. Pomiary przeprowadzono w odległości 12 m od generatorów o różnej mocy. Zestawienie otrzymanych wyników przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela 1. Wyniki pomiarów hałasu [dB] wytwarzanego przez generator wiatrowy o danej mocy

Prędkość wiatru [m/s]	Moc generatora			
	500 W	1 kW	5 kW	20 kW
3	21,3	20	23,3	20,9
4	21,7	22,6	24,8	23,4
5	29,4	24,5	30,9	28,5
6	30,6	32,2	36,9	36,7

Prędkość wiatru [m/s]	Moc generatora			
	500 W	1 kW	5 kW	20 kW
7	41,4	35,6	42,2	43,6
8	44,5	40,4	49,0	49,8
9	50,3	44,7	53,4	51,6
10	54,8	48,6	62,4	61,8
11	58,4	58,4	64,0	66,2
12	59,4	59,3	70,7	69,5

Źródło: [6]

Ponadto w pozycji [6] literatury pada stwierdzenie, że hałas małych generatorów ma niewielkie natężenie, a problem uciążliwości leży w sferze psychicznej odbiorców, nie zaś po stronie technicznej wiatraków. Problem negatywnego wpływu na okoliczną ludność spowodowanego hałasem siłowni wiatrowych przypisuje się głównie farmom wiatrowym przeznaczonym do zawodowego produkowania większych ilości energii elektrycznej.

Procedura pomiarowa

Przedmiotem badań jest hałas słyszalny emitowany przez siłownię wiatrową o pionowej osi obrotu oraz mocy 25kW. Przedmiotowa siłownia wiatrowa stanowi układ zasilający masztu telekomunikacyjnego do celów badawczo-rozwojowych.

Procedury pomiaru, analizy wyników oraz sposób opracowania sprawozdań dotyczących emisji hałasu generowanego przez turbinę wiatrową określa norma PN-EN 61400-11 „Turbozespoły wiatrowe, cz. 11: Procedury pomiaru hałasu”. Metoda pomiarów ma na celu wyliczenie poziomu dźwięku A oraz badanie widma hałasu.

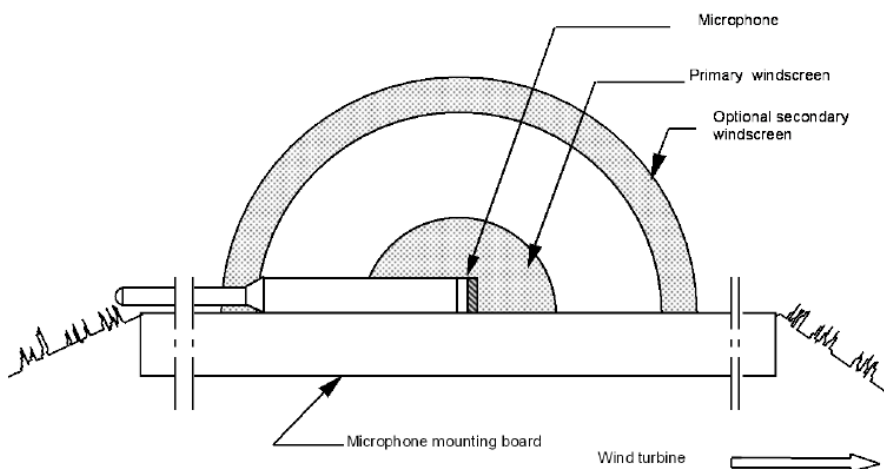
Wyżej wymieniona norma prezentuje metodologię umożliwiającą jednoznaczne scharakteryzowanie emisji hałasu pochodzącego z pojedynczej turbiny wiatrowej. Procedura uwzględnia:

- położenie miernika hałasu,
- wymagania dotyczące sprzętu pomiarowego, warunków meteorologicznych oraz powiązane z tym dane systemu operacyjnego turbiny,
- sposób analizy otrzymanych wyników,
- definicję specjalistycznych parametrów akustycznych wraz z opisem, które z nich są stosowane do oceny hałasu pod kątem szkodliwości dla środowiska.

Norma opisuje procedurę pomiaru hałasu emitowanego przez turbiny wiatrowe bez względu na rozmiar czy wielkość turbiny wiatrowej. Definiuje również akustyczne oraz poza akustyczne parametry determinujące emisję dźwięku oraz wskazuje, które z nich należy objąć pomiarami w celu uzyskania danych wymaganych przez metodologię. Metoda może zostać wykorzystana przy wszystkich prędkościach wiatru. Zakres zmienności prędkości wiatru jest powiązany z odpowiednią

turbiną wiatrową. Jako minimalną przyjmuje się prędkość wiatru na poziomie $6 \div 10 \text{ m/s}$ na wysokości 10m, w zależności od typu turbiny.

Pomiary hałasu są dokonywane za pomocą mikrofonu zainstalowanego na płycie umieszczanej na poziomie terenu. Płyta służy to redukcji dźwięku wytwarzanego przez wiatr w mikrofonie oraz zminimalizowaniu wpływu różnego rodzaju gruntu. Budowa płyty określona jest w normie [1], a przekrój pionowy wraz z opisem elementów przedstawiono na Rys. 2. Ilustrację płyty zastosowanej podczas przeprowadzonych badań prezentuje Rys. 3.



Rys. 2. Budowa płyty z mikrofonem - przekrój pionowy

Źródło: [1]



Rys. 3. Płyta z mikrofonem wykorzystana do pomiarów akustycznych

Źródło: Zdjęcia własne

Na zmiany prędkości wiatru duży wpływ wywiera zróżnicowanie powierzchni terenu. Oddziaływanie to jest charakteryzowane przez współczynnik szorstkości terenu z_0 , który przybiera wysokie wartości dla terenów najbardziej szorstkich. Tereny charakteryzujące się wysoką wartością parametru z_0 , powodują silne zawiro-

wania i hamują przepływ wiatru. Szorstkość odnosi się do terenów, na których przeszkody są rozmieszczone równomiernie. Tabela 2 przedstawia klasyfikację szorstkości terenu przedstawioną w pozycji [8].

Tabela 2. Współczynnik szorstkości terenu

Rodzaj terenu	Szorstkość z_0 [m]
Morze, łąka pod śniegiem, pustynia piaszczysta	0,0005
Morze przy silnym wietrze (sztormie)	0,005
Skoszona łąka	0,01
Pola pod uprawami	0,05
Uprawy wysokie	0,10
Drzewa oraz zabudowa rozproszona	0,25
Teren gęsto zadrzewiony, strefa podmiejska	0,50
Centra miast średniej wielkości, las	1,00
Centra wielkich miast, las tropikalny	4,00

Źródło: [8]

Klasyfikacja szorstkości terenu przedstawiona jest również w normie [1], jako jeden z pozakustycznych parametrów koniecznych do określenia hałasu emitowanego przez siłownie wiatrowe. Podział ten nie jest jednak tak rozbudowany jak w przykładzie przedstawionym powyżej, ogranicza się bowiem do rozróżnienia jedynie czterech typów powierzchni. Wartości z_0 przypisywane poszczególnym rodzajom terenu zgodnie z normą [1] zawarto w Tabeli 3.

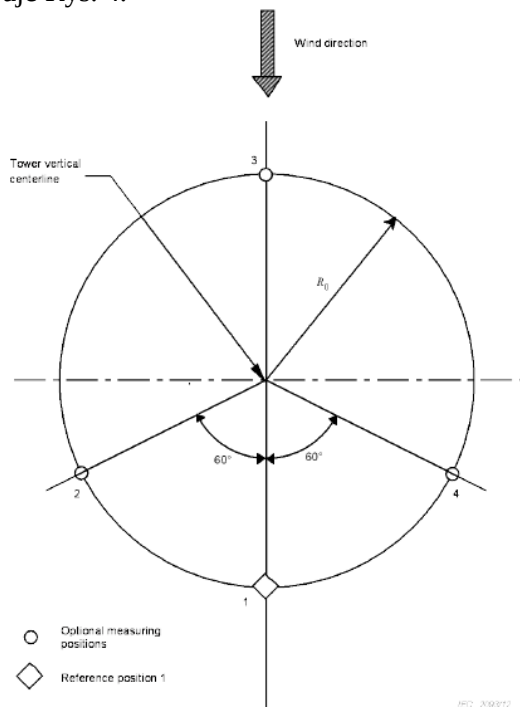
Tabela 3. Współczynnik szorstkości terenu

Rodzaj terenu	Szorstkość z_0 [m]
Woda, teren pokryty śniegiem, teren piaszczysty	0,0001
Teren otwarty, równinny, łąki ze skoszoną trawą, pola uprawne	0,01
Pola pod uprawami	0,05
Przedmieścia, miasta, lasy, teren porośnięty drzewami, zakrzewiony	0,3

Źródło: [1]

Kolejnym istotnym etapem przeprowadzania badań akustycznych jest wyznaczenie w terenie punktów pomiarowych. Pomiary wykonano w czterech punktach położonych wokół siłowni wiatrowej, których rozmieszczenie opisuje norma [1]. Jeden z punktów określany jest mianem punktu odniesienia (pozycja referencyjna), zaś pozostałe trzy są punktami roboczymi. Punkty wyznacza się na linii okręgu,

którego środek stanowi obiekt emitujący fale dźwiękowe. Rozmieszczenie pozycji pomiarowych ilustruje Rys. 4.



Rys. 4. Wytyczne rozmieszczenia pozycji pomiarowych
Źródło: [1]

Określenie odległości R_0 punktów pomiarowych od badanej turbiny wiatrowej emitującej hałas, uzależnione jest od rozmiarów łopat oraz wysokości masztu. Wielkość R_0 dla turbin wiatrowych o pionowej osi obrotu zgodnie z normą [1] wyznacza się według wzoru:

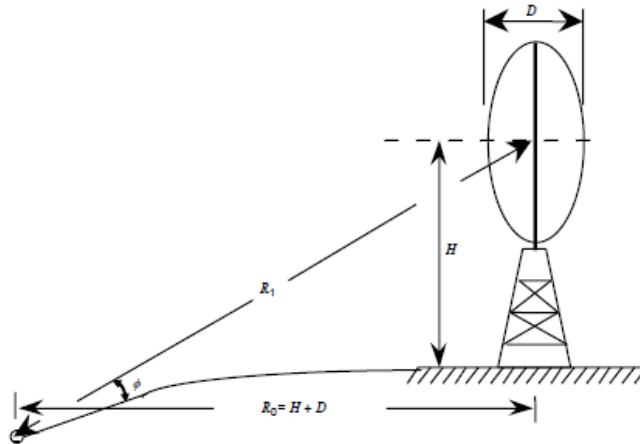
$$R_0 = H + D \quad (1)$$

gdzie:

H – wysokość od poziomu terenu do osi wirnika,

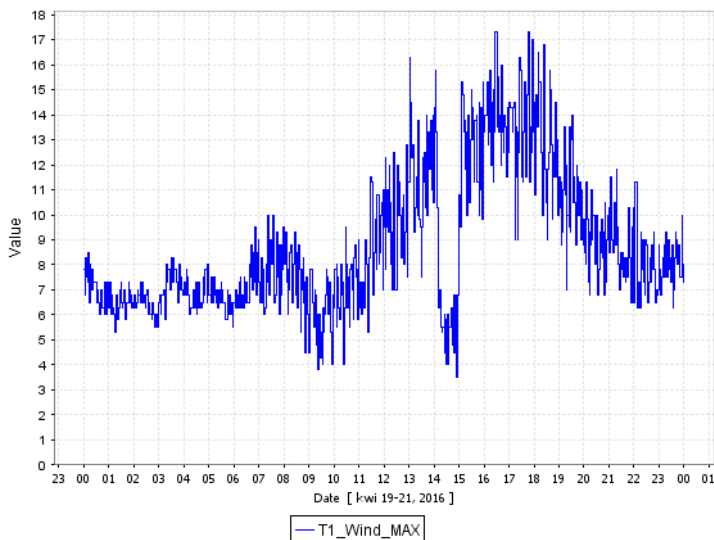
D – średnica obrotu łopat.

Dla lepszego wyjaśnienia przyjmowanych we wzorze wielkości, norma [1] zamieszcza również ilustrację, którą przedstawiono na Rys. 5.



Rys. 5. Definicja odległości R_0 punktów pomiarowych od siłowni wiatrowej o pionowej osi obrotu
Źródło: [1]

Procedury określające metodykę umożliwiają charakterystykę emisji hałasu pojedynczej turbiny wiatrowej, obejmują również pomiar prędkości wiatru. Pomia-ry przeprowadzono przy różnych prędkościach wiatru. Na Rys. 6. przedstawiono przykładowy rozkład prędkości wiatru podczas dwóch dni pomiarów. Badanie wielkości nieakustycznych dokonywano zestawem pogodowym składającym się z wiatromierza oraz przetwornika mocy elektrycznej.



Rys. 6. Rozkład prędkości wiatru podczas dwóch dni pomiarów akustycznych
Źródło: Wydruk z zestawu pomiarowego warunków meteorologicznych

Badania

W przypadku turbiny wiatrowej poddanej badaniom, odległość pozycji pomiarowych od masztu wyniosła **61m**. Pozycję referencyjną ustalano w zależności od kierunku wiatru a odległość obliczono uwzględniając główne wymiary geometryczne turbiny. Jeden z punktów pomiarowych usytuowany był na obsianym polu zbożem jarym (współczynnik szorstkości terenu $z_0=0,05$), drugi punkt natomiast na łące o wysokości trawy kilku centymetrów (współczynnik szorstkości terenu $z_0=0,01$). Pomiary wykonywano w ciągu dwóch dni, podczas których odnotowano odmienny kierunek wiatru. W związku z tym położenie punktów referencyjnych było zmienne. Obydwa punkty referencyjne, w zależności od terminu pomiarów, mieściły się w rzadkim lesie (drzewa sosnowe i zarośla drzew liściastych – współczynnik szorstkości terenu $z_0=0,3$).

Pomiary parametrów akustycznych hałasu wykonano cyfrowym analizatorem dźwięku łączącym w sobie funkcjonalność miernika poziomu dźwięku i analizatora w pasmach częstotliwości (o dokładności odpowiadającej klasie 1 – w rozumieniu normy PN-EN 61672-1:2005, oraz cyfrowemu przetwarzaniu mierzonego sygnału) z wkładką mikrofonową. Przyrząd wyposażony jest w interfejs umożliwiający komunikację dwukierunkową z komputerem klasy PC oraz w program umożliwiający sterowanie miernikiem, odczyt zarejestrowanych wyników oraz analizę danych. Pomiary przeprowadzono w pasmach 1/3-oktawowych zgodnie z wytycznymi normy [1]. Dodatkowo wykonano pomiary poziomu ciśnienia akustycznego w odległości około 1 km i 2 km od masztu z turbiną wiatrową, na linii zabudowy najbliższej położonych wsi.

Analiza wyników i wnioski

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że:

- średnia prędkość wiatru na wysokości gondoli siłowni wiatrowej w stosunku do prędkości referencyjnej na wysokości 10 m jest wyższa o około 2-3 m/s,
- najbardziej wiarygodne pomiary hałasu turbin powinny być przeprowadzane przy prędkości 5 m/s na wysokości referencyjnej, ponieważ przy prędkości powyżej 10 m/s turbina uzyskuje moc maksymalną.

Na podstawie pomiarów poziomu tła akustycznego stwierdzono, że jest ono silnie uzależnione od prędkości wiatru;

- przy prędkości wiatru powyżej 10 m/s osiąga wartość nawet 60 dB(A),
- przy mniejszych prędkościach wiatru, tło akustyczne waha się w granicach $30 \div 40$ dB(A),
- poziomy dźwięku w odległości 1000 m i 2000 m (na granicy linii zabudowy pobliskiej wsi) od siłowni - równe są w zasadzie poziomowi tła akustycznego i wynoszą od 32 do 37 dB(A), zarówno w porze dziennej jak i nocnej.

Na podstawie wyników pomiaru hałasu badanej turbiny, można stwierdzić, że badany maszt z własną turbiną wiatrową o osi pionowej **nie stwarza zagrożenia** dla środowiska pod względem emitowanego hałasu słyszalnego, ponieważ dopuszczalne wielkości parametrów akustycznych nie zostały przekroczone.

Dalszym kierunkiem badań będą pomiary i analiza infradźwięków emitowanych przez omawiany generator wiatrowy.

