

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA



POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW
I TECHNIKÓW SANITARNYCH



MONOGRAFIE

„INŻYNIERIA ŚRODOWISKA – MŁODYM OKIEM”

TOM 26

EKOENERGETYKA

**pod redakcją
Iwony Skoczko
Janiny Piekutin
Magdaleny Drobiszewskiej
Roberta Mokryckiego**



Białystok 2016

POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA
WYDZIAŁ BUDOWNICTWA
I INŻYNIERII ŚRODOWISKA



POLSKIE ZRZESZENIE INŻYNIERÓW
I TECHNIKÓW SANITARNYCH



MONOGRAFIE

TOM 26

EKOENERGETYKA

MONOGRAFIE

TOM 26

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

*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

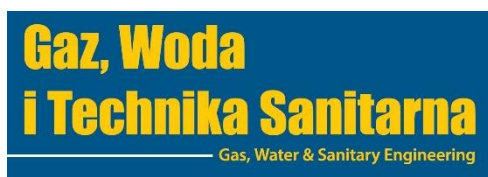
www.wfosigw.bialystok.pl

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

Patronaty medialne:



POLSKI
instalator



INŻYNIERIA ŚRODOWISKA – MŁODYM OKIEM

TOM 26

EKOENERGETYKA

**pod redakcją
Iwony Skoczko
Janiny Piekutin
Magdaleny Drobiszewskiej
Roberta Mokryckiego**

Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej
Białystok 2016

Redaktor tomu:

Iwona Skoczko
Janina Piekutin
Magdalena Drobiszewska
Robert Mokrycki

Zespół redakcyjny:

Iwona Skoczko – Redaktor Naczelny
Janina Piekutin – Redaktor Naczelny
Magdalena Drobiszewska – skład monografii
Robert Mokrycki – skład monografii

Redakcja językowa: Autorzy**Recenzenci monografii:**

prof. dr hab. inż. Rafał Miłaszewski
dr inż. Katarzyna Gładyszewska-Fiedoruk

Zespół naukowy:

dr hab. inż. Iwona Skoczko – Politechnika Białostocka
prof. dr hab. inż. Józefa Wiater – Politechnika Białostocka
prof. dr hab. inż. Rafał Miłaszewski – Politechnika Białostocka
prof. Aleksey Ternovtsev – Kijowski Narodowy Uniwersytet Budownictwa i Architektury
prof. Dmitry Spitsov – Moskiewski Państwowy Uniwersytet Budownictwa
prof. Javier Bayo – Uniwersytet Techniczny Cartagena
dr hab. inż. Mariusz Dudziak – Politechnika Śląska
dr hab. Aneta Dorota Petelska – Uniwersytet w Białymstoku
dr hab. Izabella Jastrzębska – Uniwersytet w Białymstoku
dr hab. Zenon Łotowski – Uniwersytet w Białymstoku
dr hab. inż. Jacek Piekarski, prof. PK – Politechnika Koszalińska
dr hab. inż. Urszula Filipkowska, prof. UWM – Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie
dr hab. inż. Katarzyna Ignatowicz – Politechnika Białostocka
dr hab. inż. Sławomir Obidziński – Politechnika Białostocka
dr n. tech. Janina Piekutin – Politechnika Białostocka
dr n. tech. Joanna Szczukowska – Politechnika Białostocka
dr inż. Katarzyna Gładyszewska-Fiedoruk – Politechnika Białostocka
dr inż. Anna Siemieniuk – Politechnika Białostocka
dr inż. Elżbieta Grygorczuk-Petersons – Politechnika Białostocka
dr inż. Dariusz Andraka – Politechnika Białostocka
dr inż. Jacek Leszczyński – Politechnika Białostocka

Wszystkie zamieszczone w monografii prace są recenzowane

Copyright by Politechnika Białostocka, Białystok 2016

ISBN 978-83-62582-93-8

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

Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej

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
www.pzits.bialystok.pl

SPIS TREŚCI

Systemy nowoczesnego pozyskiwania energii w budynkach jednorodzinnych – gruntowe powietrzne wymienniki ciepła, kolektory słoneczne, pompy ciepła, biomasa	9
mgr inż. Justyna Topolańska	
Słoneczne systemy klimatyzacyjne	36
mgr inż. Paulina Radzajewska	
Modernizacja infrastruktury budynków a ich właściwości środowiskowe i energetyczne	57
mgr inż. Ewa Piotrowska, dr hab. inż. Maciej Zajkowski prof. nzw. PB	
Biomasa jednorocznych roślin energetycznych jako element dywersyfikacji źródeł energii w Polsce	83
inż. Jakub Frankowski, dr hab. Henryk Burczyk, prof. IWNiRZ	
Koncepcja wykorzystania technologii biogazowej w celu uzyskania samowystarczalności energetycznej gospodarstwa rolnego	110
mgr inż. Maciej Cholewiński, mgr inż. Michał Kamiński	
Określenie potencjału energetycznego biomasy słonecznika bulwiastego i rdestowca sachalińskiego pochodzącej z nieużytków	155
inż. Sylwia Bartnikowska, dr inż. Damian Janczak, inż. Jakub Frankowski	
Zastosowanie fotowoltaiki – zasady doboru oraz wymiarowania	176
inż. Paulina Widz, inż. Szczepan Jakubaszek, inż. Adam Widz, inż. Remigiusz Soćko, dr. inż. Magdalena Kachel-Jakubowska	

Projektowanie instalacji kolektorów słonecznych i ich opłacalność	194
inż. Paulina Widz, inż. Adam Widz, inż. Remigiusz Soćko, inż. Szczepan Jakubaszek, dr inż. Magdalena Kachel-Jakubowska	
Wykorzystanie zintegrowanych systemów OZE	220
inż. Paulina Widz, inż. Szczepan Jakubaszek, inż. Adam Widz, inż. Remigiusz Soćko, dr. inż. Magdalena Kachel-Jakubowska, mgr inż. Lidia Duda	

mgr inż. Justyna Topolańska¹⁾

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Katedra Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji

ul. Wiejska 45A

¹⁾j.topolanska@student.pb.edu.pl

Systemy nowoczesnego pozyskiwania energii w budynkach jednorodzinnych – gruntowe powietrzne wymienniki ciepła, kolektory słoneczne, pompy ciepła, biomasa

Modern energy generation systems in detached houses - ground air heat exchangers, solar collectors, heat pumps, biomass

Słowa kluczowe: *odnawialne źródła energii, energia gruntu, energia słoneczna, zielona energia*

Keywords: *renewable energy sources, ground energy, solar energy, green energy*

Streszczenie: W artykule przedstawiono cztery najpopularniejsze systemy pozyskiwania, przetwarzania i wykorzystania energii odnawialnej w budynkach jednorodzinnych. Dość szeroko stosowanym w różnych obiektach systemem są gruntowe powietrzne wymienniki ciepła. Wspomagają one pracę wentylacji mechanicznej poprzez wstępną obróbkę powietrza wentylacyjnego. Zimą, dzięki kontaktowi z gruntem, powietrze jest ogrzewane. Z kolei latem, powietrze oddaje ciepło do gruntu. Gruntowe wymienniki ciepła występują w pięciu rodzajach: żwirowy, rurowy, płytowy, glikolowy, grzebieniowy. Najpowszechniejszym źródłem energii odnawialnej, jest energia słoneczna pozyskiwana i przetwarzana w kolektorach słonecznych. Kolektory występują w dwóch typach: płaskie i próżniowe. Zapewniają one podgrzew ciepłej wody użytkowej. W niektórych układach technologicznych mogą też wspomagać pracę instalacji centralnego ogrzewania. Coraz częściej spotyka się również zastosowanie przy domkach jednorodzinnych pomp ciepła. Głównie są to pompy typu woda-solanka, z dolnym źródłem ciepła w gruncie (jako odwierty pionowe lub kolektory poziome). Pompa ciepła może wtedy pracować zarówno na cele centralnego ogrzewania, jak i podgrzewu ciepłej wody. Wielu właścicieli domków

decyduje się na montaż kotłów do spalania biomasy – zrębków, brykietów, pelletów, trocin itp.. Dzięki podajnikom ślimakowym możliwe jest bardziej precyzyjne dawkowanie paliwa. Powoduje to równiejszą pracę instalacji c.o. i umożliwia efektywne sterowanie nią poprzez automatykę pomieszczeniową.

1. Wstęp

Konieczność stosowania odnawialnych źródeł energii wynika z wprowadzonego w dn. 10.01.2007 roku przez Komisję Europejską tzw. pakietu klimatyczno – energetycznego. Zawarto w nim następujące cele dla UE do zrealizowania do 2020 roku [1]:

- zmniejszenie emisji gazów cieplarnianych o 20% w stosunku do 1990 roku,
- zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii o 20% w zużyciu energii końcowej, w tym 10 % udziału biopaliw w zużyciu paliwa napędowego,
- zwiększenie efektywności wykorzystania energii o 20% w stosunku do prognozowanego zużycia paliw i energii.

Realizacja tego celu w Polsce bazuje m.in. na ustawie [2]. Krajowy cel w zakresie oszczędnego gospodarowania energią określono w niej na co najmniej 9% zmniejszenia średniego krajowego zużycia energii finalnej (energia lub paliwo zużyte przez odbiorcę końcowego).

Ponadto Warunki Techniczne [3] również wprowadzają ograniczenia w zużyciu energii przeznaczonej na ogrzewanie i wentylację budynków, klimatyzowanie i na oświetlenie. Oprócz coraz bardziej restrykcyjnych wymagań dla współczynnika przenikania ciepła przegród budowlanych, wprowadzono również stopniową gradację maksymalnej wartości wskaźnika EP. Określa on ilość energii pierwotnej odniesioną do 1 m² powierzchni i okresu jednego roku. Tradycyjne systemy

ogrzewania i wentylacja mechaniczna nie są w stanie sprostać wymogom stawianym w rozporządzeniu. Zastosowanie energii odnawialnej znacznie poprawia wskaźnik EP danego obiektu, a niejednokrotnie umożliwia zmieszczenie się w progach określonych przez prawodawcę.

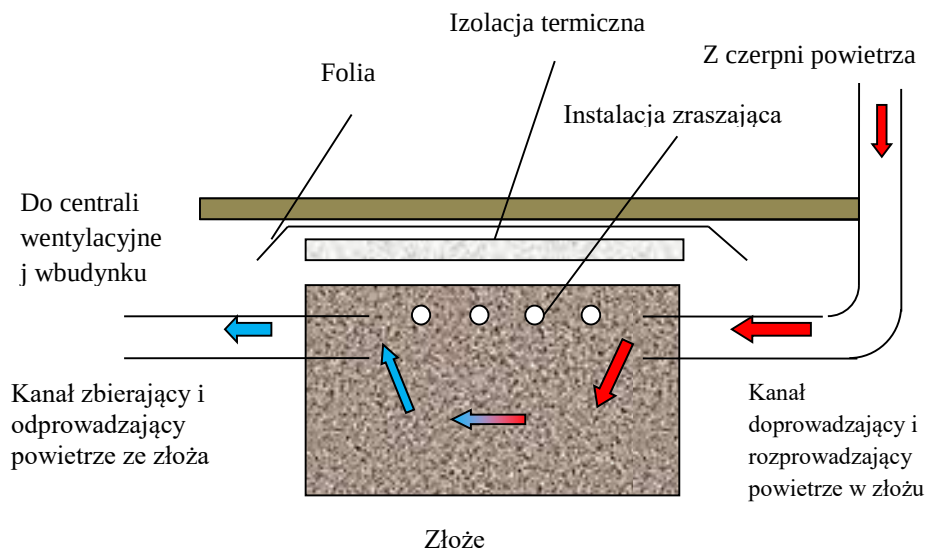
1.1. Gruntowe powietrzne wymienniki ciepła

Dość szeroko stosowanym w różnych obiektach systemem są gruntowe powietrzne wymienniki ciepła. Wspomagają one pracę wentylacji mechanicznej poprzez wstępne ogrzanie/ochłodzenie powietrza wentylacyjnego. Zimą, dzięki kontaktowi z gruntem, powietrze jest ogrzewane, co pozwala na zmniejszenie wielkości nagrzewnicy w centrali. Z kolei latem, powietrze oddaje ciepło do gruntu. Opuszczając wymiennik gruntowy, ma temperaturę rzędu 14 – 18°C. Jest to wartość zapewniająca uzyskanie komfortu cieplnego w pomieszczeniach, a nawet umożliwiającą rezygnację z montażu tradycyjnych systemów klimatyzacyjnych. Gruntowe wymienniki ciepła występują w pięciu rodzajach: żwirowy, rurowy, płytowy, glikolowy, grzebieniowy. Najpopularniejsze są dwa pierwsze typy, z przewagą żwirowego. W województwie podlaskim można znaleźć liczne przykłady takich rozwiązań.

1.1.1. GPWC żwirowe

Ten rodzaj gruntowych wymienników ciepła jest pierwszym, który pojawił się na terenie Polski. Badania nad nimi prowadzono już od lat 80-tych poprzedniego stulecia. Zgłoszony został patent na „Bezprzeponowy gruntowy wymiennik ciepła i masy”, jego autorami byli m.in. Besler i Spryszyński (patent PRL z 1980 r. nr 128261).

Instalacja rozpoczyna się od czerpni terenowej, zwykle murowanej, ale zdarzają się też ze stali ocynkowanej. Potem kanałami murowanymi powietrze jest kierowane do złoża ze żwiru płukanego. Następnie kanały murowane odbierają powietrze, które jest zasysane przez centralę wentylacyjną. Pracę GPWC przedstawia poniższy schemat:



Rysunek 1. Schemat gruntowego powietrznego wymiennika ciepła typu żwirowego

Źródło: Opracowanie własne

W tym przypadku mamy więc do czynienia z bezprzeponową wymianą ciepła, gdyż powietrze ma bezpośredni kontakt z gruntem.