Literatura

- [1] PN-EN 61400-11 Turbozespoły wiatrowe, Część 11: Procedury pomiaru hałasu
- [2] Krajowy plan działań w zakresie energii ze źródeł odnawialnych z dnia 7 grudnia 2010 r.
- [3] Berent-Kowalska G., Energia ze źródeł odnawialnych w 2013 r., Główny Urząd Statystyczny, Warszawa 2014.
- [4] K. Badyda, Energetyka wiatrowa. Aktualne trendy rozwoju w Polsce. Energetyka, 2013, s. 339-398.
- [5] Raport 2015 KSE, [online] dostęp zdalny: <http://www.pse.pl/index.php?did=2870>.
- [6] Strzyżewski J., Kontrowersje związane z budową elektrowni wiatrowych, Elektro instalator, 08/2014, [online] dostęp zdalny: <http://www.elektroinstalator.com.pl>.
- [7] Hałas słyszalny, [online] dostęp zdalny: <http://www.oddziaływaniawiatrakow.pl>.
- [8] Lebedowska B., Parametry propagacji hałasu w terenach otwartych, Pułtusk 2007.
- [9] Eja Pedersen, KerstinPerssonWaye, Perception and annoyance due to wind turbine noise a dose response relationship, Acoustical Society of America, 2004, s. 3460-470.
- [10] Ustawa z dnia 20 maja 2016r o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych (Dz. U. poz. 961)
- [11] Strzyżewski J., Energia wiatrowa i fotowoltaika w kontekście nowej ustawy OZE oraz ustawy „wiatrakowej”, Elektro instalator, 09/2016, [online] dostęp zdalny: <http://www.elektroinstalator.com.pl>.
- [12] Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 14 czerwca 2007 r. w sprawie dopuszczalnych poziomów hałasu w środowisku (Dz. U. nr 120, poz. 826 z późn. zm.)
- [13] PN-Z-01338:2010 Pomiar i ocena hałasu infradźwiękowego na stanowiskach pracy.
- [14] Nalepa K., Miąskowski W., Pietkiewicz P., Plechocki J., Bogacz P., Poradnik małej energetyki wiatrowej, Olsztyn 2011.

inż. Michał Rościszewski¹⁾

Politechnika Gdańska, Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Koło Naukowe Inżynierii i Gospodarki Wodnej „Konfuzor”

¹⁾ michal.roszczewski@gmail.com

ANALIZA MODELU HYDROLOGICZNEGO ZLEWNI NATURALNEJ POTOKU OLIWSKIEGO POD KĄTEM OCHRONY PRZECIWPOWODZIOWEJ ORAZ ZDOLNOŚCI RETENCYJNEJ

Analysis of hydrological model of Potok Oliwski's
natural catchment for flood protection and retention
capability

Słowa kluczowe: zlewnia, potok, współczynnik spływu, czas koncentracji, gospodarka wodna, ochrona przeciwpowodziowa, modelowanie, wezbranie.

Keywords: catchment, stream, runoff coefficient, time of concentration, water management, flood protection, model, spate.

Streszczenie:

Przedmiotem niniejszego opracowania jest model hydrologiczny zlewni fragmentu Potoku Oliwskiego. Obszar ten charakteryzuje się bardzo małą ilością powierzchni zurbanizowanych. Znaczną większość terenu (ponad 90%) pokrywają lasy Trójmiejskiego Parku Krajobrazowego. Może to prowadzić do wniosku, że zastanawianie się nad formowaniem się odpływu z tej zlewni w kontekście zagrożenia powodziowego jest całkowicie nieuzasadnione. Jednak zlewnia ta charakteryzuje się innymi czynnikami, które owo zagrożenie generuje i którym należy się przyjrzeć. Podstawową cechą analizowanego terenu jest występowanie gleb o ni-

skiej przepuszczalności (gliny zwałowe i piaszczyste, ility pylaste). Redukuje to w znacznym stopniu infiltrację opadów atmosferycznych w podłoże i generuje większy spływ powierzchniowy. Kolejnym czynnikiem, który determinuje potencjał powodziowy tej części zlewni Potoku Oliwskiego to miejscami występujące bardzo duże spadki terenu (osiągające wartości nawet do kilkunastu procent).

W opracowaniu skupiono się na stworzeniu modelu hydrologicznego zlewni, który jak najlepiej oddaje rzeczywiste warunki. W tym celu przeanalizowano podłoże gruntowe, topografię terenu, sposób jego użytkowania, charakterystykę koryt Potoku oraz obciążono zlewnię odpowiednim opadem syntetycznym. Uzyskano wyniki w postaci konkretnych wartości odpływu w poszczególnych przekrojach zamykających dane fragmenty zlewni. Przeanalizowano owe wyniki pod kątem znalezienia odpowiedniego miejsca na zaprojektowania zbiornika suchego dla poprawy retencji zlewni.

Wstęp

Artykuł dotyczy problematyki zagrożenia powodziowego w Gdańsku, a konkretnie w obszarze zlewni naturalnej Potoku Oliwskiego. Zastanawiające jest dlaczego występuje takie zagrożenie na terenie zlewni naturalnej. Otóż prawie całość zlewni składa się z gęstych lasów należących do Trójmiejskiego Parku Krajobrazowego. W dalszej części artykułu rozwinęto to zagadnienie i omówiono dlaczego w tym przypadku zasadne jest prowadzenie tego rodzaju badań.

Współcześnie we wszystkich miastach mamy do czynienia z rozwojem gospodarczym i postępującą urbanizacją. Wiąże się to zazwyczaj z powstawaniem szczelnych powierzchni np. parkingów, centrów handlowych, hal magazynowych, obszarów przemysłowych, lotnisk itp. Wpływa to niekorzystnie gdyż zwiększa znacznie spływ powierzchniowy wywołany opadem nawałnym a w konsekwencji generuje większe fale wezbraniowe. Problem ten zaczyna być dostrzegalny i szuka się rozwiązań w postaci zachęcania inwestorów do nowoczesnego podejścia i stosowania jak największej obszarów zielonych w pobliżu budynków, czy też takich rozwiązań jak „zielone dachy”. Mimo tego problem nadal występuje i jest zmartwieniem dla współczesnych hydrologów i dla administratorów sieci kanalizacji deszczowej.

Analizowany fragment Potoku Oliwskiego przebiega przez obszar zalesiony gdzie nie przewiduje się szkód związanych z nadmiarem wód deszczowych. Należy pamiętać jednak, że to co dzieje się w tej części zlewni ma również wpływ na to co się wydarzy poniżej. Dolne odcinki Potoku Oliwskiego, które już nie podlegają niniejszemu opracowaniu, przebiegają przez tereny mocno zurbanizowane, gdzie ryzyko powodziowe jest realne. Ponadto nawet gdyby skupiono się tylko na części zlewni naturalnej to faktem jest, że podczas powodzi, która wystąpiła w lipcu 2016 roku w Gdańsku, nastąpiło uszkodzenie zbiorników znajdujących się na tym Poto-

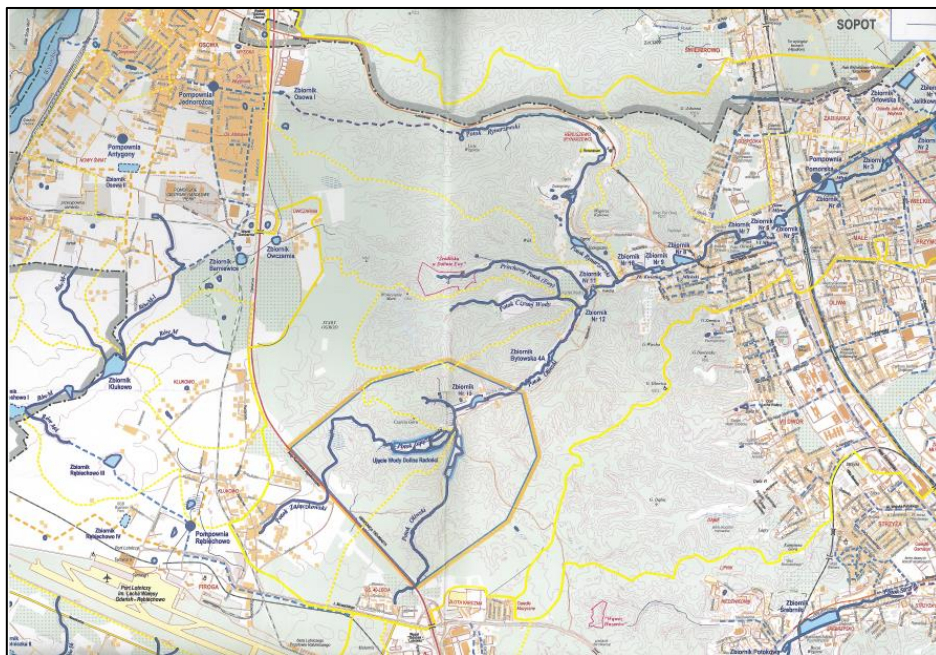
ku. Co najistotniejsze, jeden z tych zbiorników znajdował się w samym środku analizowanego obszaru zlewni leśnych. Świadczy to o tym, że problem jest realny i zasadne jest prowadzenie badań pod tym kątem.

Niniejsze opracowanie powstało w związku z opracowywaniem koncepcji projektowej nowego zbiornika suchego, który miałby być zlokalizowany na którymś z odcinków przebiegających przez obszar leśny. Obecnie, szuka się najlepszego rozwiązania dla poprawy retencyjności tego obszaru, mając ponadto na uwadze względy ekonomiczne oraz lokalne tzn. to gdzie jest możliwość usytuowania takiego zbiornika pod kątem praw własności do gruntów itp. To już nie podlega niniejszemu opracowaniu, skupiono się wyłącznie na analizie sytuacji pod kątem hydrologicznym i przeprowadzeniu wstępnej dyskusji wyników.

Lokalizacja zlewni

Potok Oliwski to struga, która na większości swojej długości znajduje się na terenie Trójmiejskiego Parku Krajobrazowego. Park ten obejmuje powierzchnię 19930 ha i znajduje się w województwie pomorskim na północno-wschodnim fragmencie wysoczyzny morenowej Pojezierza kaszubskiego [1]. Zawiera w większości tereny gęsto zalesione i rzadziej występujące tereny rolnicze.

Analizowany teren zlewni Potoku Oliwskiego znajduje się w pobliżu miejscowości wchodzących w skład Trójmiasta: Gdańska, Sopotu i Gdyni. Potok Oliwskim w swoim dalszym biegu (który już nie podlega opracowaniu) biegnie przez dzielnice Gdańska: Oliwę, Przymorze Małe oraz Przymorze Wielkie, uchodząc do Zatoki Gdańskiej, stanowiąc jednocześnie odbiornik ścieków deszczowych z tych miejscowości.

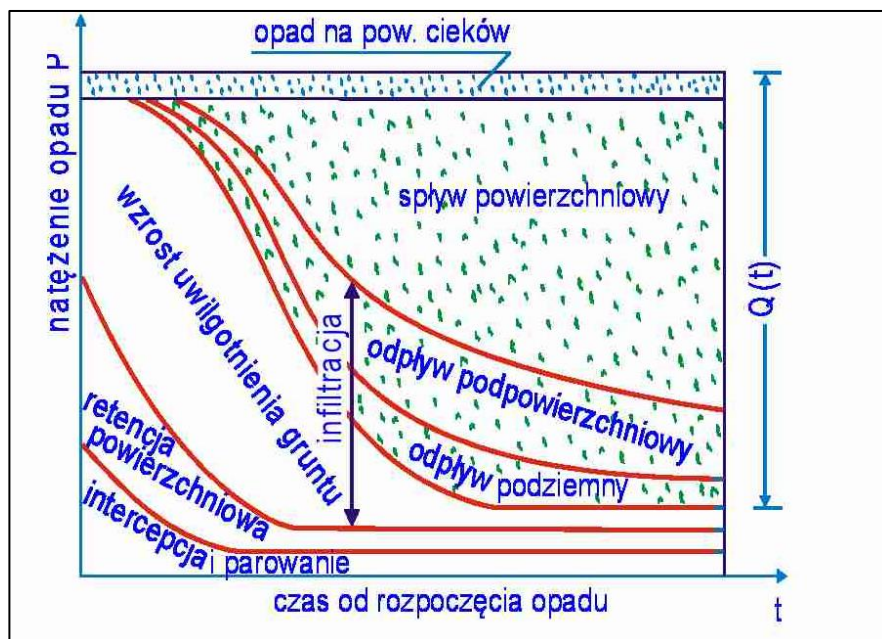


Rys. 1. Lokalizacja analizowanych odcinków w modelu hydrologicznym.

Źródło: http://gdmel.pl/phocadownload/Infrastruktura/wody_Gdanska_1.jpg

Czynniki wpływające na formowanie się odpływu ze zlewni naturalnej

Powszechnie przyjmuje się, że formowanie się odpływu ze zlewni jest podzielone na kilka etapów zależnych od czasu trwania deszczu, warunków panujących w zlewni itp. Procesy, które zachodzą od momentu wystąpienia opadu do stworzenia się opadu efektywnego zależą od bardzo wielu czynników omówionych już wcześniej w artykule. W przypadku analizowanej zlewni procesy te będą zachodzić w sposób szczególny, nieprzypominający standardowego formowania się odpływu ze zlewni naturalnej leśnej.



Rys. 2. Formowanie się odpływu ze zlewni

Źródło: Szymkiewicz R., Gąsiorowski D.: Podstawy Hydrologii Dynamicznej. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne. Warszawa 2010

Opad deszczu w pierwszej kolejności zostaje wykorzystany na retencję powierzchniową, która w zlewni naturalnej, w której występuje bogata roślinność w postaci drzew liściasto-iglastych, krzewów i traw jest bardzo znacząca i z pewnością musi być uwzględniona w obliczeniach odpływu. W związku z tym obszar przedstawiony na rysunku 2.2 związany z retencją powierzchniową będzie z pewnością duży. Jednak jak podano w podrozdziale 2.4 zlewnia naturalna Potoku Oliwskiego jest bardzo nietypowa jeśli chodzi o warunki gruntowo-wodne. Występuje w niej bardzo mała przepuszczalność gruntów, spowodowana występowaniem ośrodka porowatego o bardzo małym współczynniku filtracji, charakterystycznego dla gruntów ilastych oraz glin. Owa niska przepuszczalność sprawia, że bardzo mała część opadu całkowitego formuje się jako opad infiltrujący w powierzchnię i generujący wzrost uwilgotnienia gruntu oraz odpływ podziemny.

Z powyższych powodów nie zachodzi zatem w sposób znaczący proces wzrostu uwilgotnienia gruntu spowodowany opadem. Po pierwsze wpływa na to mała przepuszczalność gruntów, a po drugie z uwagi na występujące duże spadki terenu opady deszczu w pierwszej kolejności formują się jako spływ powierzchniowy, a dopiero w późniejszej fazie jako wody infiltracyjne. Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na ten aspekt jest również wysoki niekiedy poziom wód gruntowych. Na jednym z przekrojów hydrogeologicznych analizowanej zlewni (Rysunek 2.4)

można zauważyć, że występują tam nawet grunty podmokłe i bagienne co całkowicie eliminuje ten etap, bo nie ma już możliwości aby zwiększyć uwilgotnienie tych terenów.

Podsumowując, można zauważyć, że charakterystyka zlewni powoduje, iż standardowy schemat formowania się odpływu nie ma zastosowania dla analizowanego obszaru. Cały proces infiltracji w podłoże jest bardzo ograniczony, a odpływ podziemny i podpowierzchniowy wynikają raczej ze stałej filtracji wód podziemnych na tym obszarze, a nie pozostają pod znaczącym wpływem opadów deszczu. Zatem etap spływu powierzchniowego jest w tym przypadku głównym docelowym etapem dla intensywnych opadów deszczu.

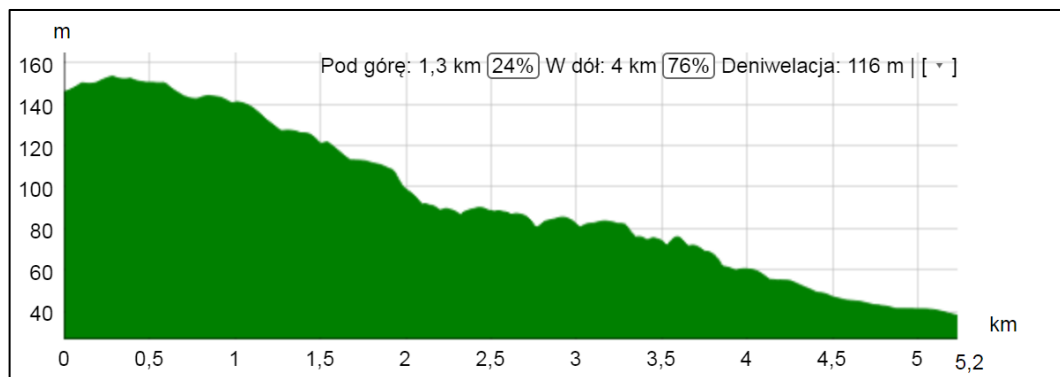
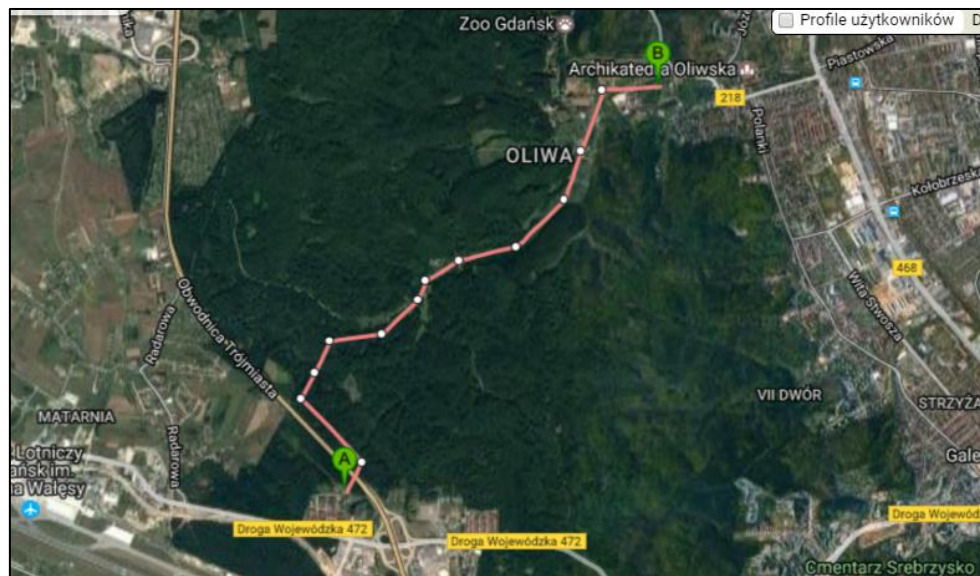
Topografia terenu

Topografia terenu zlewni Potoku Oliwskiego jest z pewnością istotnym elementem wpływającym na problem występowania zagrożenia powodziowego. Wiadoczną jest tu polodowcowa rzeźba terenu, uformowana przez procesy związane ze zlodowaceniem bałtyckim, a zwłaszcza z jego ostatnią fazą pomorską - od 15 do 13 tysięcy lat temu, od której zaczęło się ostateczne, jak dotąd, wycofywanie lądolodu [1].