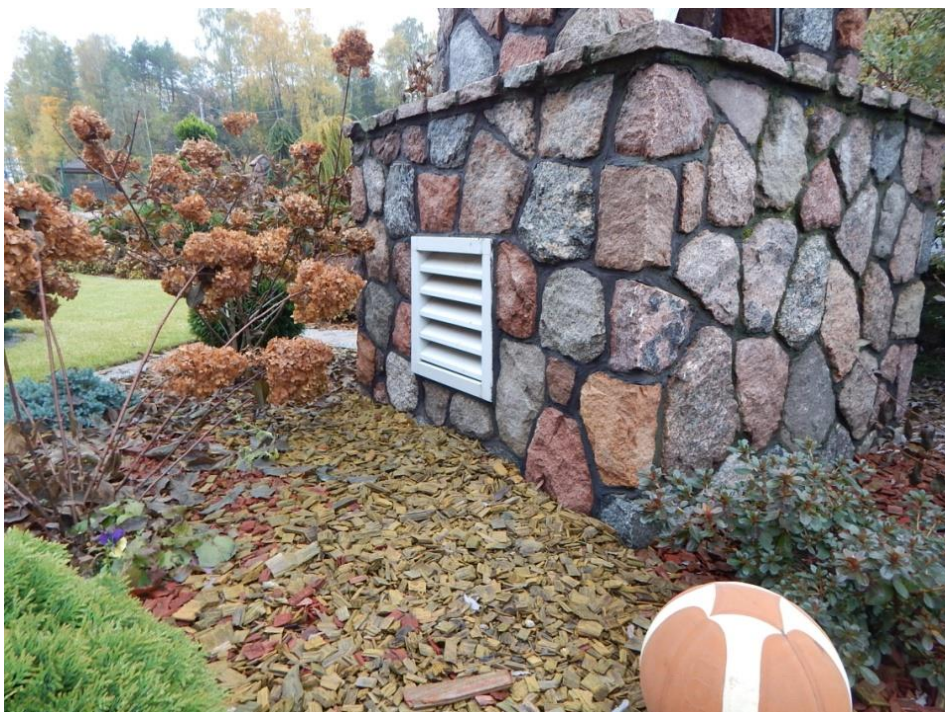
Według danych literaturowych [4,5,6], zimą uzyskuje się podgrzanie powietrza do temperatur dodatnich, nawet przy znacznych mrozach. Z kolei latem, następuje schłodzenie powietrza w stopniu umożliwiającym zrezygnowanie z tradycyjnego systemu chłodzenia pomieszczeń. Dodatkowo w wymienniku dochodzi do niwelowania dobowych skoków temperatury powietrza zewnętrznego – za GPWC uzyskuje się ich przebieg na zbliżonym poziomie.

Bardzo istotną kwestią jest mikrobiologiczna czystość powietrza

opuszczającego wymiennik ciepła. Na najstarszej pracującej instalacji w Polsce (GPWC z 1990r. o łącznej wydajności 137 000 m³/h obsługujące budynek usługowy w Kielcach) Sanepid dwukrotnie przeprowadził badania powietrza wchodzącego i opuszczającego wymiennik [7]. W 1994 roku stwierdzono, że powietrze na wylocie ze złoża zawiera znacznie mniej zanieczyszczeń niż zewnętrzne. Z kolei w 2004r. dokonano analizy markerów drobnoustrojów w powietrzu i w osadach pobranych ze złoża. Stwierdzono, że ilości mikroorganizmów, jak też ich chemicznych markerów, są istotnie znacznie mniejsze niż w czerpni. Nie zauważono również wzmożonego wzrostu bakterii i grzybów na powierzchni żwiru. Można zatem stwierdzić, że wymiennik żwirowy, oprócz poprawy temperatury powietrza, zapewnia również jego oczyszczenie.

Zdecydowanie największą zaletą GWPC żwirowych jest ich zdolność do poprawy parametrów powietrza oraz wykonanie z łatwo dostępnych materiałów. Wśród wad wymienić należy wrażliwość na wody gruntowe, konieczność zapewnienia w ciągu doby czasu na regenerację złoża oraz duże opory przepływu powietrza. Więcej o wadach i zaletach tego typu wymienników można przeczytać w [8,9].

Przykładem wymiennika żwirowego pracującego przy budynku jednorodzinny, parterowym z użytkowym poddaszem jest GPWC w Giełczynie. Powstał w 2011 roku, pracuje w sposób ciągły, nie przewidziano dodatkowej czerpni ściennej do pobierania powietrza w okresach przejściowych. Wymiary złoża żwirowego to 30 x 10 x 1,1 m. Właściciel nie zgłaszał żadnych problemów eksploatacyjnych. Czerpnia do GPWC murowana, z drewnianymi żaluzjami (rys. 2).



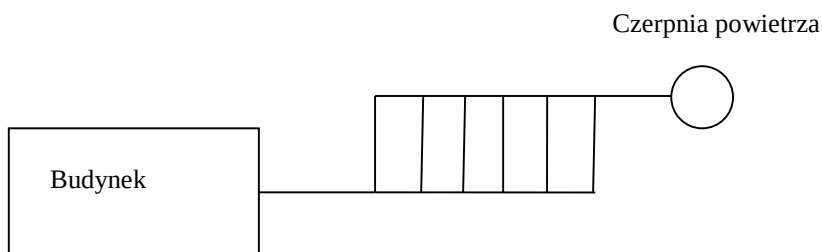
Rysunek 2. Czerpnia do GPWC żwirowego w Gielczynie

Źródło: Fot. J. Topolańska

1.1.2. GPWC rurowe

Kolejnym bardzo popularnym rozwiązaniem jest wymiennik rurowy. Tu z kolei wymiana ciepła zachodzi w sposób przeponowy, czyli powietrze nie ma bezpośredniego kontaktu z gruntem. Przeponę stanowi ścianka rury. W czerpni zaleca się montować filtr, który podlega okresowej wymianie. [5]

Wymienniki mogą być układane w gruncie na różne sposoby: w linii prostej, w kształcie litery „U” lub „S”, w układzie Tichelmanna [5,10]. Najpopularniejsze jest ostatnie rozwiązanie, z uwagi na najmniejsze opory hydrauliczne. Przedstawiono je na rys. 3.



Rysunek 3. Schemat gruntowego powietrznego wymiennika ciepła typu rurowego w układzie Tichelmanna

Źródło: Opracowanie własne

Również w tym przypadku dochodzi do poprawy parametrów powietrza. Oprócz temperatury, zmienia się także wilgotność powietrza. Niestety wymiana wilgoci zachodzi tylko latem (kondensacja w wyniku kontaktu ciepłego powietrza z chłodniejszym wymiennikiem). Z tego powodu GPWC musi być układany ze spadkiem, by umożliwić spływanie kondensatu. Zimą nie uzyskuje się nawilżania powietrza, jak ma to miejsce przy GPWC bezprzeponowych. [10]

W celu zapewnienia bezpieczeństwa mikrobiologicznego powietrza przepływającego przez wymiennik, zaleca się stosowanie rur z powłoką antybakteryjną, która będzie zapobiegała ewentualnemu namnażaniu się drobnoustrojów chorobotwórczych. [5]

Wymienniki tego typu są bardzo popularne w krajach Europy Zachodniej, a także w Indiach czy Turcji. Potencjał takich rozwiązań, często w kontekście współpracy z domem energooszczędnym, był badany m.in. przez Ghosala i in. [11] czy też Breescha [12]. Wyniki dawały zadowalające rezultaty. W Polsce zagadnieniem tym zajmował się np. Firląg [13]. Stwierdził on, że zastosowanie wymiennika jest ekonomicznym sposobem na nawiewanie do domów

energooszczędnych powietrza o dobrych parametrach temperaturowych.

Istotnym problemem przy wielorurowych wymiennikach ciepła jest równomierność rozplywu powietrza do wszystkich gałęzi. Szerokie badania na tym zagadnieniu były przeprowadzone w ramach pracy doktorskiej przez Amanowicza [14]. Wykazano m.in., że im większa średnica kolektora, tym bardziej równomierny rozdział powietrza w gałęzi. Ponadto potwierdzono, że bardziej korzystny jest kąt łączenia gałęzi z kolektorem równy 45° lub $2 \times 45^\circ$ niż kąt 90° .

Największą zaletą omawianego typu GPWC jest odporność na wysoki stan wody gruntowej. Więcej o wadach i zaletach można przeczytać w [8,9].

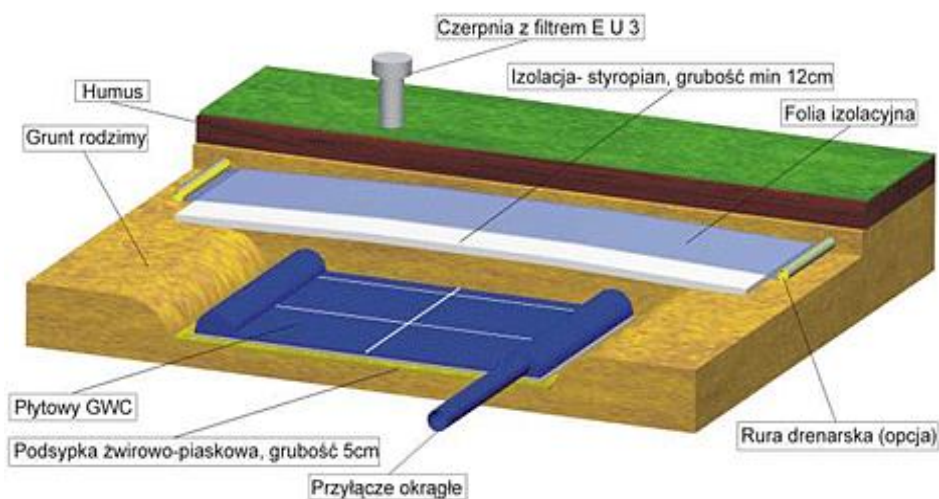
1.1.3. GPWC płytowe

Wymiennik płytowy chroniony jest prawem patentowym. Jest to kolejne rozwiązanie bezprzeponowe. W tym przypadku powietrze przepływa przez przestrzeń pomiędzy płytami a podsypką żwirową. Podsypkę wykonuje się ze żwiru płukanego o granulacji 10 – 20 mm. Ważnym elementem jest izolacja, symulująca głębsze posadowienie wymiennika. Czerpnia posiada na wyposażeniu filtr powietrza. Schemat wymiennika przedstawia rys. 4.

W celu zapewnienia czystości powietrza płyty są wykonywane ze specjalnego antystatycznego materiału, który zapobiega osadzaniu się kurzu i zanieczyszczeń. Dodatkowym zabezpieczeniem jest niezbyt duża prędkość przepływu powietrza. Jakość opuszczającego GPWC powietrza jest potwierdzona badaniami Wojewódzkiej Stacji Epidemiologicznej w Opolu. [15]

Wymiennik ten jest przystosowany do pracy ciągłej,

nie potrzebuje przerwy na regenerację. Podobnie jak w GPWC żwirowym, następuje tu osuszanie powietrza w lecie i nawilżanie w zimie. Kondensat spływa przez podsypkę żwirową do gruntu rodzimego. W przypadku wysokiego stanu wód gruntowych powinien być montowany ponad nimi, nawet jako wypiętrzony powyżej poziomu terenu.



Rysunek 4. Przekrój gruntowego powietrznego wymiennika ciepła typu płytowego

Źródło: www.wymiennikgruntowy.pl

Wg danych producenta, za GWC uzyskuje się bardzo stabilną temperaturę powietrza przy szerokim zakresie wahań temperatury zewnętrznej. Latem następuje schłodzenie powietrza z 30°C na około 16°C. Zimą zaś dochodzi do jego ogrzania z temp. -20°C do około 0°C. [15]

Instalacja ta posiada również pozytywną rekomendację techniczną Instytutu Techniki Budowlanej, stwierdzającą przydatność do stosowania w budownictwie.

Najważniejszą zaletą tego rozwiązania jest dobra wymiana ciepła i wilgoci z gruntem. Wśród wad wypada wspomnieć o wrażliwości

na wody gruntowe. Więcej informacji można odnaleźć w [8,9].

1.1.4. GPWC glikolowe

Ten rodzaj wymiennika jest najrzadziej spotykany. Pozbawiony jest wielu zalet wymienników bezprzeponowych, jak i rurowych.

Istotą tego rozwiązania jest umieszczenie w gruncie rury o DN20 do DN40 i długości 120 – 250 m. Rurę tą wypełnia się glikolem, który przetłacza mała pompa. W kanale biegnącym z czerpni, przy centrali wentylacyjnej znajduje się wymiennik powietrze/glikol, dzięki któremu następuje przekazanie energii od glikolu do powietrza wentylacyjnego [10].

GPWC glikolowy może osiągać bardzo dobre wydajności chłodnicze i grzewcze, ponadto dobrze się sprawdzi w trudnych warunkach glebowych i wodnych. Wadą jego jest brak oczyszczania powietrza i jego nawilżania w zimie [5].

1.1.5. GPWC grzebieniowe

Jest to najnowsze rozwiązanie konstrukcyjne gruntowych wymienników ciepła. Również chronione jest prawem patentowym [16].

Wymiennik grzebieniowy jest swoistą odmianą wymiennika żwirowego. Jego nazwa pochodzi od kształtu kanałów doprowadzających i odbierających powietrze ze złoża żwirowego. Wyglądają jak dwa zachodzące na siebie grzebienie (rys. 5).



Rysunek 5. Montaż gruntowego powietrznego wymiennika ciepła typu grzebieniowego

Źródło: www.grzebieniowygwc.pl

Kanały posiadają otwory, przez które powietrze wypływa do złoża żwirowego (warstwa żwiru 20 cm - znacznie niższa niż przy GPWC żwirowym). Ponadto w skład instalacji wchodzi też:

- czerpnia terenowa z filtrem niewymiennym – siatką o drobnych oczkach;
- instalacja zraszająca do polepszenia regeneracji złoża, zwłaszcza w okresie letnim;
- izolacja termiczna, styrodur lub styropian fundamentowy;
- bariera przeciwwkorzenna.

Producent dopuszcza posadowienie wymiennika w obrębie fundamentów budynku. Deklaruje również dobrą skuteczność wymiany ciepła wymiennika – latem możliwe jest utrzymanie temperatury nawiewu na poziomie 16°C. GPWC grzebieniowy charakteryzuje się ponadto małymi oporami tłoczenia i płytkim posadowieniem. Może

pracować w sposób ciągły, bez przerw na regenerację. Okresowe zalewanie wodami gruntowymi nie powinno mieć negatywnego wpływu na pracę złoża [16]. Jakość powietrza opuszczającego wymiennik jest znacznie lepsza niż wchodzącego, na GPWC grzebieniowy przyznano atest higieniczny PZH nr HK/B/1304/01/2013.

O wadach i zaletach można przeczytać w [8,9].

1.2. Kolektory słoneczne

Najpowszechniejszą formą wykorzystywania energii odnawialnej są kolektory słoneczne. Wskutek realizacji programów współfinansowania montażu kolektorów, na dachach licznych obiektów, nawet w małych miejscowościach, można zauważyć charakterystyczne panele. Wg normy PN-EN ISO 9488 wyróżnia się 14 typów konstrukcji kolektorów słonecznych. W Polsce występują właściwie w dwóch formach: jako płaskie i rurowe [17].

1.2.1. Kolektory płaskie (cieczowe)

Najważniejszą częścią kolektora jest absorber, który ma za zadanie pochłanianie promieniowania słonecznego bezpośredniego, ale też odbitego od przegród budowlanych (dachy, okna) i rozproszonego przez chmury. Pod absorberem krąży czynnik roboczy, w naszych warunkach klimatycznych niezamarzający glikol, ogrzewający się przy przepływie. Płyn następnie jest kierowany do podgrzewaczy ciepłej wody użytkowej lub zbiorników buforowych, przy bardziej złożonym systemie w budynku [18].