Na rysunku 2.3 przedstawiono przykładowy profil topograficzny terenu, przebiegający w pobliżu głównej trasy Potoku Oliwskiego. Rzędne terenu w dzielnicy Matarnia, gdzie Potok rozpoczyna swój bieg sięgają wartości około 155m n.p.m. Najniżej położone tereny w dzielnicy Oliwa, uwzględnione w analizie zlewni naturalnej kształtują się na poziomie około 45m n.p.m. Największe deniwelacje terenu wynoszą około 110m, czyli są wartościami charakterystycznymi bardziej dla obszarów górskich. Odległość pomiędzy tymi terenami to około 5,2km co oznacza, że średni spadek terenu wzdłuż Potoku wynosi około 2%. Miejscami spadki terenu wynoszą nawet do kilkunastu procent.

Warto również wspomnieć, że nie tylko sam teren wzdłuż Potoku posiada tak duży spadek. Zlewnie cząstkowe przyporządkowane do Potoku Oliwskiego również posiadają bardzo wysokie spadki (nawet rzędu 20%).

Analizując profil terenu można łatwo dojść do wniosku, że warunki topograficzne są bardzo niekorzystne pod względem ochrony przeciwpowodziowej i retencyjności tego terenu.

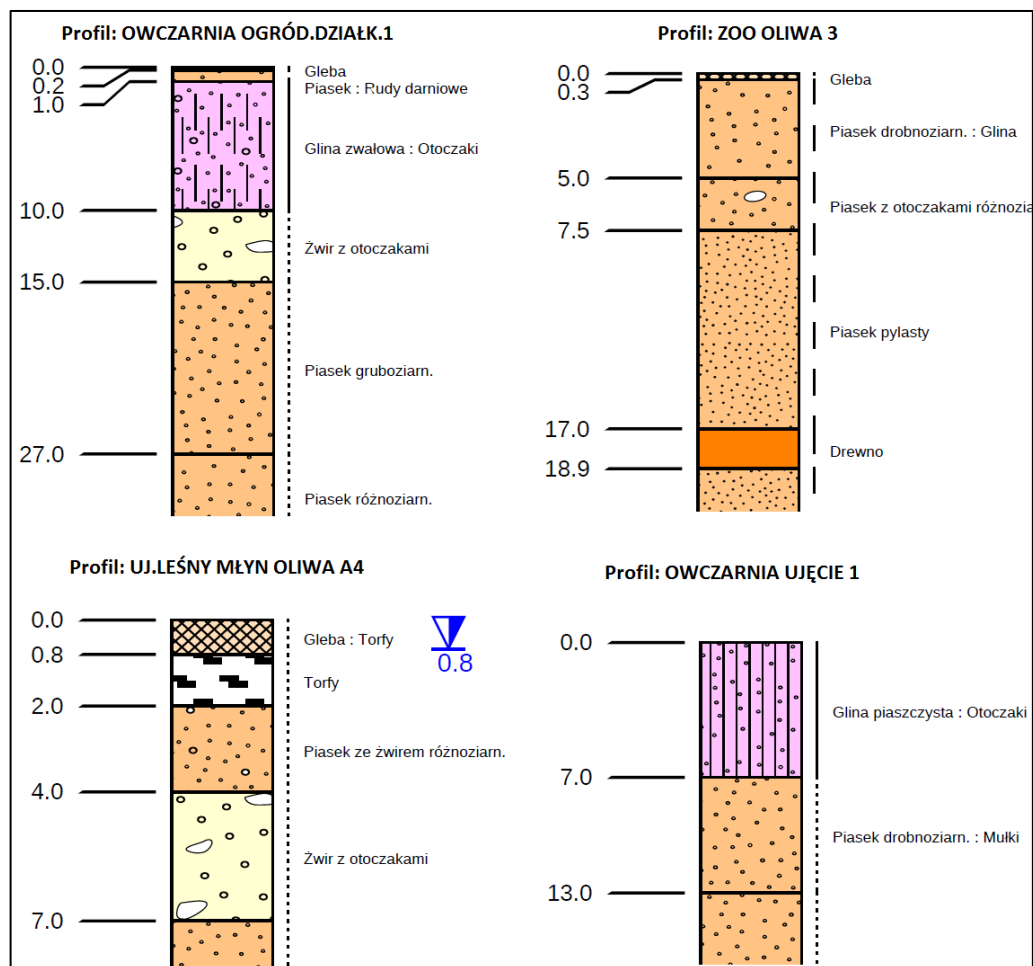


Rys. 3. Profil topograficzny analizowanego terenu

Źródło: geocontext.org/publ/2010/04/profiler/pl

Warunki gruntowo wodne

Do analizy warunków gruntowo wodnych wykorzystano dane z Państwowego Instytutu Geologicznego [2]. Jak wspomniano w rozdziale 2.2. warunki te są niekorzystne i to one w bardzo dużej mierze generują problematykę zagrożenia powodziowego. Poniżej przedstawiono profile hydrogeologiczne czterech wybranych lokalizacji znajdujących się w różnych punktach na analizowanej zlewni.



Rys. 4. Profile hydrogeologiczne zlewni Potoku Oliwskiego

Źródło: m.bazagis.pgi.gov.pl/cbdg

W procesie formowania się odpływu ze zlewni bardzo istotną rolę ma zdolność infiltracyjna podłoża. Mówiąc prościej, istotne z punktu widzenia analizy jest informacja jaka ilość wód deszczowych zostanie „utracona” w wyniku infiltracji w podłoże, zasilając wody podpowierzchniowe i podziemne. Analizując poniższe profile hydrogeologiczne można zauważyć przewagę gruntów słabo przepuszczalnych takich jak gliny czy piaski pylaste. Takie warunki często powodują, że opad atmosferyczny, który opadnie na podłoże (po wykorzystaniu zdolności retencyjnej szaty roślinnej itp.) natychmiast spowoduje spływ powierzchniowy.

Stąd również logiczne jest, że zwierciadła wód podziemnych kształtują się bardzo głęboko pod powierzchnią terenu. Wyjątkiem są tereny w okolicy Leśnego

Młyna, gdzie mamy do czynienia z relatywnie nisko położonymi rejonami, które uformowały się jako tereny bagienne i torfowiska.

Sposób użytkowania powierzchni zlewni

To w jaki sposób powierzchnia zlewni jest użytkowana i zagospodarowana wpływa w znaczący sposób na przyjmowanie parametrów obliczeniowych w modelu hydrologicznym. Jak wspomniano wcześniej zdecydowana większość zlewni znajduje się na obszarze Trójmiejskiego Parku Krajobrazowego co determinuje w znacznym stopniu sposób użytkowania powierzchni. Wiadomo, że występują tu głównie obszary gęsto zalesione.

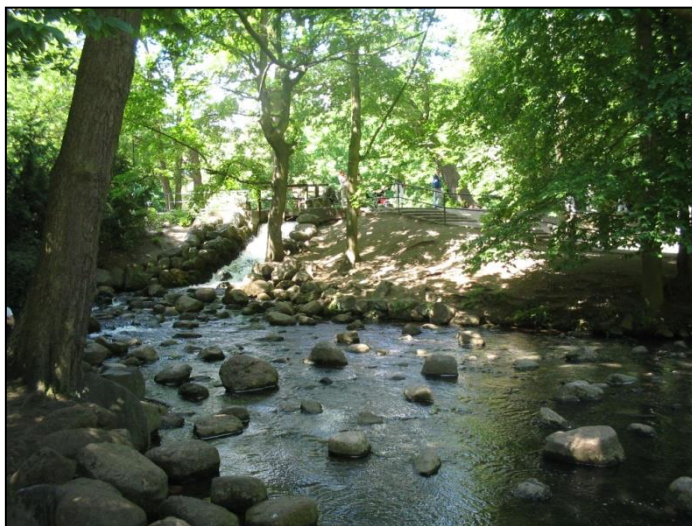
Jeśli chodzi o roślinność to najczęściej występującymi gatunkami drzew są tu: buk pospolity, dąb bezszypułkowy i szypułkowy, sosna zwyczajna, brzoza brodawkowata i omszona, olcha czarna, topola osika, wierzba iwa, jarzębina, grab zwyczajny i jesion wyniosły [1].

Fakt, że teren powierzchni zlewni składa się z gęstej leśnej roślinności wpływa korzystnie na obliczenia hydrologiczne, ponieważ powoduje znaczące straty początkowe dla opadu deszczu. Jest to pewnego rodzaju zatrzymanie wody deszczowej nazywane często retencją roślinną. Na obszarze zlewni naturalnej rzadko występują tereny zamieszkałe, które mogłyby spowodować przyjęcie innych strat początkowych dla opadu. Są to pojedyncze działki rolnicze, młyny itp. Z powodu małej ilości tego rodzaju obszarów w porównaniu do terenów leśnych, zdecydowano się nie uwzględniać ich w obliczeniach.

Charakterystyka koryt potoku

Trasy Potoku Oliwskiego oraz jego dopływów biegną na ogół przez tereny zalesione (mowa o odcinkach dotyczących zlewni naturalnej powyżej zbiornika Kwietna). W związku z tym koryto rzeczne charakteryzuje się dużo ilością kamieni oraz różnorodnej roślinności i wodorostów. Niekiedy zdarza się, że w korytach znajdują się grube gałęzie lub pnie, które dodatkowo powodują piętrzenie wody w okresie wezbrań. Innymi elementami które mogą niekorzystnie wpływać na zagrożenie powodziowe są kładki, mosty oraz przepusty, występujące na badanych ciekach.

Istotnym zagadnieniem z punktu widzenia obliczeń natężenia przepływu było określenie współczynnika szorstkości według Manninga. Dla koryt o takiej charakterystyce zazwyczaj przyjmuje się, że ów współczynnik wynosi około $k=0,035$ [3]. We wstępnej koncepcji analizy hydrologicznej przyjęto taki współczynnik dla wszystkich odcinków cieków. Będzie on weryfikowany na dalszym etapie pracy poprzez wizję lokalną i w zależności od potrzeby korygowany.



Rys. 5. Koryto Potoku Oliwskiego na terenie Parku Oliwskiego.

Źródło: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f3/Oliwa_park_03.jpg

Geometria koryt potoków analizowanej zlewni jest zróżnicowana. Na ogół szerokość koryta waha się w przedziale od 0,5m do nawet kilku metrów. W programie przyjęto wstępnie geometrie kanału jako trapez o szerokości dna 2m oraz o nachyleniu skarp 45°. Owe wartości charakteryzujące geometrię zostaną zweryfikowane poprzez dokładniejszą wizję lokalną terenu i skorygowane w kolejnych etapach pracy.

Kolejną istotną cechą potoków w obrębie analizowanej zlewni naturalnej jest występowanie relatywnie dużych spadków terenu. Zdecydowana większość odcinków potoków zarówno Oliwskiego jak i Prochowego czy Potoku Czystej Wody posiada spadek przewyższający 1,5%. Zgodnie z Prawem Wodnym [4] należy takie ciekі traktować jako ciekі górskie.

Miarodajne natężenie deszczu

Bardzo trudnym zadaniem dla współczesnej hydrologii jest określenie jak najbliższego rzeczywistemu natężenia deszczu, czyli objętości deszczu przypadającego na jednostkę powierzchni w jednostce czasu. Procesy zachodzące w atmosferze, generujące opady deszczu są procesami gwałtownie zmieniającymi się w sposób

dynamiczny i często nieprzewidywalny. Nie ma obecnie jednoznacznego i skutecznego sposobu określania tego parametru.

Aby odnaleźć jak najskuteczniejszy sposób określenia natężenia deszczu, należy przyrzeć się po pierwsze temu od jakiej ilości parametrów zależy wynik w danej metodzie obliczeniowej, a po drugie czy te dane są wystarczająco wiarygodne aby móc je przyjąć do obliczeń tj. nie są obciążone tak dużym błędem, że branie ich pod uwagę jest zasadne. Wiadomo, że natężenie deszczu bardzo mocno zależy od położenia geograficznego, a najlepsze metody obliczeniowe dla danego rejonu to metody lokalne, czyli oparte na cechach charakterystycznych danego regionu.

Przykładowo w Polsce, niepoprawne jest stosowanie tych samych formuł obliczeniowych dla Gdańska lub rejonów górskich na południu kraju z uwagi na wysokości względem poziomu morza oraz różnice klimatu wynikające np. z odległości od morza. Jest to potwierdzone wieloletnimi pomiarami, zgodnie którymi np. średnia roczna wysokość opadu dla Gdańska wynosi 600-650mm, natomiast dla terenów górskich na południu polski nawet do 1000mm [5]. Mówiąc o średniorocznej sumie opadu, należy zaznaczyć że jest to inne zagadnienie od maksymalnego przyjmowanego deszczu obliczeniowego jednak jest to dobry przykład na pokazanie jak ważne jest skupienie się na dostosowaniu metody obliczeniowej do analizowanej lokalizacji.

Jak opisano wyżej deniwelacje terenu mają znaczący wpływ na obliczenia natężenia deszczu. W analizie niniejszego modelu hydrologicznego zdecydowano się nie uwzględniać owych różnic terenu z powodu braku wiarygodnych danych oraz wiedzy w jaki sposób można to ująć. Jednak warto zasygnalizować, że jest to kwestia do rozpatrzenia w dalszych etapach badań, ponieważ charakter topografii analizowanej zlewni jest nietypowy i nie należy bezkrytycznie tego aspektu pomijać.

W zagadnieniach inżynierskich obliczania natężenia deszczu miarodajnego zazwyczaj należy zastanowić się jaką metodę obliczeń wybrać. Często zależy to od tego co dokładnie planujemy osiągnąć. Dosyć intuicyjne wydają się to, że obliczając przepustowość maksymalną jakiegoś urządzenia wodnego, bardziej praktyczne będą obliczenia na podstawie parametrów, które przyjmie się z nadmiarem aby być „po bezpiecznej stronie”. Innym zagadnieniem może być wymiarowanie urządzeń kanalizacyjnych, gdzie wysoki priorytet ma podejście ekonomiczne do zagadnienia i obawiamy się przewymiarowania.

W niniejszym opracowaniu zdecydowano się wykorzystać do obliczeń natężenia deszczu wzór opracowany w 1998r w Instytucie Meteorologii i Gospodarki Wodnej w Warszawie (Bogdanowicz i Stachy) [6].

$$P_{\max,d} = 1,42 * t_m^{0,33} + \alpha * (-\ln p)^{0,548} \text{ [mm]} \quad (1)$$

gdzie:

t_m – czas trwania deszczu [min]

α – parametr położenia i skali [-]

p – prawdopodobieństwo wystąpienia opadu [-]

Parametr α w powyższym równaniu uwzględnia położenie geograficzne analizowanej lokalizacji. Przedmiotowa zlewnia znajduje się w Gdańsku czyli regionie północno-zachodnim Polski i przyjmuje się, że parametr ten, w zależności od czasu trwania deszczu t_m wynosi:

$$\alpha = 3,92 * \ln(t_m + 1) - 1,662, \text{ dla } t_m=5-30\text{min} \quad (2)$$

oraz:

$$\alpha = 8,944 * \ln(t_m) - 18,6, \text{ dla } t_m=30-60\text{min} \quad (3)$$

Powyższe obliczenia pozwoliły wyznaczyć wartość opadu syntetycznego, którą należy wprowadzić do programu modelującego.

Prawdopodobieństwo wystąpienia opadu

Obliczenia hydrologiczne wykonuje się z wykorzystaniem przyjętego prawdopodobieństwa wystąpienia opadu p . Jego wartość jest wyrażona w procentach i można ją zdefiniować jako liczbę epizodów przekroczenia określonej intensywności opadów w okresie 100 lat, zatem wartość $p=1\%$ to opad który wystąpi statystycznie raz na 100 lat. W praktyce wartość prawdopodobieństwa przyjmuje się na podstawie wytycznych ponieważ brakuje innych rozpoznanych i uzasadnionych schematów postępowania. Często przyjmowanie tego współczynnika zależy od rodzaju projektowanego obiektu, jego lokalizacji itp. [6].

Dla analizowanego modelu hydrologicznego aby w sposób jak najbardziej miarodajny pokazać skalę problemu zaproponowano przyjęcie prawdopodobieństwa $p=1\%$. Nie jest to oczywiście wartość wiążąca. Wyniki zwrócone przez program mogą zostać poddane analizie, wartość p można zmienić lub wykonać obliczenia dla kilku wariantów prawdopodobieństwa wystąpienia danego opadu. W niniejszym opracowaniu skupiono się na ukazaniu wszystkich cech zlewni mających wpływ na obliczenia i sposobie ich uwzględnienia. Analizę wyników należy prowadzić pamiętając o założonej wartości prawdopodobieństwa, co pozwoli na uniknięcie formułowania nieprawidłowych wniosków.

Miarodajny czas trwania deszczu

Parametr bez którego niemożliwe jest wykonanie obliczeń w programie to czas opóźnienia (Lag time). W programie określa się go dla każdej podzlewni oddzielnie wprowadzając go w odpowiednie pole. Do prawidłowego określenia wartości tego parametru niezbędne jest uwzględnienie czasu koncentracji odpływu z danej zlewni. Dla zlewni naturalnych o skomplikowanych drogach spływu często zdarza się, że wody opadowe z najbardziej odległych obszarów pojawiają się w przekroju za-

mykającym później niż maksimum fali odpływowej. Bardzo często zakłada się, że czas opóźnienia stanowi 60% czasu koncentracji.

Czas koncentracji dla podzlewni należałoby rozważyć przede wszystkim jako skoncentrowany przepływ wody płytkiej [6]. Z uwagi na wysokie spadki terenu nie mamy do czynienia w tym przypadku z przepływem stokowym. Ponadto, ponieważ ujmujemy w programie modelującym poszczególne fragmenty zlewni, nadając im odpowiednie parametry i zakładając ich przekrój zamykający w odpowiednich punktach na kanałach odprowadzających, nie musimy w czasie koncentracji uwzględniać czasu przepływu w kanale, który jest ujęty we właściwościach kanału poprzez wprowadzenie długości, spadku oraz współczynnika szorstkości wg Manninga. Stąd też w tym przypadku czas koncentracji dla zlewni będzie równy czasowi skoncentrowanego przepływu wody płytkiej, wyrażanym równaniem empirycznym postaci:

$$t_c = \frac{L_s}{v} = \frac{L_s}{10 * k * i_s^{0,5}} \quad (4)$$

gdzie:

v – prędkość spływu [m/s]

L_s – długość najniekorzystniejszej drogi spływu [m]

k – parametr charakteryzujący pokrycie terenu [-]

i_s – spadek drogi spływu [-]

Tabela 1. Obliczenia czasu opóźnienia dla podzlewni kilku przykładowych fragmentów Potoku Oliwskiego

Lp	Symbol podzlewni	k [-]	H _g [m]	H _d [m]	L _s [m]	i _s [-]	v [m/s]	t _c [min]	Lag time [min]
1	PO1	0,50	147	135	428	0,028	0,84	8,52	5,11
2	PO2	0,08	140	130,5	883	0,011	0,08	186,69	112,01
3	PO3	0,08	137	130	503	0,014	0,09	88,83	53,30
4	PO4	0,08	148	130	742	0,024	0,12	99,25	59,55
5	PO5	0,08	160	83	1983	0,039	0,16	209,65	125,79
6	PO6	0,08	140	83	1630	0,035	0,15	181,59	108,96
7	PO7	0,08	140,5	82	462	0,127	0,28	27,05	16,23
8	PO8	0,08	127	82	344	0,131	0,29	19,81	11,89
9	PO9	0,08	144	80	448	0,143	0,30	24,69	14,82
10	PO10	0,08	125	80	544	0,083	0,23	39,40	23,64

Źródło: Opracowanie własne

Warto wspomnieć, że problematycznym zagadnieniem w wyznaczaniu wartości czasu opóźnienia jest poprawne ujęcie najmniej korzystnej linii spływu. Należy pamiętać, że nie zawsze jest to najdłuższa odległość na mapie. Położenie i długość tej linii zależy również od sposobu pokrycia terenu, uwzględnionego poprzez współczynnik k oraz od spadku terenu zlewni. W tabeli 3.1 przedstawiono obliczenia dla niektórych fragmentów analizowanego cieku.

Sposób uwzględnienia parametrów w programie HEC-HMS

Do obliczeń hydrologicznych wykorzystano oprogramowanie HEC-HMS 4.1. Jest to program opracowany na potrzeby US Army Corps, jednak do swobodnego bezpłatnego wykorzystania. Jest to prosty program, który nie wymaga wprowadzania numerycznego modelu terenu, a jedynie określenia wszystkich elementów zlewni poprzez wartości geometryczne. W podrozdziale 4.3 przedstawiono schemat modelu matematycznego analizowanej zlewni naturalnej.

Wywołanie obliczeń hydrologicznych na potrzeby niniejszego opracowania sprowadzało się do stworzenia sieci potoków i zlewni poprzez połączenie ze sobą koryt rzecznych oraz przyporządkowanie do nich poszczególnych zlewni. Ponadto wprowadzono w odpowiednich miejscach zbiorniki retencyjne. Sposób uwzględnienia pracy zbiorników w modelu przedstawiono w kolejnym rozdziale.

W przypadku informacji o poszczególnych kanałach konieczne było w pierwszej kolejności określenie usytuowania danego odcinka kanału w sieci hydrograficznej. W tym celu należało określić w jakim węźle obliczeniowym dany odcinek kanału kończy swój bieg poprzez wprowadzenie odpowiedniej nazwy. Następnie należało określić sposób obliczenia transformacji fali wezbraniowej w kanale (na rysunku 4.2 znajdują się wartości przykładowe).

Geometrię kanału określono poprzez wprowadzenie jego długości oraz spadku, obliczonego na podstawie tej długości oraz różnicy rzędnych początku i końca, określonych za pomocą map zasadniczych. Kolejnym elementem było wprowadzenie współczynnika szorstkości wg Manninga oraz geometria przekroju koryt, którą omówiono w podrozdziale 2.6.

The image shows two side-by-side screenshots of the HEC-HMS 4.1 software interface, specifically the 'Routing' tab. Both windows show data for a basin named 'Potok Oliwski' and an element named 'PO1'. The left window shows the 'Basin Name: Potok Oliwski', 'Element Name: PO1', 'Description:' (empty), 'Downstream:' (Węzeł 1), 'Routing Method:' (Muskingum-Cunge), and 'Loss/Gain Method:' (None--). The right window shows the same basin and element name, but with additional parameters: 'Time Step Method:' (Automatic Fixed Interval), '*Length (M):' (178), '*Slope (M/M):' (0.008), '*Manning's n:' (0.012), 'Invert (M):' (empty), 'Shape:' (Circle), and '*Diameter (M):' (1).

Rys. 5. Fragment interfejsu programu HEC-HMS 4.1: dane kanału

Źródło: HEC-HMS 4.1

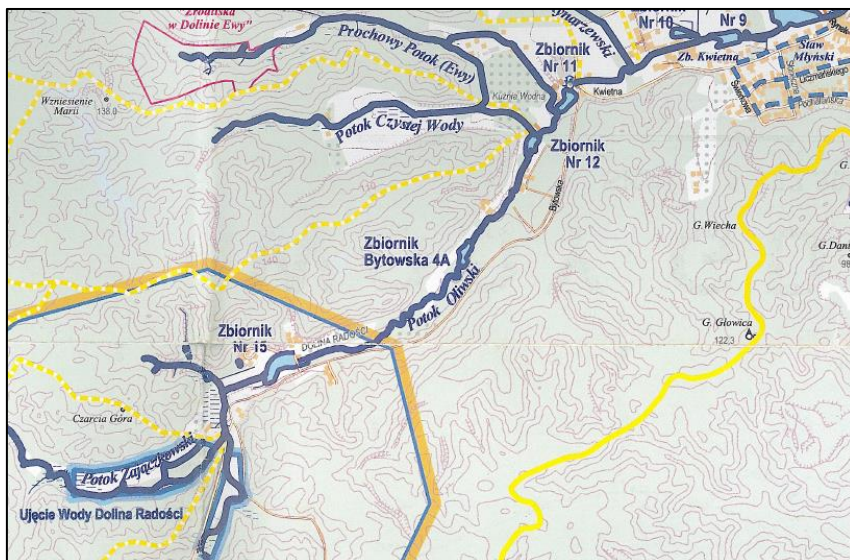
The screenshot displays the 'Options' tab for a subbasin named 'Zlewnia' and element 'P015'. The interface is split into two main sections. The left section contains general basin data: 'Description' (empty), 'Downstream' (O9), '*Area (KM2)' (0.0085), and fields for Latitude and Longitude in Degrees, Minutes, and Seconds. Below these are dropdown menus for 'Canopy Method' (set to --None--), 'Surface Method' (set to --None--), 'Loss Method' (SCS Curve Number), 'Transform Method' (SCS Unit Hydrograph), and 'Baseflow Method' (set to --None--). The right section contains element-specific parameters: 'Initial Abstraction (MM)' (11), '*Curve Number' (77), '*Impervious (%)' (25), 'Graph Type' (Standard (PRF 484)), and '*Lag Time (MIN)' (11.25). Each section has its own set of tabs: 'Subbasin', 'Loss', 'Transform', and 'Options'.

Rys. 6. Fragment interfejsu programu HEC-HMS 4.1: dane podzlewni

Źródło: HEC-HMS 4.1

Zbiorniki retencyjne

Istotny wpływ na ochronę przeciwpowodziową oraz zdolność retencyjną analizowanego obszaru mają istniejące zbiorniki retencyjne. Wyniki z ujętą pracą zbiorników będą jednym z kolejnych etapów badań. Zbiorniki retencyjne w programie modelującym ujmie się w dwojaki sposób. Po pierwsze należy wprowadzić krzywe przepustowości urządzeń przelewowych wyznaczonych na podstawie ich geometrii oraz posługując się ogólnie znaną praktyką inżynierską i zaleceniami, dotyczącymi analizy takich urządzeń.



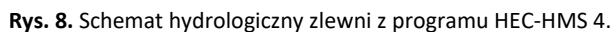
Rys. 7. Plan sytuacyjny: zbiorniki retencyjne

Źródło: http://gdmel.pl/phocadownload/Infrastruktura/wody_Gdanska_1.jpg

Po drugie dzięki dokonanyb badaniom batymetrii dna możliwe będzie wprowadzenie krzywych objętości zbiornika. Obie krzywe będą odnosiły się do rzędnej dna zbiornika dzięki czemu będą w poprawny sposób tworzyły model pracy zbiornika.

Schemat hydrologiczny zlewni

Jak wspomniano wcześniej stworzenie modelu hydrologicznego zlewni wymagało zdefiniowania jej elementów i scharakteryzowania każdego z nich poprzez wprowadzenie odpowiednich danych do programu, dotyczących geometrii itp. Ponadto w programie należało wprowadzić informację o opadzie syntetycznym, który dotyczył wszystkich zlewni w taki sam sposób. Poniżej przedstawiono schemat analizowanej zlewni utworzony w programie HEC-HMS, w którym widoczne są wszystkie ujęte elementy tzn. kanały, fragmenty zlewni, węzły obliczeniowe oraz zbiorniki retencyjne.



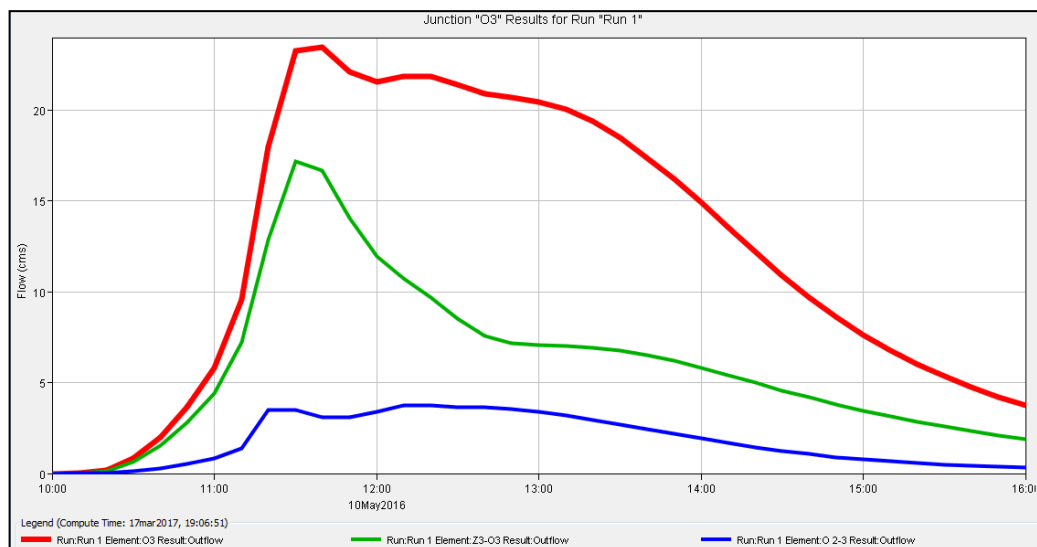
Analiza hydrogramów odpływu z fragmentów zlewni

Poniżej przedstawiono wyniki odpływu z kilku charakterystycznych fragmentów Potoku Oliwskiego. Na rysunku 5.1 został oznaczony przekrój poddany analizie. Jest to punkt zlokalizowany tuż za dopływem Potoku Zajączkowskiego. Dzięki analizie tego przekroju można rozważyć udział zlewni poszczególnych cieków w kształtowaniu się całkowitego odpływu z przekroju.



Rys. 9. Lokalizacja analizowanego przekroju: Dopływ Potoku Zajęczkowskiego

Źródło: http://gdmel.pl/phocadownload/Infrastruktura/wody_Gdanska_1.jpg



Rys. 10. Hydrogram odpływu dla przekroju zamykającego za dopływem Potoku Zajęczkowskiego

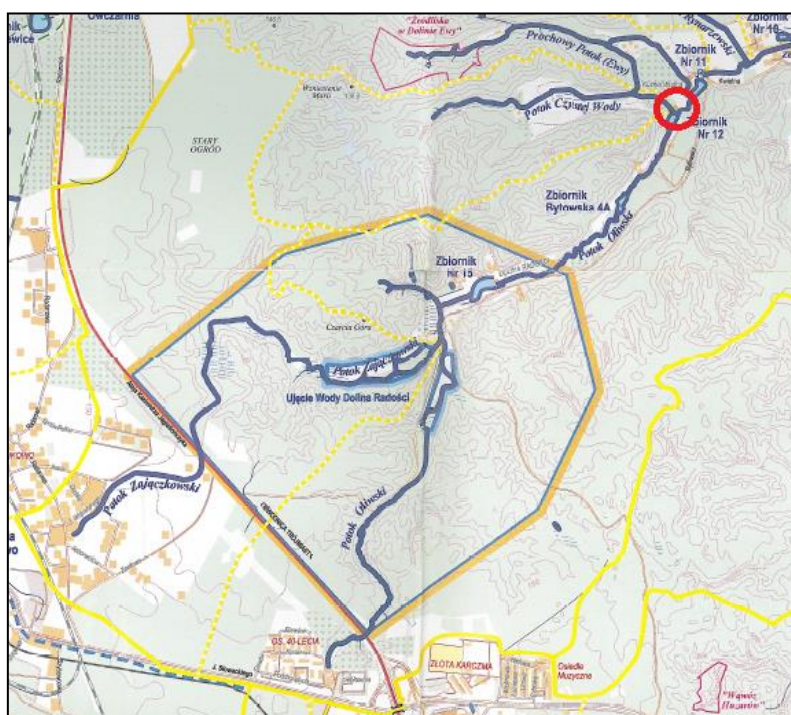
Źródło: Opracowanie własne

Na rysunku 5.2 znajdują się krzywe dopływu z poszczególnych potoków (kolorami zielonym oraz niebieskim) oraz całkowity hydrogram odpływu z przekroju.

Można na ich podstawie wnioskować o udziale poszczególnych fragmentów cieku w całkowitym odpływie. W przypadku tego przekroju można zauważyć, że większą rolę w kształtowaniu odpływu pełni dopływ z Potoku Zajączkowskiego.

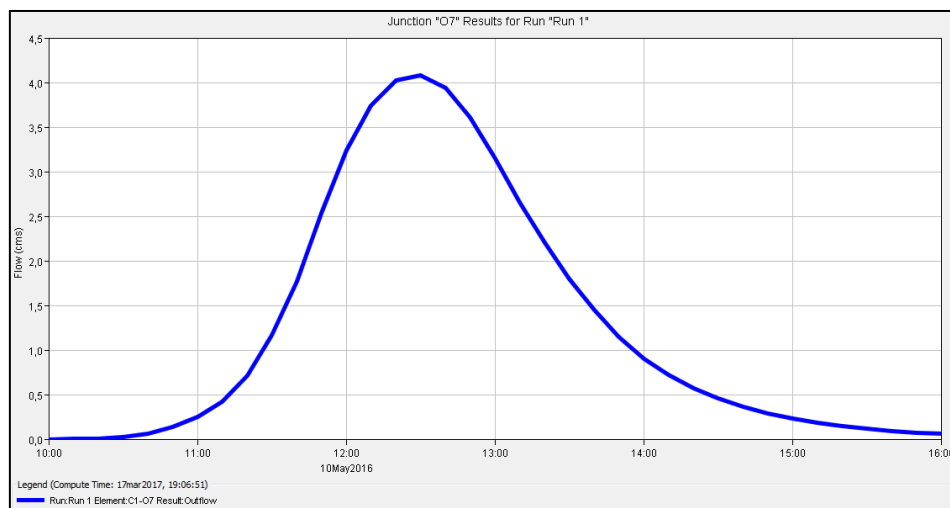
Kolejnym analizowanym przekrojem jest miejsce dopływu do Potoku Oliwskiego Potoku Czystej Wody. Ponieważ w programie modelującym nie wprowadzono jeszcze zbiorników retencyjnych (Rysunek 4.4) nie przedstawiono w artykule hydrogramu odpływu z cieku na którym się znajdują, gdyż wyniki byłyby obciążone zbyt dużym błędem.

Na rysunku 5.4 przedstawiono hydrogram odpływu z przekroju zamykającego, zlokalizowanego tuż przed dopływem Potoku Czystej Wody do Potoku Oliwskiego.



Rys. 11. Lokalizacja analizowanego przekroju: Dopływ Potoku Czystej Wody

Źródło: http://gdmel.pl/phocadownload/Infrastruktura/wody_Gdanska_1.jpg



Rys. 12. Hydrogram odpływu dla przekroju zamykającego przed dopływem Potoku Czystej Wody do Potoku Oliwskiego.