Najistotniejszym czynnikiem wpływającym na efektywność pracy kolektora jest jego lokalizacja względem stron świata i kąt jego

ustawienia. Zaleca się montaż w kierunku południowym, z co najwyżej nieznacznym odchyleniem ku wschodowi lub zachodowi. Przy innym sposobie montażu należy powiększyć jego powierzchnię. Odnośnie kąta ustawienia, zależy to od planowanego okresu pracy kolektora [18]:

- praca całoroczna – powinno to być 45° ;
- praca głównie latem, np. hotele, pensjonaty – zaleca się 30° ;
- praca poza okresem lata (szkoły) – optymalne ustawienie to 60° .

Zagadnienie optymalnego kąta ustawienia kolektorów w Polsce i metody jego obliczania zostało poruszone w [19]. Ważną kwestią jest też rozstaw kolektorów, przy stosowaniu większej ich ilości w baterii. Odległość pomiędzy nimi musi być tak dobrana, by nie zasłaniały sobie wzajemnie światła słonecznego. Nową metodę obliczania rozstawu kolektorów zaprezentowano w [20].

Ponadto ważną kwestią są też aktualne warunki pogodowe, przy znacznym zachmurzeniu zysk energetyczny jest znikomy w porównaniu z bezchmurnym niebem.

Sprawność kolektorów z biegiem czasu spada, a przyczyną takiego stanu rzeczy jest zabrudzenie warstwy absorbera (choćby kurzem).

Na poniższym zdjęciu (rys. 6) przedstawiono kolektory płaskie zamontowane przy budynku jednorodzinnym. Służą one przygotowaniu c.w.u., funkcjonują od 2013 roku.



Rysunek 6. Kolektory słoneczne płaskie na dachu budynku jednorodzinnego w Butrymowcach

Źródło: Fot. J. Topolańska

1.2.2. Kolektory próżniowe (rurowe)

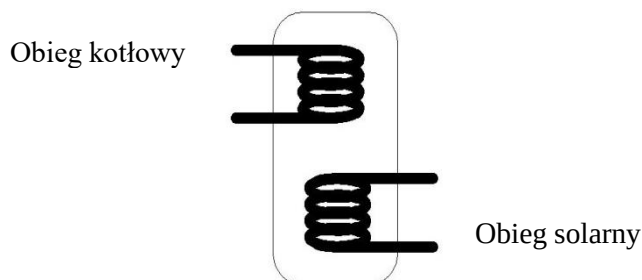
Zasada działania jest taka sama jak płaskich, jednak w tym przypadku absorber jest izolowany nie materiałem izolacyjnym na tylnej płycie, a otaczającą go próżnią w szklanej rurce. Ponieważ próżnia jest dobrym izolatorem, występują mniejsze straty ciepła niż przy kolektorze płaskim. Mogą one być montowane w pozycji pionowej lub poziomej [21]. Wewnątrz rury płynie czynnik grzewczy, który po ogrzaniu wraca w przeciwnym kierunku (przepływ współosiowy) lub też czynnik roboczy może odparowywać w jednej części rury i skraplać się oddając ciepło glikolowi z obiegu solarnego na jej drugim końcu [22].

Kolektor próżniowy stanowią więc baterie szklanych rur o średnicy 5-10 cm. Stosowane szkło jest hartowane solarne lub w niektórych konstrukcjach pryzmatyczne, wszystko po to, by zapewnić długą i wydajną pracę. Kolektory próżniowe są droższe, ale przy gorszych

warunkach atmosferycznych powinny dostarczać większą ilość energii [22].

1.2.3. Obiegi solarne

Kolektory pracują w obiegu solarnym. Czynnik roboczy płynący w rurach oddaje ciepło do zasobnika. Takie zasobniki zwykle mają dwie węzownice (rys. 7).



Rysunek 7. Schemat lokalizacji węzownic w zasobniku

Źródło: Opracowanie własne

Zasobnik taki jest ładowany ciepłem z kolektora nawet na kilka dni. W razie gorszych warunków atmosferycznych ciepła woda będzie nadal. Zimą, gdy obieg solarny będzie miał gorszą wydajność, istotną rolę odgrywa obieg kotłowy. Jako szczytowe źródło ciepła dogrzeje ciepłą wodę użytkową do wymaganej temperatury. Ewentualnie można też wykorzystywać grzałkę elektryczną zamiast kotła. Ogólnie można przyjąć, że na 1 osobę mieszkającą w domu jednorodzinnym potrzeba 1 – 1,5 m² powierzchni kolektora płaskiego lub 0,6 – 0,8 m² powierzchni kolektora rurowego [18].

Istnieje możliwość wykorzystania kolektorów do wspomagania instalacji c.o.. Ciepło przekazane od kolektorów może być gromadzone w zasobniku buforowym [21], który jest dogrzewany przez tradycyjny kocioł, lub też można wykonać instalację niskotemperaturową [18].

1.3. Pompy ciepła

Coraz popularniejszym rozwiązaniem stają się pompy ciepła. Pompą ciepła nazywamy urządzenie, które dzięki energii napędowej, przenosi ciepło z ośrodka o niższej temperaturze do ośrodka o wyższej temperaturze. Aby było to możliwe, trzeba dostarczyć energię napędową. W obiegu pompy ciepła występują dwa źródła: dolne (z niego ciepło jest pobierane) i górne (do niego ciepło jest oddawane). Rodzaj dolnego źródła decyduje o rodzaju zastosowanej pompy ciepła. Instalacja centralnego ogrzewania w budynku pracuje jako niskotemperaturowa [23].

1.3.1. Podział pomp ciepła

Podstawowy podział pomp ciepła [24]:

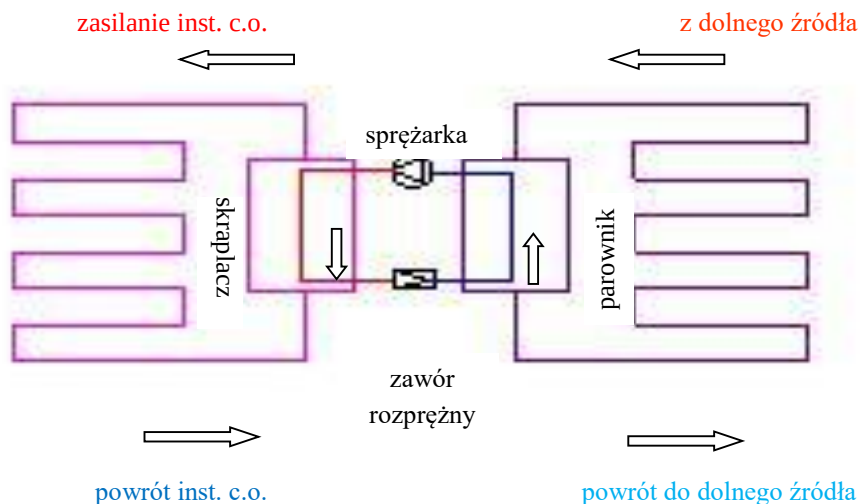
- Pompy absorpcyjne (z napędem cieplnym),
- Pompy termoelektryczne (z napędem elektrycznym),
- Pompy sprężarkowe (z napędem mechanicznym).

Sorpcyjne pompy ciepła są mniej popularne niż sprężarkowe, jednak charakteryzują się wieloma pozytywami, m.in. dużą niezawodnością działania, cicha praca. W jej budowie wyróżnia się dwa obiegi: właściwy (skraplacz, zawór rozprężny, parowacz) i obieg sprężarki termicznej (absorber, warnik, pompa roztworu, zawór

rozprężny). Sprężanie par czynnika roboczego zachodzi w sprężarce termicznej za pośrednictwem procesów absorpcji i desorpcji [25].

Działanie termoelektrycznych pomp ciepła bazuje na zjawisku (tzw. efekt Peltiera) nagrzewania się jednej strony i schładzania drugiej podczas przepływu prądu stałego przez obwód złożony z dwóch różnych przewodników. Podstawową częścią pompy są termoelementy (złożone z dwóch gałęzi wykonanych z półprzewodników) łączone w baterie. [25]

Praca sprężarkowej pompy ciepła bazuje na obiegu termodynamicznym: czynnik roboczy krąży w obiegu zamkniętym pomiędzy parownikiem, sprężarką, skraplaczem i zaworem rozprężnym (rys. 8). Sprężarka spręża pary czynnika, w efekcie wartość jego temperatury rośnie. W skraplaczu pary skraplają się przy oddawaniu swego ciepła wodzie grzewczej. Dzięki zaworowi rozprężnemu czynnik ochładza się przy rozprężaniu, więc może potem w parowniku odebrać ciepło od dolnego źródła, odparowując. [24]



Rysunek 8. Schemat działania pompy ciepła

Źródło: Opracowanie własne

Pompy ciepła sprężarkowe dzielą się na cztery typy urządzeń [24]:

- Pompa powietrze/woda,

Jako dolne źródło ciepła wykorzystują powietrze atmosferyczne lub też zużyte powietrze wentylacyjne z np. hal fabrycznych, kuźni, instalacji basenowych. Moc grzewcza pompy maleje ze spadkiem temperatury zewnętrznej. Może dochodzić do szronienia parownika, co jest niepożądane.

- Pompa woda/woda,

By wykorzystywać jako dolne źródło ciepła wodę, jej temperatura powinna być wyższa niż 7°C (trudne do osiągnięcia w okresie zimowym). Korzystanie z wód gruntowych może prowadzić do wyczerpania warstwy wodonośnej. Woda nie powinna mieć zbyt silnych właściwości korodujących.

- Pompa solanka/woda,

Solanka, odbierająca ciepło z dolnego źródła, krąży w obiegu zamkniętym. Zastosowanie czynnika niezamarzającego jest dobrym rozwiązaniem.

- Pompa bezpośrednie parowanie/woda.

Płaski kolektor gruntowy z rur miedzianych służy jako parownik, będąc elementem obiegu termodynamicznego. Czynnik krążący wewnątrz rur paruje po zetknięciu się z gruntem (przez ich ścianki).

1.3.2. Grunt jako dolne źródło ciepła

Grunt jest zasobnikiem ciepła, w którym na pewnej głębokości występuje stała temperatura, odpowiadająca średniej rocznej temperaturze powietrza w danej strefie. Grunt jest też łatwo dostępny, a jego temperatura przewyższa temperaturę powietrza zewnętrznego. Ilość uzyskanego ciepła jest wyższa w gruntach wilgotnych. [26]

Wymiennik gruntowy może być wykonany jako:

- *Wymiennik poziomy,*

Ułożony na płasko jako układ szeregowy, wężownicowy lub spiralny. Głębokość posadowienia to 1,2 – 2,0 m, ok. 30 cm poniżej strefy przemarzania gruntu. W przypadku, gdy kolektor składa się z kilku sekcji, wtedy wszystkie one muszą być równej długości. Sekcje łączy się w studziencie zbiorczej za pomocą rozdzielaczy. Ograniczeniem do zastosowania wymiennika poziomego jest dostępna powierzchnia działki [26].

- *Wymiennik pionowy,*

Inaczej sondy ziemne. Najczęściej stosowany, z uwagi na łatwość wykonania, jest typ to „U”. Odległość pomiędzy odwiertami powinna

wynosić co najmniej 5m. Wykonanie odwiertów jest bardzo kosztowne i jest czynnikiem ograniczającym ich stosowanie [24].



Rysunek 9. Studzienka rozdzielaczowa dolnego źródła ciepła dla pompy ciepła w Narwi

Źródło: Fot. J. Topolańska

Przykładem pompy ciepła współpracującej z budynkiem jednorodinnym jest urządzenie zamontowane w 2012 roku w domku parterowym z użytkowym poddaszem w Narwi. Zapewnia ona ciepło na cele centralnego ogrzewania oraz podgrzewu ciepłej wody użytkowej. Dolne źródło ciepła stanowią 3 odwierty pionowe. Na zdjęciu powyżej (rys. 9) widoczna studzienka rozdzielaczowa, łącząca wszystkie sondy. Właściciel zauważył problemy z ubywaniem glikolu, jednak po wymianie rozdzielacza sytuacja taka nie miała już miejsca. Poza tym nie stwierdzono żadnych problemów eksploatacyjnych.

1.4. Biomasa

Biomasę stanowią m.in. słoma, odpady drzewne. Charakteryzuje się ona małą zawartością azotu i siarki oraz części niepalnych. Można ją

wykorzystywać do spalania bezpośrednio lub w formach przetworzonych. Źródło biomasy stanowią też rośliny energetyczne, czyli rośliny uprawne (np. zboża, rzepak, trzcina), rośliny drzewiaste o szybkiej rotacji (topola, wierzba), a także szybko rosnące i wieloletnie rośliny trawiaste. [27]

W zależności od materiału wyjściowego, biomasę można wykorzystywać w postaci [28]:

- drewna rozdrobnionego – zrębków, ścinek, wiór, trocin, pyłu drzewnego,
- drewna kompaktowego – brykiety lub pellety,
- sprasowanych kostek, balotów oraz siewki (słoma i biopaliwa z roślin niezdrewniałych).

Do podstawowych rodzajów biopaliw stałych wytwarzanych drewna zalicza się [29]: drewno opałowe, zrębki, produkty uboczne przemysłu drzewnego (kora, trociny i wióry), brykiety i pellety, odpady drzewne (często zanieczyszczone klejem, farbami, gumą).

Bardzo wygodnym w użytkowaniu rodzajem biomasy są pellety. Produkuje się je głównie z wiór i trocin. Do matrycy, pod wysokim ciśnieniem, wpychany jest starty materiał. Nie ma konieczności używania dodatkowego materiału scalającego cząstki. Następnie pellety są schładzane. Zakres regulacji nowoczesnych kotłów na pellet wynosi od 20%-100% mocy cieplnej. Kotły te samoczynnie się rozpalają oraz dozują paliwo. Są też wyposażane w automatykę pogodową, sterowanie pokojowe oraz sterowanie obiegami grzewczymi i temperaturą ciepłej wody użytkowej [30].

Do spalania biomasy stosuje się kotły z załadunkiem ręcznym (wsadowe) oraz z podajnikiem automatycznym (szczególnie przy

biomasie przetworzonej). Wśród kotłów z podajnikami automatycznymi wyróżnia się [31]:

- retortowe,

Paliwo jest podawane od dołu podajnikiem ślimakowym w sposób ciągły. Powietrze do spalania jest podawane wielopunktowo wentylatorem nadmuchowym. Dzięki temu, że spalanie zachodzi w niewielkiej ilości paliwa i wysokiej temperaturze, spaliny posiadają nieznaczne ilości zanieczyszczeń. Regulacja mocy kotła zachodzi poprzez zmianę prędkości obrotowej podajnika i wentylatora.