Źródło: Opracowanie własne

Na rysunku 5.4 widać, że Potok Czystej Wody nie ma tak istotnego wpływu na zagrożenie powodziowe jak np. Potok Zajączkowski. Wartości odpływu kształtują się na poziomie $4 \text{ m}^3/\text{s}$, podczas gdy w przypadku Potoku Zajączkowskiego wartości te osiągały prawie $18 \text{ m}^3/\text{s}$. Ponadto można zauważyć, że czas kulminacji fali wezbraniowej dla tego fragmentu wynosi około 2,5 godziny.

Podsumowanie

W artykule dokonano szerokiej analizy większości parametrów charakteryzujących zlewnię. Oczywiście jest, że utworzony model hydrologiczny może być znacznie usprawniony poprzez bardziej szczegółową analizę parametrów go charakteryzujących. Najważniejsze w tego rodzaju badaniach jest weryfikowanie przyjętych parametrów. Należy pamiętać, że każdy model jest tylko przybliżeniem warunków rzeczywistych. Ponadto ważne jest aby zdawać sobie sprawę z niedoskonałości oprogramowania którym wykonuje się obliczenia. Poprawnie przeprowadzonym obliczeniom zawsze towarzyszy subiektywne podejście do otrzymanych wyników i ich ewentualna korekta.

Ważne w tego rodzaju badaniach jest również weryfikowanie w rzeczywistości przyjętych w pewien sposób własności fizycznych. Wizja lokalna jest podstawowym elementem tego rodzaju analiz. Zaproponowany model hydrologiczny z pewnością wymaga uszczegółowienia co będzie następnym etapem prac. Ponadto zo-

staną wykonane obliczenia dla różnych wartości prawdopodobieństwa wystąpienia opadu.

W kolejnych etapach pracy zostanie zaproponowane konkretne miejsca na lokalizację zbiornika retencyjnego suchego. Będzie to wymagało określenia jego wstępnych parametrów takich jak zależności napełnienia od objętości oraz funkcje określające przepustowość urządzeń przelewowych ze zbiornika. Wówczas będzie można, sprawdzić jak ów zbiornik oddziałuje na pozostałe części układu hydrograficznego.

Literatura

- [1] <http://tpkgdansk.pl/charakterystyka-parku/>
- [2] GeoLog - Państwowy Instytut Geologiczny: m.bazagis.pgi.gov.pl/cbdg
- [3] Szymkiewicz R., Gąsiorowski D.: Podstawy Hydrologii Dynamicznej. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2010
- [4] Dz.U. 2001 nr 115 poz. 1229: Ustawa z dnia 18 lipca 2001r. Prawo wodne.
- [5] Lorenc H., Atlas Klimatu Polski, IMGW, Warszawa 2005
- [6] Weinerowska-Bords K.: Wpływ uproszczeń na obliczanie spływu deszczowego w zlewni zurbanizowanej, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2010.
- [7] Szydłowski M, Mikos-Studnicka P.: Wpływ jakości danych hydrologicznych na oszacowanie odpływu ze zlewni miejskiej na przykładzie Potoku Strzyża w Gdańsku. Gdańsk 2010
- [8] Kubrak E, Kubrak J.: Podstawy obliczeń z mechaniki płynów w inżynierii i ochronie środowiska, Wydawnictwo SGGW, Warszawa 2010.
- [9] Weinerowska-Bords K.: Laboratorium z mechaniki płynów i hydrauliki, Politechnika Gdańska, Gdańsk 2004.

mgr inż. Marlena Małgorzata Rowińska¹

Politechnika Białostocka

ul. Wiejska 45E 15-351 Białystok

¹marlenarowinska@wp.eu

WENTYLACJA POŻAROWA

Ventilation fire

Słowa kluczowe: wentylacja, oddymianie, pożar

Keywords: ventilation, smoke extraction, fire

Streszczenie:

W artykule podjęto tematykę stosowanych obecnie systemów wentylacji pożarowej. Systemy wentylacji pożarowej mają na celu zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa ludzi i ograniczenie skutków pożaru przez usuwanie i kontrolę nad rozprzestrzenianiem się dymu. Wymagania dotyczące stosowania wentylacji oddymiającej są uzależnione od klasy odporności pożarowej, wysokości budynku oraz od jego kategorii.

Zasady budowy systemu wentylacji są uzależnione od: występującego zagrożenia pożarowego (charakterystyka występujących materiałów palnych, prawdopodobieństwo powstania i rozprzestrzenienia się pożaru), zagrożenia ludzi (prawdopodobieństwo skutecznej samoczynnej, za pomocą sprzętu specjalistycznego straży pożarnej, oraz przez straż pożarną ewakuacji ludzi przebywających w budynku, warunki przebywania ludzi) i wysokości obiektu.

Zgodnie z wynikami badań przeprowadzonymi w [14] zastosowanie dwóch współpracujących systemów poprawia bezpieczeństwo pożarowe. Ważnym aspektem jest zoptymalizowanie techniczne i inwestycyjne środków zabezpieczenia przeciwpożarowego w budynku adekwatnych do zidentyfikowanych zagrożeń.

Wstęp

Systemy wentylacji pożarowej mają na celu zapewnienie odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa ludzi i ograniczenie skutków pożaru przez usuwanie i kontrolę nad rozprzestrzenianiem się dymu. Wymagania dotyczące stosowania wentylacji oddymiającej są uzależnione od klasy odporności pożarowej, wysokości budynku oraz od jego kategorii (Tabela 1.), szczegółowo określono je w [1, 2, 3]. Techniczne środki zastosowania pożarowego szczególnie ważne są w obiektach wielofunkcyjnych, wielkopowierzchniowych, wysokich i wysokościowych, na kondygnacjach podziemnych.

Tabela 1. Wymagana klasa odporności pożarowej dla budynku zaliczanego do jednej z kategorii

Budynek	ZLI	ZLII	ZLIII	ZLIV	ZLV
Niski -N	B	B	C	D	C
Średniowysoki -SW	B	B	B	C	B
Wysoki - W	B	B	B	B	B
Wysokościowy - WW	A	A	A	B	A

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1]

Tabela 2. Wymagania odnośnie systemów wentylacji pożarowej dla różnych kategorii budynków

Kategoria zagrożenia ludzi	Wysokość budynku	Obligatoryjny system wentylacji pożarowej	Specyfika obiektu
ZLI	Średniowysokie	System zabezpieczenia przed zadymieniem	Przeważnie obiekty wielokubaturowe z otwartymi galeriami wyposażone w systemy oddymiania. Systemy zabezpieczenia przed zadymieniem - stosowane na wydzielonych pionowych drogach ewakuacji.
	Wysokie i wysokościowe	System zapobiegania przed zadymieniem dróg ewakuacyjnych	ZLI przeważnie w oddzielnej wydzielonej strefie z niezależnymi instalacjami wentylacji pożarowej
ZLII	Średniowysokie	System zabezpieczenia przed zadymieniem	Wszystkie obiekty w klasie odporności ogniowej co najmniej „B” – praktycznie brak obiektów wysokościowych (klasa odporności A). Ze względu na specyfikę obiektów ZLII istnieje możliwość wydłużenia czasu ewakuacji, dlatego należy projekto-
	Wysokie i wysokościowe	System zapobiegania przed zadymieniem dróg ewakuacyjnych	

Kategoria zagrożenia ludzi	Wysokość budynku	Obligatoryjny system wentylacji pożarowej	Specyfika obiektu
			wać strefy bezpiecznej ewakuacji w obrębie jednej kondygnacji.
ZLIII	Średniowysokie	System zabezpieczenia przed zadymieniem	Przeważnie najlepiej monitorowana grupa obiektów, w której znajdują się ludzie aktywni zawodowo, zdolni do sprawnej ewakuacji. Statystycznie najmniejsze ryzyko wystąpienia groźnego w skutkach pożaru.
	Wysokie i wysokościowe	System zapobiegania przed zadymieniem dróg ewakuacyjnych	
ZLIV	Średniowysokie	Brak wymagań	Budynki w dużej grupie ryzyka pożaru, w której znajdować się mogą ludzie śpiący i/lub o ograniczonej zdolności poruszania się. Zalecania się stosowanie we wszystkich wielokondygnacyjnych budynkach ZL IV systemów zapobiegania przed zadymieniem pionowych dróg ewakuacji oraz samozamykaczy w drzwiach.
	Wysokie	System zabezpieczenia przed zadymieniem	
	Wysokościowe	System zapobiegania przed zadymieniem dróg ewakuacyjnych	
ZLV	Średniowysokie	System zabezpieczenia przed zadymieniem	Budynki w dużej grupie ryzyka pożaru, w której znajdować się mogą ludzie śpiący. Budynki te często są monitorowane i wyposażone w stałe urządzenia gaśnicze, oraz drzwi do pokoi klasy co najmniej EI 30.
	Wysokie i wysokościowe	System zapobiegania przed zadymieniem dróg ewakuacyjnych	

Źródło: opracowanie własne na podstawie [1, 4, 5]

Celem ochrony przeciwpożarowej jest ochronę życia, zdrowia, mienia oraz środowiska przed pożarem przez wykorzystanie systemów, instalacji, urządzeń oraz rozwiązań budowlanych służących zapobieganiu powstaniu i rozprzestrzenianiu się pożarów [2]. To szeroki zakres, wzajemnie powiązanych przedsięwzięć wpływających na zapewnienie w razie pożaru [1]: nośności konstrukcji przed określony czas, ograniczenia rozprzestrzeniania się ognia i dymu w budynku, ograniczenia rozprzestrzeniania się pożaru na sąsiednie budynki, możliwości ewakuacji ludzi, uwzględniający bezpieczeństwo ekip ratowniczych oraz chroniący mienie. Zgodnie z [6, 7] zaleca się aby w warunkach pożaru spełnione były następujące wymagania:

- utrzymanie warstwy wolnej od dymu o minimalnej wysokości 2 m ponad poziomem na którym mogą przebywać ludzie,
- temperatura w strefie przebywania ludzi nie powinna przekraczać 60°C,
- zasięg widzialności znaków ewakuacyjnych nie powinien być mniejszy niż 10 m,
- natężenie promieniowania cieplnego nie powinno przekraczać 2,5 kW/m²,
- źródło dymu i ciepła powinno być widoczne.

Zasady budowy systemu wentylacji są uzależnione od [8]: występującego zagrożenia pożarowego (charakterystyka występujących materiałów palnych, praw-

dopodobieństwo powstania i rozprzestrzenienia się pożaru), zagrożenia ludzi (prawdopodobieństwo skutecznej samoczynnej, za pomocą sprzętu specjalistycznego straży pożarnej, oraz przez straż pożarną ewakuacji ludzi przebywających w budynku, warunki przebywania ludzi) i wysokości obiektu.

W celu prawidłowego zaprojektowania wentylacji pożarowej w budynkach, szczególnie w przypadku budynków wysokich, należy określić [8, 9]:

- system wentylacji,
- minimalne i robocze ciśnienie na drogach ewakuacji,
- dobór drzwi, klap i żaluzji przeciwpożarowych pod względem odporności ogniowej i szczelności,
- dobór klap przeciwpożarowych pod względem odporności ogniowej, oraz systemu ich uruchamiania,
- dobór żaluzji pożarowych pod względem odporności ogniowej i przekrojów umożliwiających zachowanie wymaganych parametrów przepływu powietrza,
- miejsca lokalizacji otworów nawiewnych i wywiewnych,
- dobór wentylacji pod względem odporności temperaturowej, wydajności, oraz stopnia sprężania,
- dobór odporności ogniowej kanałów wentylacyjnych,
- dobór rozwiązań samoczynnych zamknięć otworów wentylacji bytowej,
- liczbę chronionych kondygnacji,
- dobór centralnego systemu uruchamiania systemów wentylacji pożarowej,
- dobór układów zasilania i sterowania,
- lokalizację urządzeń wykonawczych i dozoruujących systemu.

Wentylację pożarową możemy podzielić ze względu na: cel stosowania oraz rodzaj zastosowanych urządzeń. Z uwagi na cel stosowania możemy wyróżnić:

- wentylację oddymiającą - system ten opiera się na usuwaniu dymu z warstwy dymu zgromadzonej pod stropem i utrzymaniu wolnej od dymu przestrzeni, w której mogą ewakuować się ludzie,
- systemy kontroli dymu i ciepła – system, który opiera się na utrzymaniu dymu w wyznaczonym obszarze pomiędzy źródłem ognia, a miejscem jego usuwania, zapewniając łatwy dostęp do źródła ognia dla ekip ratowniczych;
- oczyszczanie z dymu – system, który opiera się na usuwaniu dymu i mieszaniu dymu z napływającym powietrzem kompensacyjnym, aby zmniejszyć jego temperaturę i toksyczność.

Odrębną kategorię stanowią systemy zabezpieczające drogi ewakuacji: systemy zabezpieczające przed zadymieniem stanowiące system wentylacji pożarowej oraz systemy zapobiegające zadymieniu. Funkcją systemów zapobiegających zadymieniu jest wytworzenie odpowiedniej różnicy ciśnienia pomiędzy przestrzenią objętą pożarem a obszarem przez nie chronionym, uniemożliwiając wpłynięcie dymu do przestrzeni chronionej.

Ze względu na rodzaj wykorzystywanych urządzeń wyróżniamy: wentylację grawitacyjną, wentylację mechaniczną (przewodową), wentylację strumieniową, systemy szachtów nawiewno-wyciągowych, oraz systemy różnicowania ciśnień [10].

Wentylacja oddymiająca

Wentylacja zapewniająca drożność dróg ewakuacyjnych w budynku, poprzez usuwanie gromadzącego się dymu bezpośrednio z obszaru pod stropem. Oddymianie może odbywać się w pomieszczeniu zagrożonym jak i poprzez obszar wspólny w przypadku większej liczby małych pomieszczeń, np. w pasażach handlowych. Wentylacja oddymiająca powinna m.in.[1]:

- zapewnić usuwanie dymu z taką intensywnością aby zapobiec zadymieniu zabezpieczonych pomieszczeń i dróg ewakuacyjnych;
- mieć stały dopływ powietrza zewnętrznego do obszaru oddymianego, uzupełniając braki powietrza w wyniku jego wypływu wraz z dymem – z prędkością przepływu, w pobliżu źródła ognia nie przekraczającą 1 m/s. Wyższa prędkość może powodować zmniejszenie temperatury i naturalnych sił wyporu, które warunkują utrzymanie go pod stropem, w skutek mieszania się powietrza nawiewanego z dymem. W pomieszczeniach których nie ma zagrożenia mieszania się powietrza nawiewanego z dymem prędkość nie powinna przekraczać 5 m/s.

Wentylację oddymiającą może być zrealizowana z wykorzystaniem systemu grawitacyjnego – klap dymowych oraz mechanicznego – wentylatorów wyciągowych i przewodów oddymiających. W przypadku systemów grawitacyjnych, należy określić szacowaną temperaturę usuwanego dymu, który powinien być gorętszy od otaczającego powietrza o co najmniej 100°C tak, aby siła wyporu z łatwością wypychała go przez otwory w stropie czy ścianach. Wykorzystanie systemu grawitacyjnego nie jest możliwe, jeżeli szacowana różnica temperatur jest mniejsza niż 20°C. Wentylacja grawitacyjna jest wrażliwa na oddziaływanie wiatru, który powinno się uwzględnić na etapie projektu instalacji.

Zasadniczy wpływ na działanie systemu wentylacji oddymiającej ma poprawny podział obiektu na strefy dymowe których maksymalny wymiar wynosi 2000 m² dla systemów wentylacji grawitacyjnej oraz 2600 m² dla systemów wentylacji mechanicznej.

Stosowanie systemu wentylacji oddymiającej ograniczone jest wysokością i kubaturą pomieszczenia. Utrzymanie dymu na pożądanej wysokości co najmniej 2,20–2,50 m nie będzie możliwe, np. w pomieszczeniach niższych niż 3,00 m. W bardzo małych pomieszczeniach o powierzchni mniejszej niż 500–600 m², o ile nie są bardzo wysokie (np. powyżej 5–6 m), jest zbyt mało przestrzeni pod stropem aby skutecznie zgromadzić i usunąć dym.

W budynkach jednokondygnacyjnych wentylacja pożarowa powinna: obniżyć temperaturę w obiekcie, poprzez usunięcie gorących gazów pożarowych i dymu na

zewnątrz budynku, podwyższyć przypodłogową warstwę niezadymionego powietrza, oraz w skutek obniżenia temperatury, ochronić urządzenia technologiczne oraz konstrukcję obiektu przed rozległym oddziaływaniem termicznym.

System oddymiający wentylacji mechanicznej w budynkach wysokich powinien:

- utrzymywać pionowe drogi ewakuacyjne w stanie niezadymionym,
- zapewniać wentylację nawiewno – wywiewną poziomych dróg ewakuacyjnych,
- zapewniać wentylację oddzielen przeciwpożarowych usytuowanych przed pionowymi drogami ewakuacyjnymi,
- zapewniać zapobiegawczą wentylację poziomych dróg ewakuacyjnych na kondygnacjach bezpośrednio przyległych do kondygnacji objętych pożarem,
- przeciwdziałać niekontrolowanemu rozprzestrzenianiu się pożaru lub produktów rozkładu termicznego materiałów kanałami wentylacji bytowej.

Wentylacja oddymiająca znajduje zastosowanie m. in. w parkingach podziemnych, pasażach handlowych, jednokondygnacyjnych budynkach wielopowierzchniowych, poziomych drogach ewakuacyjnych, oraz w mniej skutecznej formie jako zabezpieczenie przed zadymieniem pionowych dróg ewakuacji. Na etapie projektowania należy szczególnie zwrócić uwagę na opracowanie prawidłowego scenariusza pożarowego, zastosowanie w projekcie materiałów i urządzeń posiadających wymaganą odporność ogniową, a także uniknięcie kolizji z innymi instalacjami wewnętrznymi [8, 10, 11, 12].

System kontroli dymu i ciepła

Systemy kontroli dymu i ciepła są systemami wentylacji strumieniowej stosowanymi głównie w garażach, dokach dostawczych i przejazdach w garażach zamkniętych – zapewniając łatwy dostęp do źródła ciepła dla ekip ratowniczych. Zasadniczym celem działania systemu jest ograniczenie rozprzestrzeniania się dymu i ciepła do obszaru pomiędzy źródłem pożaru a punktem, w którym jest on usuwany, zapewniając w ten sposób wolną od dymu drogę dostępu do źródła pożaru.

Dym transportowany jest całym przekrojem kondygnacji, co powoduje, że w czasie działania systemu nie jest możliwe prowadzenie bezpiecznej ewakuacji osób w obszarze pomiędzy źródłem pożaru, a punktem wyciągu. Aby zapobiec temu zjawisku działanie systemu kontroli dymu i ciepła dzielimy na dwa etapy: etap ewakuacji, (wentylatory strumieniowe powinny być wyłączone), oraz etap po zakończeniu ewakuacji w którym działają wszystkie urządzenia systemu. W początkowej fazie pożaru, a zatem w czasie w którym trwa ewakuacja, dym rozplywa się pod stropem garażu nie zagrażając jego użytkownikom, przypadku większości garaży o wysokości co najmniej 3,00 m, na skutek działania sił wyporu. Drugim

etapem, który następuje po wyznaczonym dla danej strefy pożarowej wymaganym czasie bezpiecznej ewakuacji powiększonym o wymagany margines bezpieczeństwa, jest uruchomienie wentylatorów strumieniowych powodujących przepływ dymu i jego gwałtowne wymieszanie z otaczającym powietrzem.

Projektowanie systemów kontroli dymu niekiedy wymaga zastosowania nowoczesnych narzędzi wspomagających, takich jak obliczenia numeryczne CFD. Ograniczeniem stosowania systemu jest często geometria pomieszczenia (np. zbliżona do kwadratu), niewielka powierzchnia, wysokość dyskwalifikują system oraz jego wydajność. W Polsce zastosowanie systemu o wydajności większej niż 160 000 m³/h **nie jest w stanie zapewnić kontroli nad dymem** w garażach o szerokości większej niż 24–32 m. Kolejnym utrudnieniem przy stosowaniu tego systemu jest wymagana olbrzymia wydajność szachtów wyciągowych i napowietrzających oraz niewielka prędkość powietrza kompensacyjnego. W przypadku systemów wentylacji strumieniowej, szczególnie w pierwszej fazie ich działania, doprowadzenie powietrza kompensacyjnego powinno odbywać się z maksymalną prędkością jego przepływu w pobliżu źródła ognia nie przekraczającą 1 m/s, a w miejscach w których nie ma zagrożenia mieszania się nawiewanego powietrza z dymem powstałym w pożarze (np. w innej strefie dymowej) nie przekraczającą 5 m/s.

Planując rozmieszczenie wentylatorów strumieniowych, należy zabezpieczyć przed wtłoczeniem dymu do chronionych przestrzeni przedsionka i klatki schodowej, oraz zapewnić swobodne otwarcie drzwi ewakuacyjnych [1, 10].

Oczyszczanie z dymu

Zadaniem tego systemu jest usuwanie dymu i mieszanie dymu z napływającym powietrzem kompensacyjnym w celu zmniejszenia jego temperatury i toksyczności. Systemy te być realizowane poprzez system wentylacji przewodowej, jak i strumieniowej. W systemach oczyszczania z dymu dla systemów przewodowych wymagana jest wydajność około 50 000–60 000 m³/h oraz 160 000–200 000 m³/h dla systemów strumieniowych. W wypadku wentylacji strumieniowej, podobnie jak w systemach kontroli dymu i ciepła za konieczne uznaje się opóźnienie uruchomienia wentylatorów strumieniowych do chwili zakończenia ewakuacji osób.

Celem takiego systemu jest ułatwienie prowadzenia akcji ratowniczo-gaśniczej oraz ochrona konstrukcji obiektu. Podczas pożaru chroniona przestrzeń wypełniana jest dymem, przy czym zarówno jego stężenie jak i temperatura powinny być ograniczone w taki stopniu, aby nie stanowił on bezpośredniego zagrożenia życia osób, które mogą się w nim znaleźć. Ograniczenie temperatury w pośredni sposób wpływa także na spowolnienie rozwoju pożaru. System projektowany jest jedynie w niewielkich strefach pożarowych w garażach budynków mieszkalnych czy produkcyjnych (do 3000 m²), ze względu na utrudnioną ewakuację.

System oczyszczania z dymu jest to najmniej efektywny system wentylacji pożarowej i nie powinien być wykorzystywany jako rozwiązanie zamienne czy dodatkowe podnoszące poziom bezpieczeństwa pożarowego [10, 11].

Zabezpieczenie dróg ewakuacji

Zabezpieczenie dróg ewakuacji poziomych i pionowych, może być realizowane **poprzez zabezpieczenie przed zadymieniem oraz zapobieganie zadymieniu. Zabezpieczenie przed zadymieniem polega na** usuwanie dymu, który wpłynął na drogę ewakuacji w czasie otwarcia drzwi ewakuacyjnych poprzez system wentylacji oddymiającej – mechanicznej, grawitacyjnej lub mieszanej. Rozwiązanie to pozwala na usuwanie dymu bezpośrednio z obszaru korytarza lub klatki schodowej, w której mogą przebywać osoby ewakuujące się. W związku z tym, że system powinien być w stanie usunąć dym, który wpłynie do klatki schodowej w czasie otwarcia drzwi podczas ewakuacji, niezbędne jest wyposażenie wszystkich drzwi pomiędzy pomieszczeniami zagrożonymi a korytarzami i klatkami w samozamykacze. Do poprawnego działania systemu niezbędne jest dostarczenie powietrza kompensacyjnego do obszaru oddymianego. W systemie tym, w zależności od obiektu wykorzystywany może być system grawitacyjny, mechaniczny oraz mieszany, przy czym systemy, w których nawiew realizowany jest w sposób mechaniczny, a wyciąg – w sposób grawitacyjny, wymagają szczególnie dokładnych analiz potwierdzających skuteczność ich działania [10].

Natomiast drugi system polega na wytworzenie nadciśnienia w przestrzeni korytarza lub klatki względem przestrzeni w której wybuchł pożar, co zapobiega wpłynięciu dymu na drogę ewakuacji. System ten działa poprzez nawiew odpowiedniej ilości powietrza do chronionej przestrzeni z jednoczesnym zapewnieniem upustu jego nadmiaru w obszarze objętym pożarem. System różnicowania ciśnienia działa w dwóch różnych stanach: zachowując różnice ciśnień ciśnienia pomiędzy obszarem chronionym a objętym pożarem nie przekraczającą 50 Pa - przy zamkniętych drzwiach. W tym celu ograniczony jest nawiew powietrza. Zastosowanie tego systemu również wymaga wyposażenie drzwi w samozamykacze. W momencie otwarcia drzwi - ciśnienie szybko ulegają wyrównaniu, poprzez zwiększony nawiew, tak aby w drzwiach pomiędzy obszarem chronionym a objętym pożarem wywołać przepływ powietrza o zadanej prędkości. Do regulacji systemu wykorzystywane są urządzenia ułatwiające kontrolę przepływającego powietrza – klapy transferowe, klapy upustowe, regulatory wydajności wentylatorów przez zmianę parametrów prądu (falowniki), itp. Kontrola wymaga zastosowania specjalistycznego zestawu mierników ciśnienia, które należy rozmieścić w odpowiednich lokalizacjach, oraz opracować algorytm sterowania i automatyki, tak aby regulacja systemu w chwili otwarcia lub zamknięcia wybranych drzwi nie trwała dłużej niż 3 sekundy.

Maksymalna dopuszczalna siła wymagana do otwarcia drzwi w czasie działania systemu nie powinna przekraczać **100 N [4, 10, 13]**.

Współdziałanie mechanicznej instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej

Marek Stojak w swojej pracy [14] przeprowadził badania oraz dokonał obliczeń numerycznych oceny efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej z instalacją mgły wodnej w budynkach w aspekcie poprawy warunków ewakuacji, ograniczenia szkód w wyposażeniu budynków wywołanych pożarem oraz optymalizacji kosztów wykonania wymienionych instalacji.

Analiza wyników wykazała, że obliczeniowe strumienie usuwanych dymów i gazów pożarowych wyliczone w celu utrzymania warstwy dymu na określonej wysokości ponad posadzką pomieszczenia są większe od wartości pomierzonych na stanowisku badawczym. Wzrosła również efektywność redukcji temperatury w wyniku współdziałania mechanicznej instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej w chronionych pomieszczeniach z 15 - 30% przy zastosowaniu samej mechanicznej instalacji wentylacji oddymiającej do 30 - 50% przy połączonych systemach. Największą efektywność redukcji temperatur zaobserwowano przy wartościach ilorazu strumienia masy mgły wodnej do strumienia masy powietrza w zakresie od $0,12 \cdot 10^{-3}$ do $0,20 \cdot 10^{-3}$. Zmniejszyła się również wydajności instalacji wentylacji oddymiającej o około 45% przy zachowaniu podobnych warunków temperaturowych w strefie ewakuacji ludzi.

Współdziałanie mechanicznej instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej zapewnia zachowanie warunków bezpiecznej ewakuacji ludzi z budynku.

Wnioski

Spełnienie wymagań w zakresie ochrony przeciwpożarowej w budynkach polega nie tylko na zaprojektowaniu i zainstalowaniu urządzeń przeciwpożarowych, ale również zapewnieniu ich prawidłowego współdziałania. Rodzaj zastosowanego systemu jest uzależniony od wysokości i kategorii budynku. Zagadnienia ochrony pożarowej są szczególnie ważne i istotne w budynkach użyteczności publicznej.

Dużą większą skuteczność oddymiania uzyskuje się przy zastosowaniu mechanicznej wentylacji oddymiającej, w porównaniu z systemami grawitacyjnymi. Zastosowanie nowych rozwiązań technicznych, takich jak np. połączenie dwóch systemów przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa pożarowego, co zostało wykazane w [14].

Ważnym aspektem jest zoptymalizowanie techniczne i inwestycyjne środków zabezpieczenia przeciwpożarowego w budynku adekwatnych do zidentyfikowanych zagrożeń, oraz dobór odpowiedniego systemu wentylacji pożarowej.

Literatura

- [1] Obwieszczenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 17 lipca 2015 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Infrastruktury w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie. Warszawa [Dz. U. 2015 poz. 1422], 2015.
- [2] Ustawa z dnia 24 sierpnia 1991 r. o ochronie przeciwpożarowej. Warszawa [Dz. U. 2016 poz. 191], 1991
- [3] Rozporządzenie Ministra Spraw Wewnętrznych i Administracji z dnia 7 czerwca 2010 r. w sprawie ochrony przeciwpożarowej budynków, innych obiektów budowlanych i terenów. Warszawa: [Dz.U. Nr 109, poz. 719], 2010
- [4] Holewa P., Kubicki G., Sypek G., Wiche J., Zapała R.: Systemy różnicowania ciśnienia w budynkach wielokondygnacyjnych. Przewodnik, SMAY sp. z o. o., Kraków 2013
- [5] Kubicki G.: Systemy wentylacji pożarowej, wersja 5.02, SMAY sp. z o. o., Kraków
- [6] Sztarbała G., Krajewski G.: Zasady projektowania instalacji wentylacji pożarowej w obiektach użyteczności publicznej, Instytut Techniki Budowlanej, Zakład Badań Ogniwych, Zakopane 2009
- [7] Kaiser K.: Wentylacja pożarowa. Projektowanie i instalacja, Medium Dom Wydawniczy, Warszawa 2012
- [8] Mizieliński B.: Systemy oddymiania budynków. Wentylacja, Wydawnictwo Naukowo – Techniczne Warszawa, 1999
- [9] Mizieliński B., Wolanin J.: Kondygnacyjny system oddymiania budynków. Wentylacja, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa, 2006
- [10] http://www.inzynierbudownictwa.pl/dodatek_specjalny,bezpieczenstwo_w_budownictwie,artykul,systemy_wentylacji_pozarowej_w_budynkach,7636 - dostęp 13.02.2017 roku
- [11] <http://okieminzyniera.pl/wentylacja-pozarowa-w-budynkach-wymagania/> - dostęp 13.02.2017 roku
- [12] PN-B-02877-4:2001 Ochrona przeciwpożarowa budynków -- Instalacje grawitacyjne do odprowadzania dymu i ciepła -- Zasady projektowania
- [13] PN-EN 12101-6 Systemy kontroli rozprzestrzeniania dymu i ciepła -- Część 6: Wymagania techniczne dotyczące systemów różnicowania ciśnień -- Zestawy urządzeń
- [14] Stojek M.: Ocena efektywności współdziałania instalacji wentylacji oddymiającej i instalacji mgły wodnej. Rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Poznań 2014

Monika Tokarczuk¹⁾, dr inż. Arkadiusz Dyjakon²⁾

¹⁾ SKN BioEnergia, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu,

Wydział Przyrodniczo-Technologiczny,

ul. C. K. Norwida 25, 50-375 Wrocław, Polska

²⁾ Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Instytut Inżynierii Rolniczej,

Zakład Niskoemisyjnych Źródeł Energii i Gospodarki Odpadami,

ul. Chełmońskiego 37a, 51-630 Wrocław, Polska

¹⁾ monika.tokarczuk@op.pl

²⁾ arkadiusz.dyjakon@up.wroc.pl

INSTALACJA FOTOWOLTAICZNA JAKO SPOSÓB NA ZRÓWNOWAŻONY SYSTEM ENERGETYCZNY W GOSPODARSTWIE DOMOWYM

Photovoltaic installation as a way of sustainable Energy system in the household

Słowa kluczowe: instalacja fotowoltaiczna, zrównoważony rozwój, zrównoważony system energetyczny

Keywords: photovoltaic installation, sustainable development, sustainable energy system

Streszczenie:

W wyniku szybkiego rozwoju technologicznego, wzrostu emisji zanieczyszczeń do atmosfery oraz dywersyfikacji źródeł energii, koniecznością staje się stosowanie zasad zrównoważonego rozwoju. Jednym z elementów tej strategii jest zrównoważony system energetyczny, którego celem jest zaspokajanie potrzeb na energię elektryczną i ciepło w sposób nie tylko przyjazny dla środowiska naturalnego, ale również niekonkurujący z innymi podstawowymi potrzebami, takimi jak

produkcja żywności. Jednym ze sposobów na wdrożenie w małej skali idei zrównoważonego rozwoju opierającej się na wykorzystywaniu potencjału źródeł lokalnych, jest montaż instalacji fotowoltaicznych w gospodarstwach domowych.

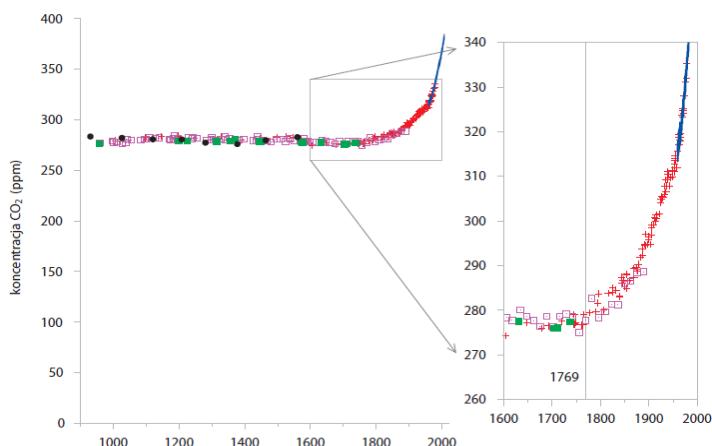
Celem artykułu jest wykazanie realizacji założeń zrównoważonego rozwoju przez wykorzystanie paneli PV pod względem ekologicznym, ekonomicznym oraz społecznym. Przeprowadzono analizę dla domu jednorodzinnego, którego funkcjonalność oparta jest wyłącznie na energii elektrycznej. Określono, że roczne zużycie energii elektrycznej dla rozpatrywanego obiektu wynosi 6120 kWh. Wykazano, że zastosowanie paneli fotowoltaicznych pozwoli uniknąć wyemitowania do atmosfery około 5050 kgCO₂, w porównaniu do energii elektrycznej produkowanej w wyniku spalania węgla kamiennego, zwiększy bezpieczeństwo dostaw energii elektrycznej oraz ogranicza wykorzystanie paliw kopalnych. Zwrócono także uwagę na stale zmniejszające się ceny poszczególnych elementów instalacji PV oraz związany z tym rozwój rynku pracy w sektorze małej energetyki, które są dodatkowymi argumentami w wspieraniu takich inwestycji.

Wstęp

Działalność człowieka związana jest z jego oddziaływaniem na środowisko naturalne. Niestety, wraz z rozwojem cywilizacji i nadmiernym wykorzystywaniem zasobów paliw kopalnych dla celów przemysłowych i gospodarczych, zagrożenie dla zaburzenia prawidłowego funkcjonowania ekosystemu, zwłaszcza w zakresie bilansu CO₂, stało się bardzo realne [1]. Potwierdza to dynamiczny wzrost koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze w ostatnim okresie (rys. 1).