- z palnikiem szufladowym,

Podawanie paliwa odbywa się z wykorzystaniem specjalnego tłoka, który przepycha paliwo zasobnika na ruszt paleniska. Przy każdym takim ruchu zachodzi odżużlanie paleniska i usuwanie popiołu.

- z palnikiem wrzutowym,

W tym przypadku podawanie paliwa zachodzi najpierw ukośnym podajnikiem ślimakowym do środkowej części kotła, skąd rynną zsypową jest zrzucane do specjalnego tygła (małymi porcjami, w krótkim okresie czasu) i natychmiast spalane.

- z palnikiem tubowym (rurowym),

Stosowane do spalania drobnej biomasy (pellet do 10 mm, zboża, trociny, wióry). Paliwo podawane jest małymi porcjami systemem pneumatycznym, po automatycznym zapłonie spala się natychmiast. Regulacja wydajności odbywa się zmianą prędkości obrotowej wentylatora nadmuchowego i intensywnością dozowania paliwa.

- z palnikiem rynnowym.

Palniki wielopaliwowe, oprócz biomasy (zboża, pellety) można też tu spalać węgiel ekogroszek i miał węglowy. Palenie odbywa się

w specjalnie uformowanej rynnie, posiadającej z dwóch stron otwory doprowadzające powietrze.

Wielość rozwiązań, przy dobrych efektach energetycznych i relatywnie długim okresie bezobsługowej pracy zachęca właścicieli domków jednorodzinnych do sięgania po rozwiązania nowoczesnego spalania biomasy.

Przykładowe zastosowanie kotła z podajnikiem szufladowym przedstawiają poniższe zdjęcia (rys. 10). Kocioł zapewnia ciepło na potrzeby ogrzewania domu jednorodzinnego z użytkowym poddaszem oraz do podgrzewu ciepłej wody użytkowej. Jego praca sterowana jest automatyką pomieszczeniową (temperatura zadana w pomieszczeniu reprezentatywnym). Stosowane paliwo to ekogroszek, zapewniający łatwość dozowania.



Rysunek 10. Kocioł na ekogroszek z podajnikiem szufladowym i sterowaniem automatycznym w Bielsku Podlaskim (ul. Chmielna)

Źródło: Fot. J. Topolańska

2. Wnioski

1. Istnieje wiele systemów do pozyskiwania i przetwarzania energii odnawialnej w budynkach, wykorzystuje się je zarówno w budynkach o dużych powierzchniach, jak i przy domkach jednorodzinnych.
2. Oprócz najbardziej znanych metod (kolektory słoneczne i biomasa), również gruntowe powietrzne wymienniki ciepła i pompy ciepła znajdują coraz powszechniejsze zastosowanie.
3. GPWC pozwala zmniejszyć wymiar nagrzewnicy w centrali wentylacyjnej, przy mrozach zapewniając dopływ powietrza o temperaturze dodatniej, dodatkowo niwelowane są dobowe skoki temperatury.
4. Pompa ciepła jest w stanie zapewnić komfort cieplny w budynku, współpracując z niskotemperaturową instalacją c.o, a także uzyskać wymaganą temperaturę c.w.u.
5. Ważnym elementem wpływającym na decyzję o zastosowaniu wybranego systemu energii odnawialnej jest automatyzacja procesów – wytwarzania ciepła do ogrzewania budynku i podgrzewu c.w.u. czy też obróbki i dystrybucji powietrza wentylacyjnego (wyższość nad wentylacją grawitacyjną).

**Badania zostały zrealizowane w ramach pracy nr MB/WBiŚ/12/2014
i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW.**

Literatura:

1. www.energiaisrodowisko.pl/zarzadzanie-energia-i-srodowiskiem/pakiet-klimatyczno-energetyczny, [dostęp: 10.02.2016r].

2. Ustawa z dnia 15 kwietnia 2011 r. o efektywności energetycznej (Dz.U.2015 poz. 2167 z późn. zm.).
3. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 12 kwietnia 2002 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budynki i ich usytuowanie (Dz.U.2002 nr 75 poz. 690 z późn. zm).
4. www.taniaklima.pl, [dostęp: 10.02.2016r.].
5. www.linkgwc.pl, [dostęp: 10.02.2016r.].
6. Topolańska J., Krawczyk D.: *Gruntowe powietrzne wymienniki ciepła Cz. 2 Ocena pracy systemu na podstawie wyników pomiarów*, Rynek Instalacyjny, nr 7-8, 2015, str. 65-68.
7. Szponar B., Iwanicka M.: *Gruntowy wymiennik ciepła. Mikrobiologiczna czystość*, Magazyn Instalatora, nr 2, 2006, str. 18-19.
8. Topolańska J., Krawczyk D.: *Gruntowe powietrzne wymienniki ciepła – teoria a praktyka*, [w:] *Ogrzewnictwo i wentylacje*: pod red. Skoczko I., Piekutin J., Iwaniuk J. Monografie „Inżynieria Środowiska – Młodym Okiem”, tom 8, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, 2014, str. 95-127.
9. Topolańska J., Krawczyk D.: *Gruntowe powietrzne wymienniki ciepła Cz. 1 Przegląd stosowanych rozwiązań*, Rynek Instalacyjny, nr 4, 2014, str. 78-81.
10. www.gwc.com.pl, [dostęp: 10.02.2016r.].
11. Ghosal M.K., Tiwari G.N., Srivastava N.S.L.: *Thermal modeling of a greenhouse with an integrated earth to air heat exchanger: an experimental validation*, Energy and Buildings, nr 36, 2004, str. 219-227.

12. Breesch H., Bossaer A., Janssens A.: *Passive cooling in a low-energy office building*, Solar Energy, nr 79, 2005, str. 682-696.
13. Firląg Sz.: *Współpraca wentylacji mechanicznej z GWC w budynku pasywnym*, Rynek Instalacyjny, nr 3, 2007, str. 21-25.
14. Amanowicz Ł.: *Wpływ parametrów konstrukcyjno – operacyjnych na charakterystyki przepływowe powietrznych wielorurowych gruntowych wymienników ciepła (PRGWC)*, Zakład Ogrzewnictwa, Klimatyzacji i Ochrony Powietrza, Poznań, 2015.
15. www.wymiennikgrutnowy.pl, [dostęp: 10.02.2016r.].
16. grzebieniowygwc.pl, [dostęp: 10.02.2016r.].
17. Praca zbiorowa pod kierunkiem Mirosława Zawadzkiego: *Kolektory Słoneczne, Pompy Ciepła – Na Tak.*, Wydawnictwo ZAWADZKI, Kobyłka, 2003.
18. www.budujemydom.pl/kolektory-sloneczne/8412-zasada-dzialania-kolektora-slonecznego, [dostęp: 11.02.2016r.].
19. Żukowski M., Radzajewska P.: *Optymalny kąt nachylenia kolektorów słonecznych na terenie Polski*, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, nr 4, 2015, str. 138-142.
20. Żukowski M., Radzajewska P.: *Optymalny rozstaw kolektorów słonecznych*, Ciepłownictwo Ogrzewnictwo Wentylacja, nr 1, 2016, str. 8-11.
21. *Podręcznik architekta, projektanta i instalatora. Kolektory słoneczne*, Viessmann, 2010.
22. murator-dom.pl/instalacje/kolektory-pompy-ciepła/kolektory-sloneczne-zasada-dzialania-budowa,30_8987.html, [dostęp: 11.02.2016r.].

23. Wydrycki J.: *Pompa ciepła – budowa, zasada działania i parametry charakterystyczne*, [w:]: *Odnawialne źródła energii: biomasa i popy ciepła. Referaty z seminariów*, Stowarzyszenie „Uroczysko”, Supraśl 2002, s. 41 - 53.
24. Zawadzki M.: *Kolektory słoneczne. Pompy ciepła. Na Tak*, Polska Ekologia, Warszawa, 2003.
25. Zalewski W.: *Pompy ciepła: sprężarkowe, sorpcyjne i termoelektryczne. Podstawy teoretyczne. Przykłady obliczeniowe*, Inżynierskie Przedsiębiorstwo Produkcyjno – Usługowe Masta, Gdańska, 2001.
26. Rubik M.: *Pompy ciepła: poradnik*, Ośrodek Informacji „Technika instalacyjna w budownictwie”, Warszawa , 2006.
27. Nantka M.B.: *Ogrzewnictwo i ciepłownictwo*, T. 1, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2006.
28. Pisarek M., Hunder M.: *Wykorzystanie biopaliw stałych na cele energetyczne w Polsce – stan rozwoju, przykłady, perspektywy*, [w:]: *Odnawialne źródła energii: biomasa i popy ciepła. Referaty z seminariów*, Stowarzyszenie „Uroczysko”, Supraśl, 2002, s. 11 - 24.
29. Gradziuk P., Grzybek A., Kowalczyk K., Kościk B.: *Biopaliwa*, Wieś Jutra, Warszawa, 2003.
30. www.biopal.com.pl, [dostęp: 15.02.2016r.].
31. www.instsani.pl, [dostęp: 15.02.2016r.].

mgr inż. Paulina Radzajewska¹⁾

Politechnika Białostocka, Wydział Budownictwa i Inżynierii Środowiska

Katedra Ciepłownictwa, Ogrzewnictwa i Wentylacji

ul. Wiejska 45A, 15-351 Białystok

¹⁾p.radzajewska@doktoranci.pb.edu.pl

Śloneczne systemy klimatyzacyjne

Solar cooling

Słowa klucze: *klimatyzacja, ciepło, chłód, kolektor*

Keywords: *air conditioning, heat, cold, solar collector*

Streszczenie: Początkowo klimatyzacja była stosowana głównie w obiektach biurowych oraz budynkach użyteczności publicznej. W chwili obecnej coraz częściej można się spotkać z instalacjami klimatyzacyjnymi w budynkach mieszkalnych. Mogą one stanowić uzupełnienie instalacji c.o. bądź wentylacji, a także mogą w pełni zaspokoić zapotrzebowanie budynku na ciepło i chłód oraz zapewnić wymagany dopływ świeżego powietrza. Ciekawym rozwiązaniem jest klimatyzacja, która do produkcji chłodu wykorzystuje instalacje solarne. Pozwala to zmniejszyć zużycie energii potrzebnej do ochłodzenia powietrza ze źródeł konwencjonalnych. Energia promieniowania słonecznego w klimatyzacji solarnej wykorzystywana jest na drodze fototermicznej i fotowoltaicznej.

W artykule przedstawiono podstawowe informacje na temat klasycznych systemów klimatyzacji. Opisano podziały urządzeń klimatyzacyjnych oraz omówiono rodzaje typowych instalacji klimatyzacyjnych. Przedstawiono 4 rodzaje słonecznych systemów klimatyzacji: adsorpcyjny układ klimatyzacyjny, system klimatyzacji strumienicowej, system klimatyzacji z osuszaniem sorpcyjnym oraz system klimatyzacyjny z absorpcyjnym urządzeniem chłodniczym.

1. Wstęp

Ciągły rozwój cywilizacji wiąże się ze wzrostem zapotrzebowania na energię w różnych postaciach, tj. ciepło, chłód, energię elektryczną,

jądrową, itp. Energia ta pochodzi w znacznej mierze z nieodnawialnych źródeł energii (m. in. węgiel brunatny i kamienny, gaz ziemny, ropa, paliwa jądrowe) oraz ze źródeł odnawialnych (tj. promieniowanie słoneczne, wiatr, pływy i fale morskie, geotermia, opady), które są coraz bardziej popularne. Ogromne zasoby energii ze źródeł nieodnawialnych są łatwo dostępne, całkowicie bezpłatne i praktycznie nieograniczone. Wzrost udziału energii pochodzącej z odnawialnych źródeł w zaspokajaniu potrzeb energetycznych krajów rozwiniętych oraz jej racjonalne zużycie stanowi jeden z ważnych komponentów zrównoważonego rozwoju, przyczyniając się do poprawy stanu środowiska naturalnego oraz poprawy efektywności i oszczędzania zasobów surowców energetycznych [1, 2, 3].

W Polsce większość energii w budynkach wykorzystywana jest na potrzeby ogrzewania i wentylacji pomieszczeń. Jednak wraz z rozwojem technologii pasywnej (nisko energochłonnej) w budownictwie rośnie zapotrzebowanie na chłód i jest ono największe latem, kiedy występują maksymalne zyski energii promieniowania słonecznego. Ciekawym pomysłem wykorzystującym ową zależność są słoneczne systemy klimatyzacyjne. Najczęściej systemy te wspomagane są konwencjonalną instalacją chłodniczą. Decydując się na taki rodzaj klimatyzacji, należy dokładnie przeanalizować budynek pod względem energetycznym. Przy jej projektowaniu nie wystarczy znać maksymalnych wartości zapotrzebowania na chłód, ale również rozłożenie jego obciążenia w czasie i przestrzeni [2, 4].

2. Podział urządzeń klimatyzacyjnych oraz konwencjonalnych systemów klimatyzacji

Urządzenia klimatyzacyjne pozwalają w pełni automatycznie przygotować powietrze wykorzystując funkcje chłodzenia, grzania, osuszania, nawilżania, filtrowania, jak też jego zamierzoną wymianę. Urządzenia te możemy podzielić na [5]:

- komfortowe (bytowe) – stosowane w obiektach, w których przebywają ludzie, np. biurowce, centra handlowe, restauracje, kina, a zatem muszą zapewnić odpowiednie warunki klimatyczne w pomieszczeniach, tj. zakres temperatur 20 - 27°C i wilgotność względna 30 – 64%;
- przemysłowe – gwarantują stały stan powietrza zalecany dla techniki pomiarowej bądź w pomieszczeniach, gdzie przygotowuje się i składa produkty.

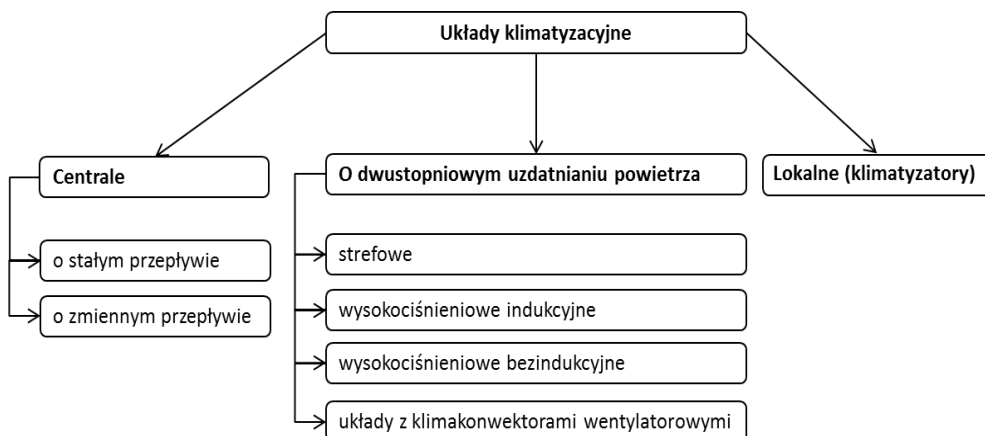
W przypadku urządzeń klimatyzacyjnych pracujących w muzeach i bibliotekach, oprócz zapewnienia komfortowego stanu powietrza dla ludzi, muszą one również zabezpieczyć trwałość wrażliwego na klimat dobytku kultury [5].