W efekcie, powstała potrzeba działań ukierunkowanych na powstrzymanie zmian klimatu i ochronę środowiska naturalnego, w tym wzrostu średniej temperatury na powierzchni Ziemi czy szybkości topnienia lodowców. Wynikiem tego jest idea zrównoważonego rozwoju przyjęta powszechnie w sferze naukowej, jak i politycznej definiowana jako rozwój gwarantujący zaspokojenie potrzeb obecnych pokoleń, niezagrożający jednocześnie zdolności przyszłych pokoleń do zaspokajania własnych potrzeb [2].

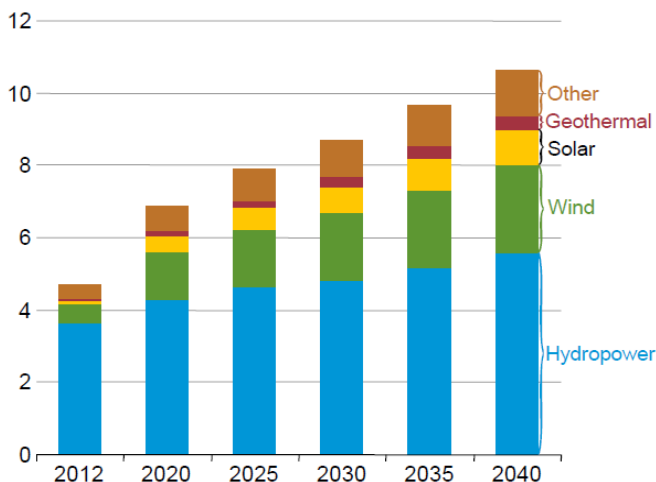
Raport ONZ [3] zawiera wiele hipotez oraz ukierunkowanych działań, które należy podjąć by polepszyć jakość życia i stan środowiska naturalnego. Jedną z koncepcji jest zrównoważony system energetyczny. Chociaż definicja zrównoważonego systemu energetycznego nie jest dokładnie określona [4], to powszechnie uznaje się, że jest to system, który powinien być oparty na kombinacji technologii pozyskiwania energii elektrycznej, ciepła i paliw ze źródeł odnawialnych przyjaznych dla środowiska, redukcji popytu, zwiększenia efektywności wykorzystania energii, a także kogeneracji jej wytwarzania [5].



Rys. 1. Koncentracja dwutlenku węgla w atmosferze w latach 950-2000

Źródło: [1]

Odnawialne źródła energii są coraz powszechniej stosowanym sposobem wytwarzania energii elektrycznej. Szacuje się, że światowy udział energii ze źródeł niekonwencjonalnych wzrośnie do około 30% w 2040 roku (rys. 2), w którym najszybciej rozwijającą się formą pozyskiwania energii elektrycznej będą systemy fotowoltaiczne [6].



Rys. 2. Światowa produkcja energii elektrycznej netto z paliw odnawialnych w latach 1990-2040 (w miliardach MWh)

Źródło: [6]

Podstawowym elementem systemu jest ogniwo fotowoltaiczne, którego zadaniem jest bezpośrednia konwersja energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Zasada działania opiera się na wybijaniu przez fotony elektronów ze struktury półprzewodnika tworząc pary nośników o przeciwnych ładunkach. Istniejące na złączu p-n pole elektryczne sprawia, że ładunki te zostają rozdzielone. W wyniku tego działania powstaje napięcie [7].

Instalacje fotowoltaiczne charakteryzują się relatywnie prostą konstrukcją. Nie posiadają ruchomych części, które potencjalnie mogą być narażone na uszkodzenie oraz mają niskie wymagania konserwacyjne. Ich działanie nie ma negatywnego wpływu na środowisko w postaci emisji dwutlenku węgla czy hałasu. Dodatkowo, systemy fotowoltaiczne posiadają możliwość tworzenia rozbudowanych modułów oraz dostosowania swojej wielkości do potrzeb od kilku watów do megawatów [8].

W porównaniu do innych źródeł odnawialnych służących do wytwarzania energii elektrycznej, panele fotowoltaiczne możliwe są do zastosowania w wielu gospodarstwach domowych, co umożliwia rozwój energetyki rozproszonej oraz prosumenckiej [9].



Rys. 3. Instalacje fotowoltaiczne zainstalowane na dachach gospodarstw domowych

Źródło: [10, 11]

Celem artykułu jest wykazanie realizacji założeń zrównoważonego rozwoju poprzez wykorzystanie paneli fotowoltaicznych z uwzględnieniem aspektów ekologicznych, ekonomicznych oraz społecznych.

Metodyka badawcza

Obliczenia wykonano na podstawie średniego zużycia energii elektrycznej dla gospodarstwa domowego ($E_1 = 2226 \text{ kWh} \cdot \text{rok}^{-1}$), gospodarstwa domowego prowadzącego działalność rolną ($E_2 = 2770 \text{ kWh} \cdot \text{rok}^{-1}$) oraz gospodarstwa domowego,

którego funkcjonalność oparta jest jedynie na energii elektrycznej ($E_3 = 6120 \text{ kWh} \cdot \text{rok}^{-1}$) określonego przez Główny Urząd Statystyczny [12].

Dla poszczególnych przypadków gospodarstw domowych obliczono unikniętą roczną emisję dwutlenku węgla wykorzystując wskaźnik emisyjności CO_2 ($We_{\text{CO}_2} = 825,412 \text{ kg} \cdot \text{MWh}^{-1}$) dla energii elektrycznej z konwencjonalnych źródeł spalania opartych na węglu kamiennym z uwzględnieniem energii elektrycznej dostarczonej do sieci oraz strat przesyłowych [13], zgodnie ze wzorem:

$$m_{\text{CO}_2} = We_{\text{CO}_2} \cdot E_{1,2,3} \cdot 10^{-3} \quad (1)$$

gdzie:

m_{CO_2} – ilość wyemitowanego CO_2 , $\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}$,

We_{CO_2} – wskaźnik emisyjności CO_2 , $\text{kg} \cdot \text{MWh}^{-1}$,

$E_{1,2,3}$ – średnie zużycie energii elektrycznej, $\text{MWh} \cdot \text{rok}^{-1}$.

Wielkość emisji SO_2 , NO_x , CO i pyłu całkowitego uzyskanych w wyniku wytworzenia w źródłach spalania wymaganej ilości energii elektrycznej określono za pomocą wskaźników emisyjności [14]:

$$m_z = We_z \cdot E_{1,2,3} \cdot 10^{-3} \quad (2)$$

gdzie:

m_z – ilość wyemitowanego związku, $\text{kg} \cdot \text{rok}^{-1}$,

We_z – wskaźnik emisyjności dla danego związku (SO_2 , NO_x , CO , pył całkowity), $\text{kg} \cdot \text{MWh}^{-1}$,

$E_{1,2,3}$ – średnie zużycie energii elektrycznej, $\text{MWh} \cdot \text{rok}^{-1}$.

Moc nominalną modułów oraz ich ilość potrzebną do pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną obliczono wykorzystując średnie wartości współczynników Z_1 , Z_2 , Z_3 dla Polski przy założeniu, że dach ukierunkowany jest na południe, a kąt montażu paneli PV wynosi 45° [15] wg zależności:

$$P_{PV} = \frac{E_{1,2,3} \text{ dzień}}{Z_1 \cdot Z_2 \cdot Z_3 \cdot V} \quad (3)$$

gdzie:

P_{PV} – moc nominalna modułów, kW_p ,

$E_{1,2,3} \text{ dzień}$ – dzienne zużycie energii elektrycznej przez wybrane gospodarstwo domowe, $\text{kWh} \cdot \text{dzień}^{-1}$

Z_1 – średnia dzienna ilość godzin słonecznych w warunkach STC, (przyjęto $Z_1 = 2,61$), $\text{h} \cdot \text{dzień}^{-1}$,

Z_2 – współczynnik związany z odchyleniem od płaszczyzny poziomej, (przyjęto $Z_2 = 1,23$), -,

Z_3 – współczynnik związany z temperaturą modułu,

(przyjęto $Z_3 = 0,94$), -,

V – straty elektryczne związane z spadkiem napięcia, wydajnością systemu, przemianą energii elektrycznej w energię chemiczną oraz wahaniami napięcia, (z uwagi na brak magazynowania energii elektrycznej w akumulatorach przyjęto $V = 0,85$), -

$$i_{PV} = \frac{P_{PV}}{P_j} \quad (4)$$

gdzie:

i_{PV} – liczba paneli fotowoltaicznych, szt.,

P_{PV} – moc nominalna instalacji fotowoltaicznej, kW_p,

P_j – moc jednostkowa panelu PV (przyjęto $P_j = 265 \text{ W}_p \cdot \text{szt}^{-1}$), kW_p·szt⁻¹,

Prosty okres zwrotu inwestycji $SPBT$ określono na podstawie średniego kosztu instalacji wraz z montażem oraz zysku w postaci kosztu unikniętego z tytułu braku konieczności zakupu energii elektrycznej od zakładu energetycznego po cenie ustalonej dla odbiorców indywidualnych:

$$SPBT = \frac{i_{PV} \cdot K_{PVj} + P_{PV} \cdot (K_i + K_m + K_{st})}{K_{en} \cdot E_{1,2,3}} \quad (5)$$

gdzie:

$SPBT$ – prosty okres zwrotu inwestycji, lata,

i_{PV} – liczba paneli fotowoltaicznych, szt.,

K_{PVj} – jednostkowy koszt panelu fotowoltaicznego,

(przyjęto $K_{PVj} = 970 \text{ PLN} \cdot \text{szt}^{-1}$), PLN·szt⁻¹,

P_{PV} – moc nominalna instalacji fotowoltaicznej, kW_p,

K_i – koszt inwertera, (przyjęto $K_i = 1000 \text{ PLN} \cdot \text{kW}_p^{-1}$), PLN·kW_p⁻¹,

K_m – koszt montażu, (przyjęto $K_m = 500 \text{ PLN} \cdot \text{kW}_p^{-1}$), PLN·kW_p⁻¹,

K_{st} – koszt stelażu i okablowania, (przyjęto $K_{st} = 600 \text{ PLN} \cdot \text{kW}_p^{-1}$), PLN·kW_p⁻¹,

K_{en} – koszt zakupu 1 kWh, (przyjęto $K_{en} = 0,57 \text{ PLN} \cdot \text{kWh}^{-1}$), PLN·kWh⁻¹,

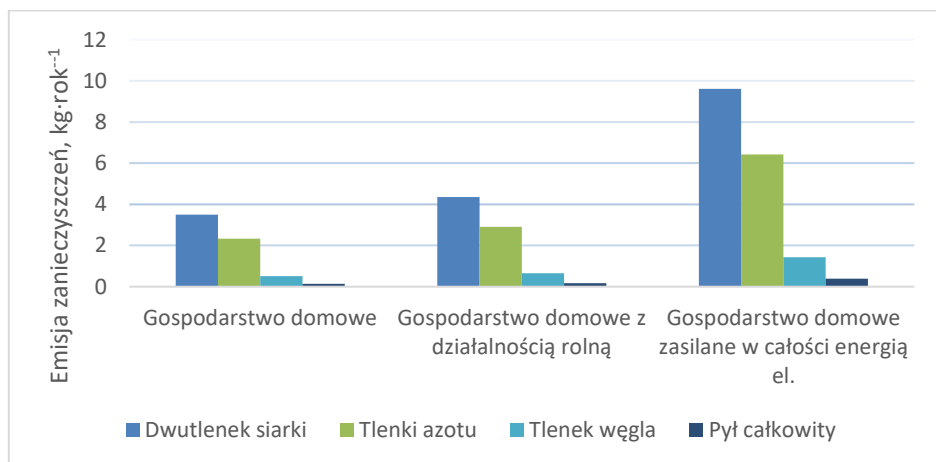
$E_{1,2,3}$ – średnie zużycie energii elektrycznej, kWh·rok⁻¹.

Dyskusja wyników

Zapewnienie odpowiedniej ilości energii elektrycznej pochodzącej z elektrowni i elektrociepłowni opartych na paliwach kopalnych wiąże się z emisją niebezpiecznych związków do atmosfery. Ilość wyprodukowanych zanieczyszczeń jest wprost proporcjonalna do wielkości zużytej energii przez gospodarstwo domowe. Dla pierwszego przypadku roczna emisja dwutlenku węgla wyniosła 1838 kg·rok⁻¹, dla gospodarstwa prowadzącego działalność rolniczą 2286 kg·rok⁻¹, natomiast dla domu wykorzystującego wyłącznie energię elektryczną emisja CO₂ osiąga wartość 5050 kg·rok⁻¹.

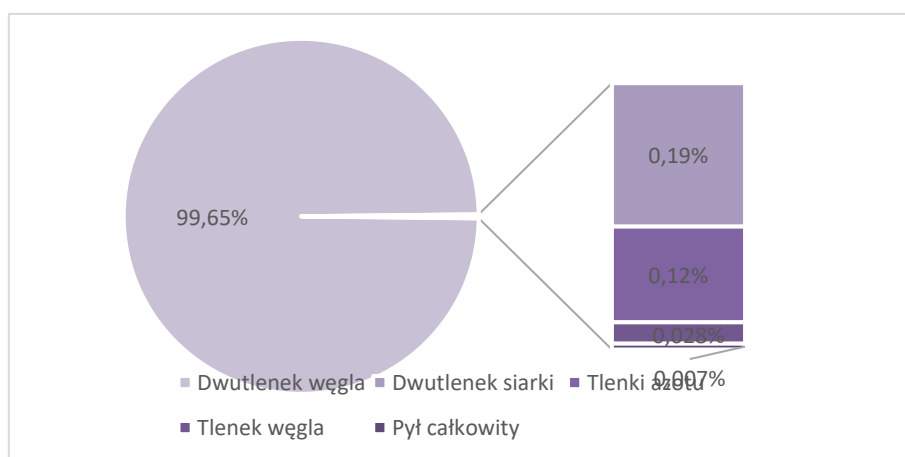
Rysunek 4 przedstawia porównanie ilości emitowanych zanieczyszczeń do atmosfery wytworzonych w elektrowni spalającej paliwa kopalne, pracującej przez

rok dla zapewnienia energii elektrycznej dla różnych przypadków gospodarstw domowych. Z obliczeń wynika, że poza dwutlenkiem węgla największy udział w emisji ma dwutlenek siarki, którego emisja wynosi dla zwykłych gospodarstw $3,50 \text{ kg} \cdot \text{rok}^{-1}$, dla gospodarstw prowadzących działalność rolniczą $4,35 \text{ kg} \cdot \text{rok}^{-1}$ a dla gospodarstw domowych o największym zużyciu energii elektrycznej emisja SO_2 osiąga wartość $9,60 \text{ kg} \cdot \text{rok}^{-1}$. Najmniejsza emisja jest dla pyłu całkowitego wynosząca kolejno $0,14 \text{ kg} \cdot \text{rok}^{-1}$, $0,18 \text{ kg} \cdot \text{rok}^{-1}$ i $0,39 \text{ kg} \cdot \text{rok}^{-1}$.



Rys. 4. Porównanie masy wyemitowanych zanieczyszczeń (bez uwzględnienia dwutlenku węgla) podczas produkcji energii elektrycznej dla różnych przypadków gospodarstw domowych

Źródło: Opracowanie własne



Rys. 5. Udział masowy poszczególnych związków w wyemitowanych zanieczyszczeniach

Źródło: Opracowanie własne

Największy udział masowy (rys. 5) ma dwutlenek węgla, wynosi on 99,65%. Drugi w kolejności jest dwutlenek siarki, którego udział to 0,19%. Duża dysproporcja pomiędzy udziałami związków w emisji spowodowana jest dużą ilością pierwiastka węgla w węglu, który w procesie spalania zostaje utleniony do postaci CO₂.

Oprócz efektu środowiskowego, istotny jest także efekt ekonomiczny. Najszybszy zwrot poniesionych nakładów na instalację fotowoltaiczną stwierdzono dla gospodarstwa domowego, którego zużycie energii elektrycznej jest największe. Ilość paneli umożliwiających pokrycie zapotrzebowania wyniosła 24 sztuki (tabela 1). Wyrównanie się poniesionych nakładów na system fotowoltaiczny z unikniętymi kosztami związanymi z rachunkami za pobór energii elektrycznej z sieci elektroenergetycznej (wyprodukowanej w elektrowni konwencjonalnej) nastąpi po 10 latach. Dla zwykłych gospodarstw domowych oraz gospodarstw rolnych jest to 11 lat. Biorąc pod uwagę, że trwałość paneli fotowoltaicznych jest oceniana na 25-30 lat, inwestycję można uznać za warunkowo zadawalającą w przypadku jej zwrotu w ciągu 10 lat oraz za dyskusyjną w przypadku zwrotu w dłuższym okresie czasu. Należy podkreślić, że na okres zwrotu duży wpływ ma cena energii elektrycznej na rynku oraz zmiany cen poszczególnych komponentów instalacji PV, co może znacząco skrócić/wydłużyć okres zwrotu inwestycji. Obecne trendy rynkowe wskazują jednak na duże prawdopodobieństwo korzystnych zmian, które powinny skutkować wzrostem rentowności systemów fotowoltaicznych.

Tabela 1. Porównanie mocy nominalnej, ilości paneli oraz czasu zwrotu inwestycji dla różnych rodzajów gospodarstw

Rodzaj	Moc nominalna instalacji PV, kW _p	Ilość paneli fotowoltaicznych, szt	Czas zwrotu inwestycji SPBT, lata
Gospodarstwo domowe	2,32	9	11
Gospodarstwo domowe z dział. rolną	2,89	11	11
Gospodarstwo domowe zasilane w całości energią elektryczną	6,40	24	10

Źródło: Opracowanie własne

Idea zrównoważonego rozwoju a instalacja fotowoltaiczna

Jednym z czterech głównych założeń zrównoważonego systemu energetycznego jest zwiększenie produkcji energii w celu zaspokojenia ludzkich potrzeb. W wyniku postępu technologicznego nastąpił wyraźny wzrost wykorzystania energii elektrycznej. Pojedyncze gospodarstwo domowe w Polsce zużywa średnio o 9% więcej energii elektrycznej w porównaniu z rokiem 2000 [16]. Pośrednim rozwiązaniem tego problemu są panele fotowoltaiczne. Zastosowanie instalacji fotowolta-

icznej umożliwia zaspokojenie bieżących potrzeb gospodarstwa domowego. Nieprzerwany dostęp do energii elektrycznej, niezbędny do funkcjonowania domu, jest możliwy poprzez magazynowanie wytworzonego potencjału w akumulatorach (tzw. system off-grid). Zaletą takiego rozwiązania jest niezależność od publicznej sieci energetycznej, co zwiększa bezpieczeństwo energetyczne domu [17]. Równie popularnym rozwiązaniem jest przyłączenie instalacji fotowoltaicznej do sieci elektroenergetycznej, zwanym systemem on-grid. Generacja rozproszona, w której źródłami wytwórczymi są małe jednostki, jest szansą na zwiększenie lokalnego bezpieczeństwa energetycznego. Duże ograniczenia występujące w rozwoju sieci elektroenergetycznej oraz starzejące się systemowe źródła wytwórcze powodują, że rola odnawialnej energetyki rozproszonej będzie stale rosła [18]. Jej rozbudowanie przyczyni się do zwiększenia produkcji energii elektrycznej oraz zmniejszenia jej strat w wyniku dalekiego przesyłu.

Minimalizowanie strat surowców pierwotnych jest koncepcją, która ma zapewnić wydłużenie ich użyteczności. Wykorzystywanie paliw kopalnych jest obecnie jeszcze nieuniknione. Aktualne wykazane zasoby przemysłowe węgla kamiennego w Polsce zapewniają wydobycie na około 45 lat. Duże rezerwy, których użyteczność określa się na ponad 200 lat, są w złożach niezagospodarowanych. Część z nich nie spełnia współczesnych wymagań, albo koszt ich wydobycia jest zbyt wysoki [19]. Zmniejszenie zużycia surowców kopalnych oraz ich strat jest możliwe poprzez zastosowanie alternatywnych źródeł energii. Panele fotowoltaiczne umożliwiają produkcję czystej energii przy wykorzystaniu lokalnych potencjałów, ograniczając w ten sposób zużycie paliw kopalnych.

Ważnym aspektem w idei zrównoważonego systemu energetycznego jest zmniejszenie zagrożenia dla zdrowia i życia ludzi w wyniku produkcji energii. Przez spalanie paliw kopalnych następuje emisja drobnych pyłów, dwutlenku węgla, dwutlenku siarki oraz tlenu azotu do atmosfery. Długotrwała ekspozycja organizmu człowieka na działanie SO_2 powoduje zaburzenia układu krążenia oraz choroby układu oddechowego. Równie negatywny skutek posiadają drobne pyły. Zauważono związek między wzrostem umieralności a zwiększeniem stężenia pyłów w atmosferze [20]. W Polsce blisko 90% produkowanej energii elektrycznej powstaje w wyniku spalania węgla. Uniknięcie zanieczyszczeń, które są zagrożeniem dla zdrowia ludzi jest więc istotne [21]. Wykorzystanie potencjału instalacji fotowoltaicznych w gospodarstwach domowych umożliwi zmniejszenie emisji niebezpiecznych substancji do otoczenia.

Brak procesów spalania przy zastosowaniu paneli fotowoltaicznych wpływa pozytywnie na biosferę oraz zapobiega lokalnym formom zanieczyszczenia. Głównym założeniem zrównoważonego rozwoju jest zapobieganie negatywnym zmianom w środowisku naturalnym. Energetyka konwencjonalna wytwarza coraz więcej dwutlenku węgla przy zmniejszającej się możliwości jego asymilacji przez wylesianie terenów [22]. Oddziaływanie CO_2 na środowisko jest procesem złożonym.

Określa się, że dwutlenek węgla jest drugim, po parze wodnej, czynnikiem powodującym powstanie efektu cieplarnianego. Zanieczyszczenie powietrza jest również powodem degradacji gleb. Wywołuje ich nadmierne zakwaszenie oraz akumulację substancji fitotoksycznych [23].

Wykorzystanie energii słonecznej wyklucza emisję gazów cieplarnianych a także produkcję odpadów podczas ich eksploatacji. Podczas spalania paliw kopalnych powstają odpady paleniskowe w postaci popiołów i żużli, odpady z instalacji odsiarczania spalin oraz popioły lotne zatrzymywane na urządzeniach odpylających [24]. W przypadku zużytych paneli fotowoltaicznych są one poddawane w dużym stopniu recyklingowi (tabela 2). Proces ten umożliwia odzyskanie surowców pierwotnych oraz pozwala na częściowe pokrycie wzrastającego zapotrzebowania na krzem przy jednoczesnym oszczędzaniu surowca pierwotnego [25].

Tabela 2. Odzysk materiałów podczas recyklingu krzemowych paneli PV

Material	Ilość, $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Udział masowy, %	Stopień odzysku, %
Szkło	10,0	74,16	90
Aluminium	1,39	10,3	100
Ogniwo słoneczne	0,47	3,48	90
Folia ochronna	1,37	10,15	-
Przewody	0,10	0,75	95
Substancje spajające	0,16	1,16	-

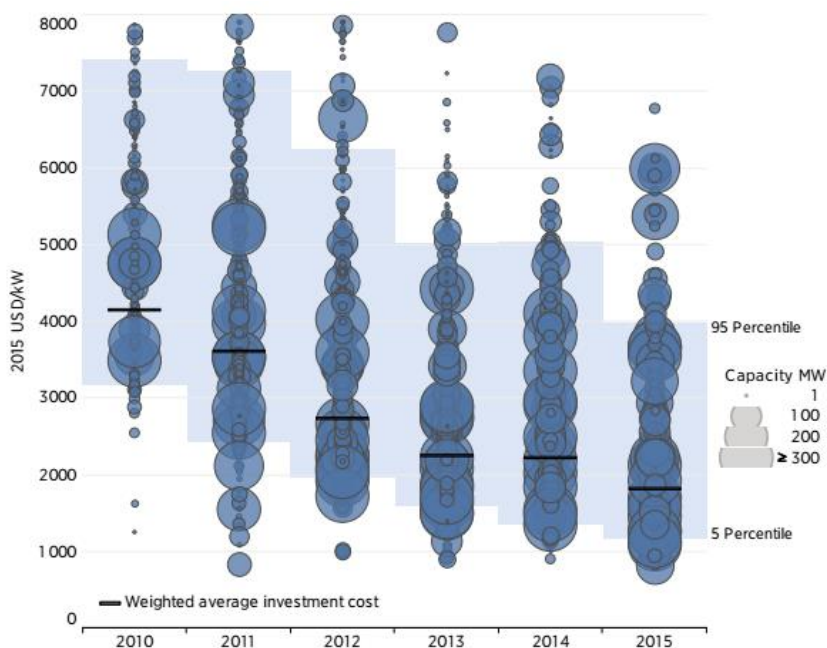
Źródło: [26]

Efektom prowadzenia eksploatacji górniczej jest degradacja terenów, na jakich się znajduje. Najczęściej jest to zmiana ukształtowania powierzchni oraz wpływ na warunki przepływu wód podziemnych. Uciążliwość spowodowana tymi skutkami to trudności zagospodarowania terenu. Krzywizna powierzchni oraz zmiana składu chemicznego gleby utrudniają ponowne wykorzystanie do celów rolniczych [27]. Umieszczenie paneli fotowoltaicznych na niewykorzystanych przestrzeniach, jakimi są dachy, nie konkuruje z terenami przeznaczonymi pod uprawę żywności.

Panele fotowoltaiczne instalowane w gospodarstwach domowych są szansą dla zmniejszenia ubóstwa energetycznego. Stan ten określany jest jako brak dostępu do energii rozumianej jako prąd, ciepło i gaz głównie z powodów finansowych [28]. Od roku 2009 zaobserwowano 80% spadek cen modułów fotowoltaicznych. Spowodowane było to polepszeniem się technologii wytwarzania ogniw PV oraz nadwyżką ich produkcji. W roku 2015 średnie ważone ceny modułów oscylowały między $0,52 \text{ USD} \cdot \text{W}_p^{-1}$ a $0,72 \text{ USD} \cdot \text{W}_p^{-1}$. Obniżenie ceny sprzedaży paneli fotowoltaicznych znacząco wpłynęło na całkowity koszt instalacji (rys. 6). W latach 2010-2015 spadek ten wyniósł ponad 50% [29].

Pod względem ekonomicznym instalacje fotowoltaiczne stały się dostępne dla większej grupy społecznej. Korzyści z ich zastosowania to uniezależnienie od wahaających się cen paliw kopalnych oraz zysk wynikający z oddawania energii elektrycznej do sieci.

Powstające nowe miejsca pracy są szansą na zmniejszenie bezrobocia. Oprócz producentów paneli fotowoltaicznych, inne branże również zwiększą zatrudnienie by realizować inwestycje PV - developerzy, firmy budowlane, dostawcy konstrukcji mocujących, firmy zajmujące się przyłączeniem do sieci i firmy ochroniarskie. Według przewidywań do roku 2019 ma powstać 12000 nowych miejsc pracy w Polsce związanych z energetyką słoneczną [30].



Rys. 6. Całkowity koszt zainstalowanych systemów PV oraz średnia ważona w latach 2010-2015

Źródło: [29]

Podsumowanie

Inwestowanie w instalacje fotowoltaiczne w gospodarstwach domowych jest szansą na realizację założeń zrównoważonego rozwoju. Wykorzystanie energii słonecznej daje możliwość ograniczenia emisji zanieczyszczeń oraz zmniejsza pro-

dukcję odpadów niebezpiecznych. Brak wykorzystania paliw kopalnych umożliwia zmniejszenie ingerencji człowieka w środowisko naturalne.

Wykorzystanie paneli fotowoltaicznych umożliwia ograniczenie całkowitej emisji substancji niebezpiecznych, przypadających na jedno gospodarstwo domowe do $5070 \text{ kg} \cdot \text{rok}^{-1}$. Rozpowszechnianie tego rozwiązania daje realną możliwość ograniczenia negatywnych skutków wywołanych przez gazy cieplarniane.

Opłacalność inwestycji zależna jest od zapotrzebowania na energię elektryczną. Gospodarstwo, dla którego zużycie energii jest największe najszybciej uzyska zwrot kosztów związanych z instalacją fotowoltaiczną. Po okresie wyrównania się wydatków z opłatami za energię elektryczną z sieci elektroenergetycznej, panele fotowoltaiczne umożliwiają zysk powyżej 3000 PLN rocznie.

Dynamiczny rozwój tego sektora OZE stwarza wiele nowych możliwości. Tworzenie nowych miejsc pracy, uniezależnienie od importu paliw kopalnych oraz wykorzystywanie lokalnych zasobów są szansą nie tylko dla społeczności lokalnej, ale także dla całej gospodarki.

Literatura

- [1] MacKay D., *Zrównoważona Energia – bez pary w gwizdek*, UIT Cambridge, Anglia 2009, str. 14-15.
- [2] Pawłowski P., *Teoretyczne uwarunkowania rozwoju zrównoważonego*, Rocznik ochrony środowiska 2009, Tom 11, str. 985-994.
- [3] ONZ, *Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future*, [online], dostęp zdalny: <http://www.un-documents.net/our-common-future.pdf> (Data wejścia: 10.02.2017)
- [4] Prandecki K.: *Teoretyczne podstawy zrównoważonej energetyki*, Wydawnictwo Uniwersytetu Ekonomicznego w Katowicach, Katowice 2014
- [5] Mitchell C.: *The Political Economy of Sustainable Energy*, CPI Antony Rowe, Chippenham and Eastbourne, Great Britain 2010.
- [6] U.S. Energy Information Administration Office of Energy Analysis (EIA): *International Energy Outlook 2016 With Projections to 2040*, U.S. Department of Energy Washington, U.S. 2016 .
- [7] Romański L., *Odnawialne źródła energii*, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu: Oficyna Wydawnicza ATUT - Wrocławskie Wydawnictwo Oświatowe, Wrocław 2013.
- [8] Tester J., Drake E. et al., *Sustainable Energy: Choosing Among Options*, The MIT Press, US 2012, str. 686-688.
- [9] Kryszk H, Kurowska K., *Fotowoltaika jako źródło energii odnawialnej i nowy obszar aktywności na obszarach wiejskich*, Wydawnictwo „Bernardinum”, Warszawa 2014.
- [10] OpenEnergyMonitor, [online], dostęp zdalny: <https://openenergymonitor.org/emon/applications/solarpv>, [Data wejścia: 12.02.2017].
- [11] Home Solar PV, *Is home solar right for you?*, [online], dostęp zdalny: http://homesolarpv.com/http://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/trl_demystified.html. [Data wejścia: 13.02.2017].
- [12] GUS, Departament Produkcji, *Zużycie energii w gospodarstwach domowych w 2012 roku*, Warszawa 2014
- [13] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, *Wskaźnik emisyjności CO₂ dla energii elektrycznej u odbiorców końcowych*, [online], dostęp zdalny: http://www.kobize.pl/uploads/materiały/materiały_do_pobrania/wskazniki_emisyjnosci/160616_WSKAZNIKI_CO2, [Data wejścia: 10.02.2017].
- [14] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami, *Wskaźniki emisyjności SO₂, NO_x, CO i pyłu całkowitego dla energii elektrycznej*, [online], dostęp zdalny: http://www.kobize.pl/uploads/materiały/materiały_do_pobrania/wskazniki_emisyjnosci/160616_WSKAZNIKI_zanieczyszczenia.pdf [Data wejścia: 10.02.2017]

- [15] Klugmann-Radziemska E., *Fotowoltaika w teorii i praktyce*, Wydawnictwo btc, Legionowo 2010, str. 147-148
- [16] Maj R., *Efektywność energetyczna w gospodarstwie domowym jest niedoceniana czy przeceniana? Analiza na przykładzie zużycia energii elektrycznej*, Pracodawcy Rzeczypospolitej Polskiej, Warszawa 2015.
- [17] Mientus, K., *Energia słońca – aspekty ekologiczne i ekonomiczne*, Politechnika Opolska, Opole 2011.
- [18] Dołęga W.: *Odnawialna generacja rozproszona, a lokalne bezpieczeństwo energetyczne*, Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering 7 (473) 2010, str. 36-39.
- [19] Nieć M., Salamon E., *Zmiany zasobów złóż paliw kopalnych (kopalin energetycznych) w Polsce w ostatnim półwieczu*, Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk PAN nr 96, Kraków 2016, str. 201–228
- [20] WHO, *Air Quality Guidelines for Europe, second edition*, WHO Regional Publications, European Series No. 91. 2000, [online], dostęp zdalny: http://www.euro.who.int/data/assets/pdf_file/0005/74732/E71922.pdf, [Data wejścia: 12.02.2017].
- [21] Bednorz J., *Spoleczno-ekologiczne skutki eksploatacji węgla kamiennego w Polsce*, Górnictwo i Geologia: Tom 6 Zeszyt 4, Ruda Śląska 2011
- [22] Gumuła S., Piaskowska M., *Emisja dwutlenku węgla a zagrożenie efektem cieplarnianym*, Polityka energetyczna: Tom 12 Zeszyt 2/2, 2009
- [23] Michalak J., *Wybrane aspekty oddziaływania elektrowni na środowisko*, Przegląd elektroniczny: R.90 NR10, 2014
- [24] Czachor K, Chudy P., *Poradnik metodyczny w zakresie PRTR dla instalacji spalania paliw*, [online], dostęp zdalny: http://www.gios.gov.pl/images/dokumenty/prtr/Poradnik_metodyczny_w_zakresie_PRTR_dla_Instalacji_spalania_paliw.pdf [Data wejścia: 13.02.2017]
- [25] Klugmann-Radziemska E., Ostrowski P., Lewandowski W, Ryms M.: *Aspekty ekologiczne i ekonomiczne recyklingu krzemowych ogniw i modułów fotowoltaicznych*, NAFTA-GAZ: czerwiec 2010, Gdańsk 2010
- [26] Appleyard D., *Light cycle: Recycling PV materials*, Renewable Energy magazine, [online], dostęp zdalny: <http://www.renewableenergyworld.com/articles/2009/04/light-cycle-recycling.html> [Data wejścia: 13.02.2017]
- [27] Santorius P. , Białecka B., Grabowski J., *Środowiskowe i gospodarcze problemy spowodowane degradacją terenów w górnośląskim zagłębiu węglowym*, Prace naukowe GIG górnictwo i środowisko/Główny Instytut Górnictwa, Kwartalnik 1/2007
- [28] Stępnia A., Tomaszewska A., *UBÓSTWO ENERGETYCZNE A EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA*, [online], dostęp zdalny: <http://www.ine->

isd.org.pl/theme/UploadFiles/File/publikacje/broszury/ubostwo_energetyczne.pdf [Data wejścia: 14.02.2017]

- [29] The International Renewable Energy Agency (IRENA): THE POWER TO CHANGE: SOLAR AND WIND COST REDUCTION POTENTIAL TO 2025, [online], dostęp zdalny: http://www.irena.org/DocumentDownloads/Publications/IRENA_Power_to_Change_2016.pdf, [Data wejścia: 14.02.2017]
- [30] PSES, Raport: Perspektywy wpływu fotowoltaiki na gospodarkę Polski w latach 2016-2020, [online], dostęp zdalny: <http://www.pses.eu/raporty/raport14.pdf> [Data wejścia: 14.02.2017]