W przypadku systemów klimatyzacyjnych, mamy szeroki wachlarz możliwości przygotowywania powietrza pod względem cieplno-wilgotnościowym, zaczynając od tych prostych, gdzie powietrze o jednakowym stanie rozprowadzane jest do poszczególnych pomieszczeń, a kończąc na systemach zaawansowanych, np. w nowoczesnych biurowcach, gdzie znajduje się dużo pomieszczeń o znacznie różnych warunkach. Przykładem może tu być wieżowiec usługowy, gdzie na stronie południowej powietrze należy okresowo chłodzić, a na stronie północnej - okresowo ogrzewać. Wtedy nawiew

powietrza realizowany jest w sposób pomieszczeniowy, piętrowy bądź strefowy poprzez [5]:

- stosowanie klimakonwektorów albo konwektorów wentylatorowych w systemach wentylacyjnych;
- zastosowanie wtórnych nagrzewnic i chłodnic powietrza;
- podział dopływu powietrza na ciepłe i zimne strumienie oraz ich mieszanie w sposób indywidualny, zależnie od potrzeb każdego z pomieszczeń.

Poniżej przedstawiono ogólny podział instalacji klimatyzacyjnych (Rysunek 1).



Rysunek 1. Podział układów klimatyzacyjnych

Źródło: Praca własna na podstawie [6]

W układach klimatyzacyjnych z urządzeniami centralnymi obróbka (uzdatnianie) powietrza odbywa się jednostopniowo w centralach klimatyzacyjnych. Instalacje te mogą być jednoprzewodowe bądź dwuprzewodowe. Z kolei w układach o dwustopniowym uzdatnianiu powietrza najpierw ma miejsce wstępne uzdatnianie w centrali, a następnie w taki sposób przygotowane powietrze poddawane jest powtórnemu i ostatecznemu uzdatnianiu poza centralą,

np. w pomieszczeniu albo na drodze między centralą a pomieszczeniem [6].

Układy klimatyzacyjne, oprócz podstawowych funkcji, tj. ogrzewania, ochładzania bez wykroplenia (suche) lub z wykropleniem (tzw. mokre - związane z osuszaniem), nawilżania, mieszania, itp., dodatkowo mogą być wykorzystywane przy odzysku ciepła, filtracji, jonizacji, dezynfekcji bądź dezodoryzacji[7].

Poniżej scharakteryzowano po krótkce najpopularniejsze konwencjonalne systemy klimatyzacji.

3. Układy z centralami klimatyzacyjnymi

Układy z centralami klimatyzacyjnymi są najbardziej rozbudowanymi systemami klimatyzacyjnymi. Umożliwiają regulację temperatury powietrza, wilgotności, a także utrzymują jego czystość dzięki zastosowaniu systemu filtrów. Wśród systemów tego typu rozróżniamy [8]:

- systemy jednoprzewodowe scentralizowane – stosowane w pomieszczeniach charakteryzujących się jednakowym przeznaczeniem oraz zbliżonym obciążeniem chłodniczym; powietrze uzdatniane jest w centrali klimatyzacyjnej zawierającej wszystkie elementy potrzebne do obróbki, a następnie rozprowadzane przewodami do poszczególnych pomieszczeń;
- systemy jednoprzewodowe strefowe –stosowane w pomieszczeniach o zróżnicowanych wymaganiach klimatyzacyjnych; powietrze wypływa z centrali z wymaganą temperaturą punktu rosy oraz odpowiednio niską temperaturą powietrza nawiewanego, aby można ją było regulować nagrzewnicami wtórnymi w poszczególnych

strefach budynku;

- systemy klimatyzacji wysokociśnieniowej jednoprzewodowej – minimalna ilość powietrza zewnętrznego uzdatniana jest (tj. nawilżana, osuszana, ogrzewana bądź ochładzana) w komorze klimatyzacyjnej, a dalej rozprowadzana do klimakonwektorów wyposażonych najczęściej w wymiennik ciepła pracujący jako nagrzewnica albo chłodnica (w zależności od potrzeb);
- systemy klimatyzacji wysokociśnieniowej dwuprzewodowej – stosowane w pomieszczeniach o dużych powierzchniach bądź w budynkach z dużą liczbą pomieszczeń, zimne i ciepłe powietrze doprowadzane jest do pomieszczenia oddzielnymi przewodami, pomiędzy którymi znajduje się urządzenie mieszające regulujące parametry powietrza nawiewanego;
- systemy klimatyzacji indywidualnej – występują w postaci skrzynek lub szaf, stosowane do obróbki powietrza w wybranych pomieszczeniach, mogą być autonomiczne (posiadające własne nagrzewnice i agregaty chłodnicze) oraz nieautonomiczne (wymagające doprowadzenia ciepła lub chłodu z centrali).

4. Systemy klimatyzacyjne VRF (z ang. *Variable Refrigerant Flow*)

Systemy VRF są systemami zdecentralizowanymi o konstrukcji modułowej ze zmiennym przepływem czynnika chłodniczego, które regulują przepływ czynnika w zależności od zapotrzebowania obiektu na chłód bądź ciepło. Jednym z producentów takich systemów jest firma Mitsubishi. Najprostszy taki układ składa się z szeregu jednostek wewnętrznych oraz z jednej jednostki zewnętrznej, która chłodzona jest powietrzem. Jednostki wewnętrzne umożliwiają regulację temperatury

wewnątrz pomieszczeń. Dwuprzewodowy system VRF pozwala na jednoczesne grzanie oraz chłodzenie różnych pomieszczeń w tym samym budynku. Bardzo ważną rolę omawianym układzie odgrywa sterownik, który przede wszystkim przełącza tryb pracy systemu między chłodzeniem a grzaniem oraz rozdziela czynnik chłodniczy w zależności od rodzaju pracy. Z kolei system zdalnego sterowania umożliwia indywidualną regulację wewnętrznych urządzeń chłodniczych zlokalizowanych w poszczególnych pomieszczeniach [5, 9].

5. Układy z klimatyzatorami monoblokowymi

Klimatyzatory monoblokowe w swojej budowie posiadają [8]:

- dwa wymienniki ciepła, tj. parownik oraz skraplacz;
- zawór rozprężny;
- sprężarkę;
- dwa wentylatory, które wymuszają przepływ powietrza wokół wymienników.

Niskowrzący czynnik roboczy krąży w obiegu wewnętrznym systemu, który odbiera ciepło z pomieszczenia wskutek przemian termodynamicznych (odparowując na parowniku). Odparowane ciepło zostaje usunięte na zewnątrz (skraplając się na skraplaczu). Należy dodać, że za przejście czynnika roboczego w stan ciekły oraz gazowy odpowiada sprężarka i zawór rozprężny. Klimatyzatory monoblokowe kontrolują jedynie temperaturę powietrza (bez jego nawilżania i osuszania) [8].

6. Układy z klimatyzatorami typu split oraz multi-split

Klimatyzatory typu split złożone są dwóch jednostek: zewnętrznej oraz wewnętrznej. Jednostka wewnętrzna posiada parownik i wentylator,

a jej zadanie polega na schładzaniu powietrza w pomieszczeniu. Z kolei w jednostce zewnętrznej zlokalizowana jest sprężarka oraz skraplacz. Urządzenie to odprowadza ciepło poza budynek. Zależnie od rodzaju i sposobu montażu jednostek wewnętrznych dzielimy je na [8]:

- klimatyzatory ściennie,
- klimatyzatory kasetonowe,
- klimatyzatory kanałowe,
- klimatyzatory skrzynkowe (przypodłogowe – podsufitowe).

Klimatyzatory ściennie montuje się możliwie blisko sufitu w taki sposób, aby w przypadku chłodzenia przepustnice kierowały strumień powietrza w danym pomieszczeniu od poziomego do ukośnego w dół, a przy ogrzewaniu – bezpośrednio w dół. Klimatyzatory kasetonowe mogą być z nawiewem jednostronnym, dwustronnym, a nawet czterostronnym i przeznaczone są pod zabudowę w przestrzeni sufitów podwieszanych. Zasada działania polega na zasysaniu powietrza wewnętrznego przez ssawkę środkową, a po osiągnięciu określonych parametrów jest ono nawiewane z powrotem do danego pomieszczenia. Podobnie montowane są też klimatyzatory kanałowe, a powietrze dostarczane jest kanałami do kratki nawiewnych w ścianach albo w suficie. Natomiast klimatyzatory przypodłogowe – podsufitowe na pierwszy rzut oka przypominają nowoczesne grzejniki. Mocuje się je do sufitu bądź ustawia się je na podłodze, strychach, we wnękach pod oknami w takich lokalach jak: restauracje, dyskoteki oraz wszędzie tam, gdzie nie ma potrzeby chłodzenia górnych partii pomieszczenia o dużej wysokości (powyżej 3m) [6], [8].

Szczególnym rodzajem omawianych systemów split są układy multi – split złożone z kilku urządzeń wewnętrznych (przeważnie 2 – 4)

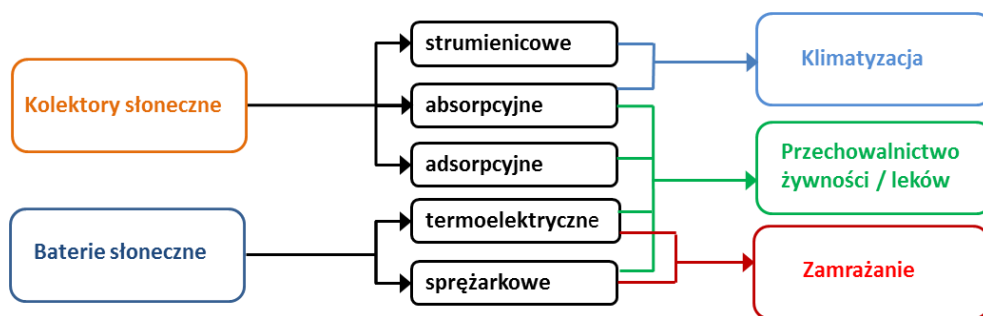
oraz jednej jednostki zewnętrznej. Zaawansowane systemy multi – split pozwalają na jednoczesne chłodzenie i grzanie różnych pomieszczeń. Ciepło ze stref chłodzonych transportowane jest do obszarów, które potrzebują ogrzania [8].

7. Słoneczne systemy klimatyzacyjne

Już od dłuższego czasu zwraca się uwagę na zmniejszenie zużycia energii cieplnej i chłodniczej poprzez stosowanie pomp ciepła, różnych rozwiązań odzysku ciepła, a także przez wykorzystywanie energii z odnawialnych źródeł, tj. energii promieniowania słonecznego (kolektory słoneczne) oraz energii pozyskiwanej z gruntu (wymnienniki gruntowe) [10].

W przetwarzaniu energii promieniowania słonecznego dla potrzeb chłodzenia (Rysunek 2) zachodzą dwa podstawowe procesy – konwersja fototermiczna i konwersja fotowoltaiczna. Konwersję fototermiczną można przeprowadzić w następujących układach, w zależności od sposobu uzyskania efektu chłodzenia [2]:

- układy termomechaniczne – efekt chłodzenia uzyskiwany jest przy wykorzystaniu energii mechanicznej do napędu urządzeń;
- układy otwarte – w wyniku zmiany wilgotności powietrza (np. urządzenia z osuszaczem sorpcyjnym);
- układy zamknięte – na drodze przemian termochemicznych zachodzących w urządzeniach absorpcyjnych bądź adsorpcyjnych oraz w wyniku wykorzystania promieniowania radiacyjnego w czasie nocy.



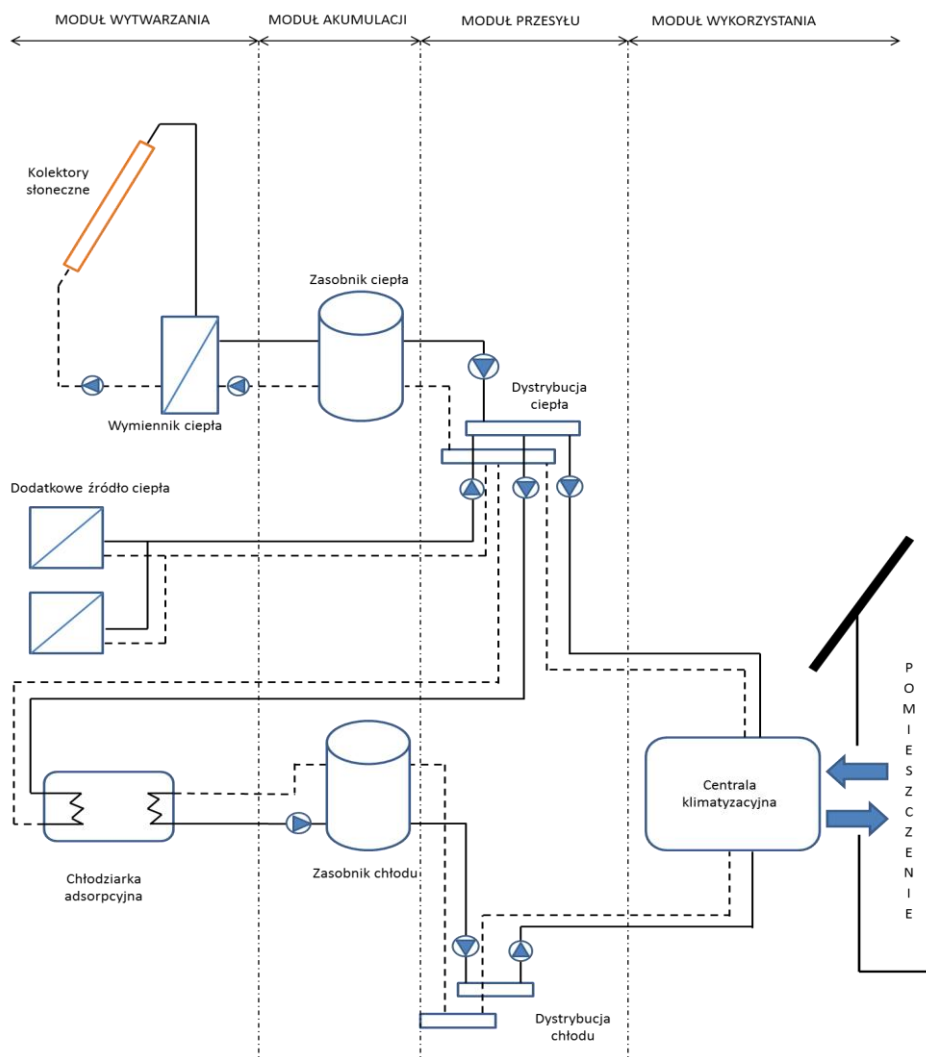
Rysunek 2. Podział systemów chłodniczych

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [11]

Natomiast konwersja fotowoltaiczna polega na bezpośredniej przemianie promieniowania słonecznego w energię elektryczną (ogniwa fotowoltaiczne), którą można wykorzystać do napędu urządzeń elektrycznych w centralach klimatyzacyjnych. Należy zaznaczyć, że z uwagi na niską sprawność ogniw fotowoltaicznych oraz duży koszt inwestycji, bardziej efektywne jest stosowanie konwersji fototermicznej, a do jej realizacji można zastosować ogólnodostępne kolektory słoneczne [2].

8. Słoneczny adsorpcyjny układ klimatyzacyjny

Słoneczny adsorpcyjny układ klimatyzacyjny (Rysunek 3) składa się z czterech modułów: wytwarzania (kolektory słoneczne, dodatkowe źródło ciepła i chłodziarka adsorpcyjna), akumulacji (zasobniki ciepła i chłodu), przesyłu oraz wykorzystania. Moduł wytwarzania odpowiada za sprawność wytwarzania ciepła i chłodu, a wielkościami charakterystycznymi dla modułu akumulacji są: sprawność przesyłu ciepła i chłodu. Moduły przesyłu i wykorzystania umożliwiają określenie oraz skonfigurowanie pod kątem możliwych do osiągnięcia w określonych warunkach mocy chłodniczych. Poniżej przedstawiono schemat oraz zasadę działania omawianego układu [2].



Rysunek 3. Schemat solarnego adsorpcyjnego układu klimatyzacyjnego

Źródło: [2]

Kolektory słoneczne absorbują energię promieniowania słonecznego, a za pośrednictwem przepływającego przez nie nośnika ciepła, jest ona transportowana do zasobnika. Uzyskane w ten sposób ciepło służy do napędu termochemicznego chłodziarki adsorpcyjnej pracującej w układzie zamkniętym. W przypadku układów

kombinowanych ciepło zgromadzone w zasobniku można wykorzystać do podgrzewu c.w.u., procesu technologicznego, a w czasie zimy – do ogrzewania budynku. Najczęściej w systemach tych stosuje się kolektory cieczowe płaskie, rurowo – próżniowe, a także próżniowe z reflektorem CPC. Dodatkowe źródło ciepła wspomaga kolektory słoneczne w okresach obniżonych wartości promieniowania słonecznego, aby zabezpieczyć cały układ pod względem ciągłości jego funkcjonowania [2].

Pojedynczy kolektory płaski składa się z następujących elementów [12]:

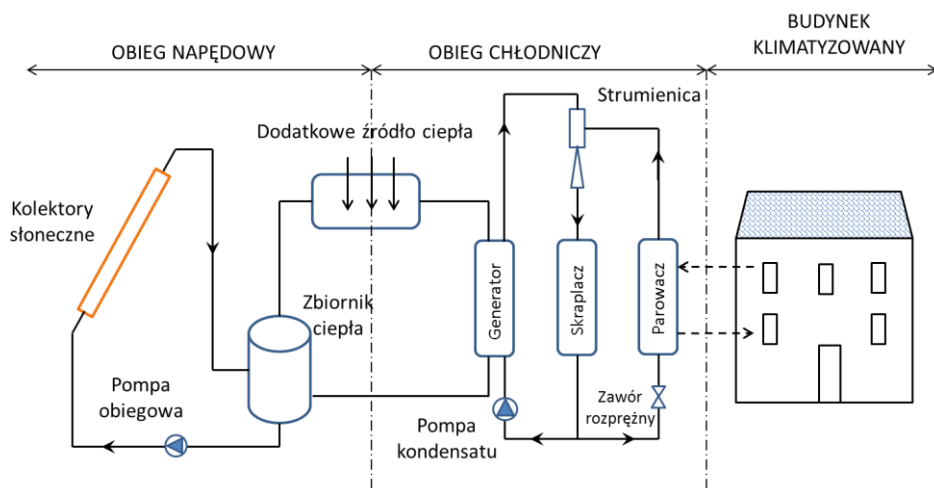
- rurek przepływowych występujących w różnych konfiguracjach przepływu czynnika roboczego przez absorber (np. szeregowo-równoległe, szeregowo);
- absorbera wykonanego z cienkiej blachy, stali, aluminium lub taśmy miedzianej, do której przytwierdzone są rurki przepływowe, absorber pokrywa się powłoką selektywną (np. z czarnego niklu, czarnej miedzi) w celu zwiększenia jego zdolności pochłaniających;
- izolowanej obudowy wykonanej najczęściej ze spawanych elementów aluminiowych bądź z blach duraluminiowych uformowanych w odpowiedni sposób;
- szyby solarnej obniżonej zawartości żelaza lub pokrycia z tworzywa sztucznego – w przypadku szyby solarnej dodatkowo, jej wewnętrzna strona, pokryta jest powłoką antyrefleksyjną lub stosuje się strukturę pryzmatyczną.

Natomiast kolektory próżniowe rurowe złożone są z rur ze szkła borowo – krzemowego. Rury te mają podwójne ścianki, a ich końce stopione są na wzór bańki termosu. Na zewnętrznej powierzchni

wewnętrznej ścianki rury szklanej znajduje się warstwa absorbera, natomiast do wewnętrznej powierzchni rury przylega uformowana, cienka (miedziana albo aluminiowa) blacha, która przewodzi ciepło. Próżna występująca w przestrzeni między ściankami pojedynczej rury odgrywa rolę izolacji cieplnej [12].

9. Słoneczny system klimatyzacji strumienicowej

Słoneczny, strumienicowy system klimatyzacji (Rysunek 4) składa się z trzech obiegów: napędowego (kolektory słoneczne, zbiornik ciepła, pompa obiegowa czynnika), chłodniczego (strumienica, skraplacz, parowacz, generator, pompa kondensatu, zawór rozprężny) oraz rozprowadzenia „chłodu”. Doprowadzone do obiegu chłodniczego ciepło służy do wytworzenia pary napędowej wysokociśnieniowej. Dalej jest ona kierowana do strumienicy, gdzie wskutek przepływu przez dyszę obserwujemy spadek ciśnienia pary i wzrost jej prędkości powyżej prędkości dźwięku. W komorze ssawnej następuje redukcja ciśnienia, co prowadzi do zassania pary wtórnej z parowacza. Zachodzi wymieszanie obu strumieni na drodze wymiany pędu i zostają sprężone do ciśnienia skraplania. Zmieszany strumień dochodzi do skraplacza, za którym następuje podział czynnika w postaci cieczy na dwie porcje. Jedna z nich jest kierowana przez zawór dławiący do parowacza, a druga, za pomocą pompki kondensatu, do generatora, by znów wytworzyć parę napędową. W parowaczu ciecz czynnika pod niskim ciśnieniem odbiera ciepło od klimatyzowanego budynku [11].



Rysunek 4. Schemat słonecznego systemu klimatyzacji strumienicowej

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [11]

W solarnych systemach klimatyzacji strumienicowej można wykorzystywać kolektory próżniowe oraz płaskie. Niekiedy w tych układach również montuje się dodatkowe źródło ciepła, np. palnik gazowy, do przegrzania pary na dopływie do dyszy. Należy jednak wspomnieć, że wadą omawianego systemu chłodniczego jest niski współczynnik efektywności chłodniczej COP [11].

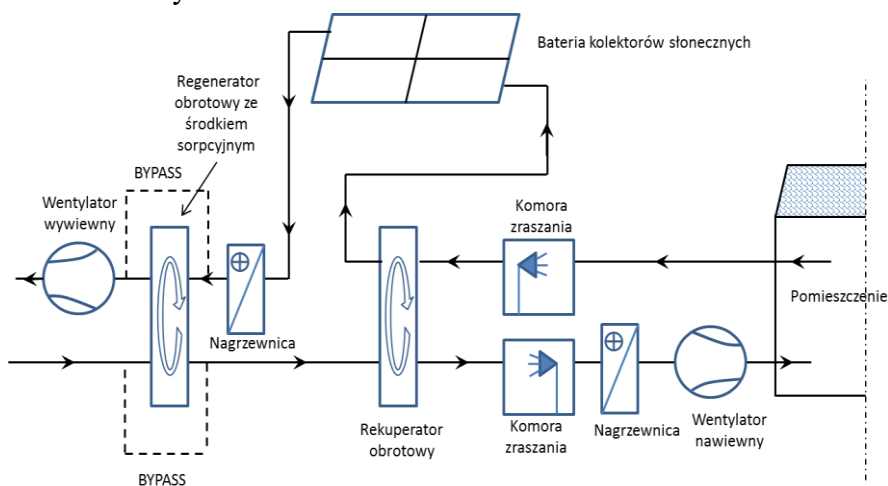
10. Słoneczny system klimatyzacji z osuszaniem sorpcyjnym

Zasada działania klimatyzacji z osuszaniem sorpcyjnym opiera się na osuszaniu sorpcyjnym i chłodzeniu adiabatycznym powietrza klimatyzacyjnego. Osuszanie sorpcyjne polega na usuwaniu wody z powietrza na drodze pochłaniania. Element suszący stanowi rotor, powleczone krzemem metalicznym o właściwościach silnie higroskopijnych, który chłonie wilgoć z powietrza. Środek sorpcyjny (np. silikażel), znajdujący się w osuszaczu, z jednej strony jest omywany przez powietrze zewnętrzne, które ulega osuszeniu oraz ogrzaniu,

natomiast z drugiej strony przez powietrze gorące regenerujące sorbent. Do regeneracji środka sorpcyjnego doskonale nadaje się energia słoneczna pozyskiwana przez kolektory słoneczne w czasie lata [10, 13].

Podstawowymi elementami omawianego systemu są [10]:

- regenerator obrotowy,
- rekuperator obrotowy,
- komora zraszania w kanale nawiewnym,
- komora zraszania w kanale wywiewnym,
- nagrzewnica w kanale nawiewnym,
- nagrzewnica w kanale wywiewnym,
- wentylator nawiewny,
- wentylator wywiewny,
- kolektory słoneczne.



Rysunek 5. Schemat słonecznego systemu klimatyzacji z osuszaniem sorpcyjnym

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [10]

Powietrze zewnętrzne doprowadzane jest do regeneratora obrotowego (Rysunek 5), gdzie wilgoć zaadsorbowana zostaje przez sorbent, a powietrze – podgrzane i osuszone. W rekuperatorze obrotowym

następuje wstępne ochłodzenie powietrze klimatyzacyjnego wskutek wymiany ciepła pomiędzy jeszcze gorącym powietrzem klimatyzacyjnym a chłodniejszym powietrzem wywiewnym (usuwanym z pomieszczenia). To wstępnie ochłodzone powietrze, przechodząc przez nagrzewnicę (nieczynną w okresie letnim), dochodzi do komory zraszania, w której jest adiabatycznie ochłodzone i nawilżone do stanu powietrza nawiewnego. Z kolei powietrze wywiewane z pomieszczenia można wykorzystać do regeneracji środka sorpcyjnego. Trafia ono do komory zraszania, w której ulega ochłodzeniu i nawilżeniu adiabatycznemu do stanu bliskiemu nasycenia. Dalej, powietrze usuwane (regeneracyjne) przechodzi przez rekuperator obrotowy, gdzie pobiera ciepło z powietrza klimatyzacyjnego oraz zostaje podgrzane do temperatury przekraczającej 40°C. Jednak do regeneracji osuszacza jest zazwyczaj potrzebna wyższa temperatura, tj. od 70°C (niekiedy od 50°C) do ok. 140°C, w zależności od jego konstrukcji oraz strumienia powietrza regeneracyjnego. Do osiągnięcia tej temperatury wykorzystuje się kolektory słoneczne i/lub nagrzewnicę konwencjonalną – zależy to od stopnia nasłonecznienia. Po zaabsorbowaniu wilgoci w osuszaczu powietrze zostaje usunięte do atmosfery [10].

Należy również wspomnieć o systemie klimatyzacyjnym współpracującym z kolektorami hybrydowymi, tj. powietrzno-cieczowymi. Jest to rozwiązanie bardziej rozbudowane, w którym dodatkowo występuje układ podgrzewu c.w.u. oraz przepustnice sprzężone. Latem, energię słoneczną wykorzystuje się do regeneracji osuszacza (w godzinach pracy, kiedy pomieszczenia są klimatyzowane) oraz na potrzeby c.w.u. (w czasie dni wolnych od pracy, kiedy pomieszczenia nie muszą być chłodzone). Zimą energię słoneczną

można pozyskiwać na cele grzewczo-wentylacyjne [10].

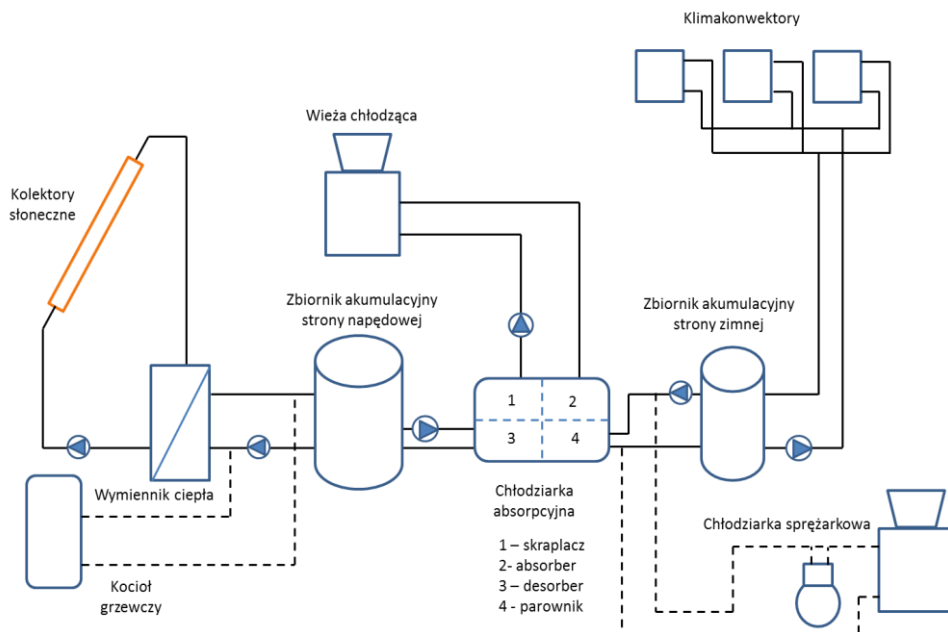
11. Słoneczny system klimatyzacyjny z absorpcyjnym urządzeniem chłodniczym

Energia promieniowania słonecznego może być również wykorzystywana w absorpcyjnych urządzeniach chłodniczych. Agregaty absorpcyjne mogą być zasilane gorącą wodą, parą lub gazem. Najczęściej stosuje się chłodziarki bromolitowe ($\text{LiBr}/\text{H}_2\text{O}$) oraz chłodziarki amoniakalne ($\text{H}_2\text{O}/\text{NH}_3$) [14, 15].

W agregacie absorpcyjnym pracują dwie ciecze – jedna będąca czynnikiem roboczym, która całą swoją objętością pochłania drugą, tj. czynnik chłodniczy. W chłodziarkach bromolitowych płynem roboczym (absorbentem) jest roztwór bromku litu – soli charakteryzującej się silnymi właściwościami higroskopijnymi, która wchłania parujący czynnik chłodniczy (wodę) z parownika. Następnie roztwór dwóch czynników (chłodniczego i roboczego) tłoczony jest do desorbera, gdzie następuje odparowanie czynnika chłodniczego ze stężonego roztworu LiBr pod wpływem dostarczonej energii cieplnej (np. gorącej wody). Czynnik chłodniczy w postaci pary trafia do skraplacza, gdzie ulega skropleniu (przy wysokim ciśnieniu oraz przy wyższej temperaturze) i płynie dalej do parownika w postaci wody chłodzącej. W parowniku zachodzi proces wrzenia (przy niskim ciśnieniu i w niskiej temperaturze) i odparowanie wody. Z kolei stężony roztwór czynnika roboczego wraca do absorbera. Przejście z ciśnienia skraplania na ciśnienie parowania następuje poprzez dławienie na zaworze rozprężnym [15, 16].

W celu zwiększenia mocy chłodniczej słonecznych układów klimatyzacyjnych wykorzystujących urządzenia absorpcyjne

oraz wydłużenia czasu chłodzenia w ciągu dnia należy dodatkowo zastosować zbiorniki akumulacyjne oraz wieże chłodnicze [14].



Rysunek 6. Schemat słonecznego systemu klimatyzacji z absorpcyjnym agregatem chłodniczym

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [17]

Powyższy schemat (Rysunek 6) przedstawia układ klimatyzacji z absorpcyjnym agregatem chłodniczym zasilany energią słoneczną. Serce całego systemu stanowi chłodziarka absorpcyjna LiBr, która połączona jest z instalacją strony napędowej, instalacją strony chłodzenia pomieszczeń oraz z wieżą wentylatorowo-wyparną. Po stronie napędowej znajduje się zbiornik akumulacyjny, który wyrównuje chwilowe wahania temperatury cieczy otrzymywanej z kolektorów słonecznych. Akumulacja zapewnia zapas energii napędowej zaledwie na kilka godzin. Po stronie chłodzenia również występuje zbiornik akumulacyjny, zazwyczaj o mniejszej objętości. Po stronie zimnej agregatu absorpcyjnego przeciętna wartość temperatury wynosi ok. 7-10°C. Woda chłodząca

doprowadzana jest instalacjami dwururowymi (bądź czterururowymi) do poszczególnych pomieszczeń w budynku. Wyparne chłodzenie wieży zrzutowej ciepła umożliwi maksymalnie obniżyć temperaturę skraplania do wartości mieszczącej się w zakresie 23-30°C. Omawianą technologię stosuje się, kiedy temperatury otoczenia przekraczają 35°C. Z uwagi na niewielkie zdolności systemów solarnych do długoterminowej akumulacji ciepła, wyposaża się je w dodatkowe systemy napędowe, np. kotły grzewcze, które w przypadku zbytniego zachmurzenia latem stanowią rezerwę ciepła, a podczas zimy wykorzystywane są do ogrzewania budynku. Z kolei po stronie zbiornika akumulacyjnego zimnej wody chłodzącej dodatkowo montuje się chłodnicze instalacje sprężarkowe [17].

12. Podsumowanie

Na polski rynku mam szeroki wybór urządzeń i systemów klimatyzacyjnych, w zależności od indywidualnych potrzeb, zaczynając od tych najprostszych (instalacje klimatyzacyjne z urządzeniami centralnymi z jednostopniowym uzdatnianiem powietrza bądź układy z klimatyzatorami monoblokowymi), a kończą na zaawansowanych i rozbudowanych technologiach (np. układy z centralami klimatyzacyjnymi czy systemy klimatyzacyjne VRF).

Stosowanie słonecznych systemów klimatyzacji pozwala na zmniejszenie udziału konwencjonalnych źródeł energii w pokryciu zapotrzebowania budynków na chłód. Do wyboru mamy wiele ciekawych rozwiązań, jednak decydując się na taki rodzaj klimatyzacji, musimy przeanalizować budynek pod względem energetycznym. Ze względu na to, że ilość energii słonecznej nie utrzymuje się na stałym poziomie

(zależy od warunków pogodowych, np. zachmurzenia), należy stosować dodatkowe, konwencjonalne źródła ciepła, np. kotły grzewcze. Nie zmienia to jednak faktu, że wykorzystywanie energii słonecznej w solarnych systemach klimatyzacyjne ma duży potencjał, gdyż największe zapotrzebowanie na chłód występuje w czasie letnim, kiedy promieniowanie słoneczne jest największe [4, 14].

Literatura:

1. Praca zbiorowa pod kierunkiem Mirosława Zawadzkiego: *Kolektory Słoneczne, Pompy Ciepła – Na Tak.*, Wydawnictwo ZAWADZKI Mirosław Zawadzki, Kobyłka, Polska Ekologia 2003.
2. Turski M., Sekret R.: *Systemy klimatyzacji budynków zasilane energią promieniowania słonecznego.*, czasopismo Budownictwo i Inżynieria Środowiska, Nr 1/2010, str. 79 – 83, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej.
3. <http://www.proekologia.pl>, [dostęp: 13.03.2016 r.].
4. Kurowski K.: *Słoneczna klimatyzacja.*, artykuł ze strony www.ogrzewnictwo.pl.
5. Ullrich H.: *Technika klimatyzacyjna. Poradnik.*, IPPU MASTA, Gdańsk 2001.
6. Pod redakcją Gazińskiego B.: *Technika klimatyzacyjna dla praktyków. Komfort cieplny, zasady obliczeń i urządzenia.*, Systherm Serwis, Poznań 2005.
7. Nantka M. B.: *Wentylacja z elementami klimatyzacji.*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
8. Sornek K.: *Rodzaje systemów klimatyzacji.*, czasopismo Kreator – Projekty, Nr 2/2012, str. 85 – 87.

9. <http://www.fulmark.waw.pl>, [dostęp: 13.03.2016 r.].
10. Kwiecień D.: *Wykorzystanie energii słonecznej w systemie klimatyzacji.*, materiały konferencyjne z X International Conference Air Conditioning Protection & District Heating 2002 Wrocław – Szklarska Poręba, 27 – 30 June 2002, str. 287 – 292.
11. Gil B.: *System klimatyzacji strumieniowej z napędem solarnym.*, czasopismo Logistyka, Nr 4/2013, str. 130 – 138.
12. Radzajewska P.: *Kolektory słoneczne jako elementy budowlano – architektoniczne.*, monografie: Inżynieria środowiska - młodym okiem, 2015, Tom 15, str. 258 – 282.
13. Poradnik Osuszacze firmy AERIAL.
14. Stefaniak J.: *Chłodziarka absorpcyjna w solarnych układach klimatyzacyjnych jako przykład nowoczesnej technologii dla zrównoważonego rozwoju*, Annual Set The Environment Protection/ Rocznik Ochrony Środowiska, Tom Nr 15, 2013, str. 1216 – 1227.
15. Danielak M.: *Alternatywne systemy chłodzenia i klimatyzacji - przewodnik.*, Grupa MEDIUM, Warszawa 2014.
16. Stefaniak J., Żelazna A., Pawłowski A.: *Aspekty środowiskowe zastosowania chłodziarki absorpcyjnej w układach klimatyzacyjnych.*, półrocznik Proceedings of ECOpole, Tom Nr 6, 2012, str. 395 – 400.
17. <http://www.chlodnictwoiklimatyzacja.pl>, [dostęp: 13.03.2016 r.].

mgr. inż. Ewa Piotrowska¹⁾, dr hab. inż. Maciej Zajkowski prof. nzw. PB²⁾

Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny

ul. Wiejska 45E, 15-351 Białystok

¹⁾e.piotrkowska@onet.pl, ²⁾m.zajkowski@pb.edu.pl

Modernizacja infrastruktury budynków a ich właściwości środowiskowe i energetyczne

Modernization of buildings infrastructure and their environmental and energy properties

Słowa kluczowe: *modernizacja, infrastruktura, światło dzienne, efektywność energetyczna*

Keywords: *modernization, infrastructure, daylight, energy efficiency*

Streszczenie: Dyrektywa Parlamentu i Rady Europy 2002/91/WE wymagana w krajach UE przygotowanie świadectw energetycznych dla budynków nowo wznoszonych, poddawanych renowacji, sprzedawanych, wynajmowanych. Natomiast ustawa z dnia 15 kwietnia 2011 r. nakłada szereg zadań na sektor publiczny w zakresie efektywności energetycznej, w tym ocenę efektów energetycznych i ekologicznych w postaci audytu energetycznego.

Budownictwo pochłania połowę wytwarzanej energii. Aby zmniejszyć zużycie jej i paliw kopalnych zwiększających zanieczyszczenie środowiska, potrzebna jest modernizacja budynków istniejących i budowa nowych o zmniejszonych parametrach na zapotrzebowanie energii. Czynnikiem redukującym udział nieodnawialnych źródeł energii w ogrzewaniu i na c.w.u jest wykorzystanie promieniowania słonecznego, jako dodatkowego źródła energii cieplnej, elektrycznej i świetlnej.

Artykuł ukazuje analizę energetyczno-ekologiczną, związaną z procesem termomodernizacji oraz udziałem światła dziennego w bilansie energetycznym. Wykonano analizę efektywności oświetlenia światłem dziennym oraz przedstawiono algorytm wyznaczania natężenia oświetlenia światłem dziennym i wyniki symulacji rozkładu części widzialnej promieniowania słonecznego w zależności od rodzaju niebosłonu. Pokazano wpływ termomodernizacji budynku na jego sprawność energetyczną. Ważnym aspektem modernizacji instalacji jest możliwość zmniejszenia emisji CO₂ i redukcja opłat za energię w zależności od zastosowanych środków,

służących zmniejszeniu energochłonności budynku. Oddziaływanie budownictwa konwencjonalnego na środowisko jest znaczące, jeśli chodzi o wpływ rodzaju, np. systemu centralnego ogrzewania na jakość powietrza, co jest kolejnym aspektem omówionym w publikacji.

1. Wstęp

W dzisiejszych czasach coraz bardziej restrykcyjnie spogląda się na aspekty energochłonności budynków. Na podstawie dyrektywy unijnej, w Polsce zaczęto wprowadzać przepisy mające na celu znaczne zmniejszenie zapotrzebowania na energię w budynkach. Wiąże się to zarówno z poprawą izolacyjności przegród budowlanych jak i ze zwiększeniem udziału energii odnawialnej do celów ogrzewania oraz wytwarzania elektryczności. Aby dostosować się do wymaganych norm, w nowych i podlegających sprzedaży budynkach, wymaga się sporządzenia świadectwa energetycznego. W tradycyjnych budynkach jest wymagane obliczenie zapotrzebowania na energię na cele centralnego ogrzewania, chłodzenia w razie występowania instalacji chłodniczej i na wyprodukowanie ciepłej wody użytkowej, wraz z energią pomocniczą potrzebną do urządzeń technicznych niezbędnych do działania konkretnej instalacji. Budynki użyteczności publicznej oraz zamieszkania zbiorowego, produkcyjne, gospodarcze i magazynowe muszą mieć dodatkowo policzoną energię na cele oświetleniowe. Zmniejszenie zapotrzebowania na energię na cele c.o i c.w.u wiąże się ze spadkiem emisji szkodliwych gazów powstających podczas spalania takich paliw jak np. węgiel czy olej opałowy. Obniżenie emisyjności budynków może być uzyskane dzięki wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii takich jak: panele słoneczne, ogniwa

fotowoltaiczne, pompy ciepła, kotły na biomasę itp. Wymaganiem ustawodawcy jest zapewnienie minimalnego zużycia energii, którego odzwierciedleniem jest wskaźnik energii pierwotnej EP [kWh/m²rok]. Nie powinien on wzrosnąć powyżej wymaganych wartości, określonych dla konkretnego rodzaju budynku. Normowany jest również współczynnik przenikania ciepła U [W/m²K], który odwzorowuje stan izolacji danego budynku. Na końcowy bilans energetyczny mają wpływ nie tylko straty ciepła, na podstawie których oblicza się zapotrzebowanie budynku na ciepło, ale również zyski energetyczne pochodzące od światła słonecznego, maszyn oraz te wynikające z bytowania ludzi. Światło słoneczne niesie ze sobą o wiele większą energię cieplną oraz strumień świetlny niż tradycyjne oświetlenie sztuczne, dlatego też dąży się do jego maksymalnego wykorzystania. Niniejszy artykuł ma na celu ukazanie wpływu energii promieniowania słonecznego w postaci światła na końcowe zapotrzebowanie na energię budynku. Wykazany zostanie również wpływ działań modernizacyjnych na efektywność energetyczną oraz środowiskową modelowego pomieszczenia, znajdującego się w budynku szkolnym, który usytuowany jest w Białymstoku.

2. Schemat obliczeniowy wyznaczania energetyczności budynków

Wyznaczenie końcowych wskaźników zapotrzebowania na energię wiąże się z wyliczaniem strat ciepła przez ściany i wentylację. Na tej podstawie obliczana jest ilość energii potrzebnej do ogrzania budynku lub jego chłodzenia. Uwzględnia się też ilość energii potrzebnej na podgrzanie wody oraz energii elektrycznej, którą pochłona urządzenia techniczne potrzebne do sprawnego działania danego systemu. Ważnym elementem jest sprawność wytworzenia ciepła jak i jego późniejszego

wykorzystania. Brana pod uwagę jest też energia potrzebna na cele oświetleniowe, której obliczenie jest wymagane w budynkach użyteczności publicznej. Głównymi wskaźnikami, które ukazują charakterystykę energetyczną budynku są [1]:

- **EP - wskaźnik energii pierwotnej** - określa się nim roczne zapotrzebowanie budynku na nieodnawialną energię pierwotną przypadającą na 1m^2 powierzchni pomieszczeń o regulowanej temperaturze (chłodzonych lub ogrzewanych). Wyznacza się ją wg. wzoru:

$$EP = Q_p / A_f \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{rok}} \right] \quad (1)$$

$$Q_p = Q_{p,H} + Q_{p,W} + Q_{p,C} + Q_{p,L} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \right] \quad (2)$$

gdzie:

Q_p - roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną do: ogrzewania (wraz z wentylacją) (**$Q_{p,H}$**) i chłodzenia pomieszczeń (**$Q_{p,C}$**), na cele c.w.u. (**$Q_{p,W}$**) z uwzględnieniem energii elektrycznej potrzebnej na działanie systemów technicznych, które są związane z tymi potrzebami. W budynkach użyteczności publicznej określa się również energię na cele oświetleniowe (**$Q_{p,L}$**).

A_f - powierzchnia pomieszczeń o regulowanej temperaturze.

$$Q_{p,H} = w_H * Q_{K,H} + w_{el} * E_{el,pom,H} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \right] \quad (3)$$

gdzie:

$Q_{K,H}$ - roczne zapotrzebowanie energii końcowej przez system grzewczy i wentylacyjny [kWh/rok],

$E_{el,pom,H}$ - roczne zapotrzebowanie energii końcowej elektrycznej do napędu urządzeń pomocniczych [kWh/rok],

w_H - współczynnik nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie energii (zależny od rodzaju paliwa),

w_{el} - współczynnik korekcyjny dla nośnika energii elektrycznej.

- **EU - wskaźnik energii użytkowej**- określa energię niezbędną do różnych potrzeb związanych z użytkowaniem budynku, jest to bilans miesięcznych zysków i strat ciepła na cele ogrzewania, chłodzenia budynku oraz c.w.u wyznaczają się ją wg. wzoru (ogrzewanie budynku):

$$EU = Q_u / A_f \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{rok}} \right] \quad (4)$$

$$Q_u = Q_{H,nd} + Q_{W,nd} + Q_{C,nd} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \right] \quad (5)$$

$$Q_{H,nd} = \sum_i (Q_{ht,i} - \eta_{H,i} \cdot Q_{gn,i}) \left[\frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \right] \quad (6)$$

gdzie:

$Q_{H,nd}$ - roczne zapotrzebowanie energii użytkowej przez system grzewczy i wentylacyjny [kWh/rok],

$\eta_{H,i}$ - bezwymiarowy współczynnik wykorzystania zysków ciepła w kolejnych miesiącach,

$Q_{ht,i}$ - straty ciepła w kolejnych miesiącach [kWh/miesiąc],

$Q_{gn,i}$ - zyski ciepła w kolejnych miesiącach [kWh/miesiąc].

- **EK - wskaźnik energii końcowej**- określa roczną energię na m^2 powierzchni, niezbędną do zapewnienia chłodzenia, ogrzewania, wentylacji oraz oświetlenia pomieszczeń, przygotowania ciepłej wody użytkowej wraz z uwzględnieniem strat w systemach technicznych. Obliczana wg. wzoru:

$$EK = Q_k / A_f \left[\frac{\text{kWh}}{\text{m}^2 \text{rok}} \right] \quad (7)$$

$$Q_k = Q_{k,H} + Q_{k,W} + Q_{k,C} + Q_{k,L} + E_{el,pom} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \right] \quad (8)$$

$$Q_{k,H} = Q_{H,nd} / \eta_{H,tot} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \right] \quad (9)$$

gdzie:

$Q_{k,H}$ - roczne zapotrzebowanie na energię końcową na potrzeby ogrzewania i wentylacji,

$\eta_{H,tot}$ - średnia sezonowa sprawność całkowita systemu grzewczego budynku (od wytwarzania ciepła do przekazania w pomieszczeniu).

$$\eta_{H,tot} = \eta_{H,g} * \eta_{H,s} * \eta_{H,d} * \eta_{H,e} \quad (10)$$

gdzie:

$\eta_{H,g}$ - średnia sezonowa sprawność wytworzenia nośnika ciepła z energii dostarczanej do granic budynku (energii końcowej). Wartość ta zależy od rodzaju źródła ciepła (kotła, pompy lub innych ogrzewaczy). Mieści się ona zazwyczaj w przedziale $\{0,5-1,0\}$,

$\eta_{H,s}$ - średnia sezonowa sprawność akumulacji ciepła w elementach pojemnościowych systemu grzewczego budynku. Wartość ta przyjmowana jest w zależności od obecności oraz rodzaju zainstalowanego buforu. Wartości te mieszczą się w przedziale $\{0,91-1,00\}$,

$\eta_{H,d}$ - średnia sezonowa sprawność transportu nośnika ciepła w obrębie budynku,

$\eta_{H,e}$ - średnia sezonowa sprawność regulacji i wykorzystania ciepła w budynku.

Zapotrzebowanie energii na oświetlenie ocenianego budynku użyteczności publicznej wylicza się wg. zależności:

$$Q_{pL} = w_{el} * E_{kl} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \right] \quad (11)$$

gdzie:

w_{el} - współczynnik korekcyjny dla nośnika energii elektrycznej

E_{kl} - sumaryczne roczne zapotrzebowanie energii na oświetlenie budynku [kWh/rok]:

$$E_{kL} = E_{Lj} * A_f \left[\frac{\text{kWh}}{\text{rok}} \right] \quad (12)$$

gdzie:

A_f - pole powierzchni poszczególnych pomieszczeń rozpatrywanego budynku [m²].

E_{Lj} - roczne jednostkowe zapotrzebowanie energii dla każdego pomieszczenia danego budynku [kWh/m²rok], według PN-EN 15193:2010 jest wskaźnikiem LENI.

$$E_{Lj} = \left\{ F_c * \frac{P_j}{1000} * [(t_D * F_O * F_D) + (t_N * F_O)] \right\} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{rok} * \text{m}^2} \right] \quad (13)$$

gdzie:

F_c - współczynnik uwzględniający obniżenie natężenia oświetlenia do wymaganego poziomu,

F_O - współczynnik uwzględniający nieobecność użytkowników w miejscu pracy,

F_D - współczynnik uwzględniający wykorzystanie dziennego światła,

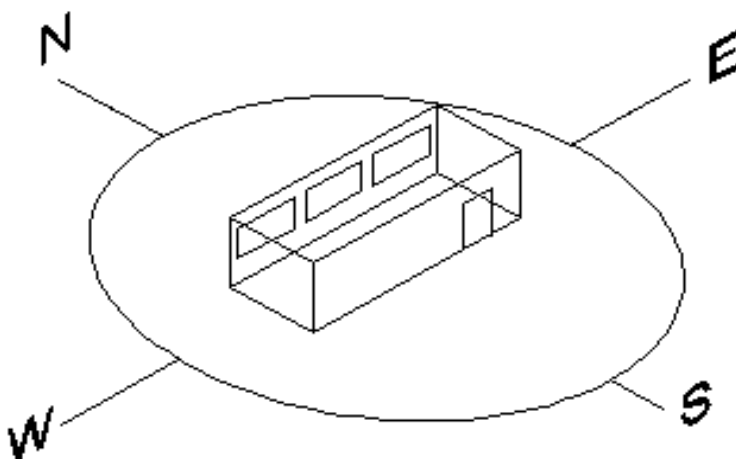
P_j - moc jednostkowa opraw oświetlenia podstawowego [W/m²],

t_D - czas użytkowania oświetlenia w ciągu dnia [h/r],

t_N - czas użytkowania oświetlenia w ciągu nocy [h/r].

Do obliczeń przyjęto modelowe pomieszczenie w postaci sali lekcyjnej, znajdującą się w budynku jednej ze szkół w Białymstoku. Sala lekcyjna ma styczność ze środowiskiem zewnętrznym przez jedną ścianę

zewnątrzną i 3 okna o wymiarach 4x2m. Pomieszczenie to ma wymiary: 15m x 6m x 4,5m. Obliczenia wskaźników energochłonności (*EP*, *EU*, *EK*) wykonano dla czterech konfiguracji położenia budynku (sali) względem stron świata: S, N, W i E (Rysunek 1). Dla ukazania zmienności wymaganej energii wykonano jedynie obliczenia dla jej zapotrzebowania na cele ogrzewania i cele oświetleniowe z pominięciem energii pomocniczej. Ukazano wpływ światła słonecznego na bilans cieplny budynku (pomieszczenia) oraz wyniki symulacji natężenia oświetlenia dla poszczególnych miesięcy, przy usytuowaniu względem stron świata takich jak przy bilansie cieplnym budynku. Wykazano możliwości wykonania modernizacji budynku pod względem zmniejszenia jego energochłonności i emisyjności stosując nieodnawialne źródła energii oraz odpowiednie zwiększenie izolacji.



Rysunek 1. Analizowane pomieszczenie

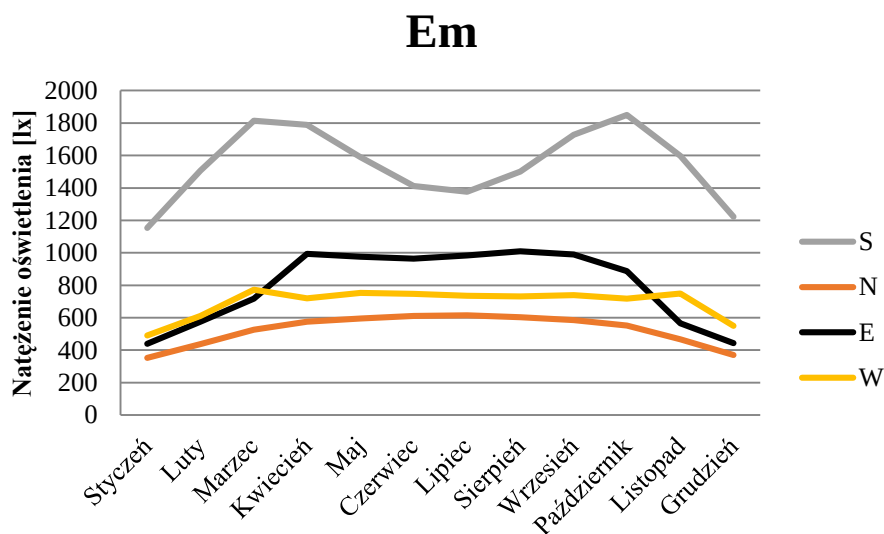
Źródło: Opracowanie własne

3. Wpływ promieniowania słonecznego na bilans energetyczny budynku

Teoretyczny potencjał promieniowania słonecznego w Polsce jest szacowany na ok. 1000 kWh/m²rok. Średnio 80% tej energii przypada na połowę roku od kwietnia do września [2]. Obecnie coraz większym wymaganiom z zakresu energochłonności budynku, towarzyszy wzrost wykorzystania źródeł odnawialnych, szczególnie urządzeń służących do przetwarzania energii słonecznej. Przykładem są tu systemy solarne, które w zależności od celu mogą zamieniać promieniowanie słoneczne w ciepło (kolektory słoneczne i koncentratory), bądź w energię elektryczną (panele fotowoltaiczne). Oprócz pozyskiwania energii słońca za pomocą specjalnych urządzeń, można też wykorzystać ją w czystej, niezmienionej postaci, ustawiając odpowiednio budynek względem stron świata i zwiększając udział powierzchni oszklonej w przegrodach ścian zewnętrznych. Uzyskuje się w ten sposób wzrost zysków ciepła od słońca oraz większy udział energii słonecznej w oświetlaniu pomieszczeń. Może to korzystnie wpłynąć na końcowy bilans energetyczny budynku, dzięki zmniejszeniu zapotrzebowania na energię cieplną uzyskiwaną zazwyczaj z ciepłowni bądź źródła usytuowanego w danym budynku, uzyskującego ciepło przy pomocy tradycyjnych paliw typu węgiel, gaz czy olej opałowy. Spadek pobieranej energii można również uzyskać przez optymalne wykorzystanie światła słonecznego na cele oświetleniowe np. poprzez regulację natężenia światła, czy automatyczne sterowanie oświetleniem w zależności od ilości światła słonecznego docierającego do danego pomieszczenia.

Na natężenie promieniowania słonecznego i jego ilość docierającą do budynku ma wpływ wiele czynników, m.in. zacienienie budynku,

rodzaj oszklenia, pochylenie okna, położenie względem stron świata, lokalizacja, pora roku a także pora dnia. Przy projektowaniu oświetlenia w danym pomieszczeniu trzeba uwzględniać wszystkie te czynniki. Wielkość średniego natężenia od promieniowania słonecznego w zależności od położenia budynku względem stron świata dla poszczególnych miesięcy pokazuje rysunek 2. Obliczenia wykonano w programie DIALux, gdzie uwzględnione zostały m. in: kąt horyzontalny i azymutalny słońca, luminancja słońca w punkcie dla 12 modelu niebosłonu wg. CIE, które charakteryzuje się standardową przezroczystością i niskim zmętnieniem.



Rysunek 2. Średnie natężenie promieniowania słonecznego w ciągu roku

Źródło: Opracowanie własne

Jak widać, średnie natężenia oświetlenia na powierzchni roboczej pomieszczenia jest największe dla położenia południowego (marzec-kwiecień, wrzesień-październik). Dla poszczególnych położen budynku względem stron świata występują znaczne różnice pomiędzy wartością

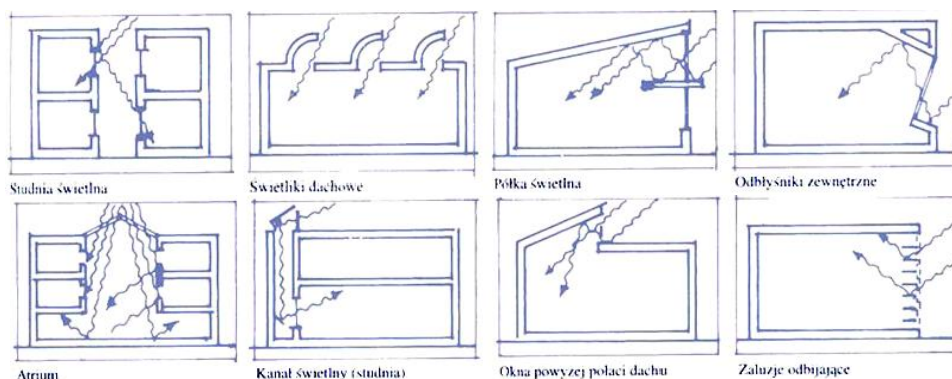
minimalną, a maksymalną natężenia oświetlenia. Największe wahania obserwuje się dla orientacji południowej, gdzie ta różnica wynosi prawie 4000 lx w miesiącu maju. W pozostałych przypadkach wartości te kolejno maleją dla położenia wschodniego, zachodniego i północnego. Ciekawym jest fakt że dla orientacji S, N i E różnice te są największe dla miesięcy od maja do września, natomiast dla położenia W są w całym roku niemal równomiernie rozłożone, co w tej orientacji wskazuje na nikłą zależność natężenia oświetlenia od pory roku.

Według normy PN-EN 12464-1:2012, średnie eksploatacyjne natężenie oświetlenia w salach lekcyjnych wymagane jest na poziomie 300 lx. Jak widać na powyższym wykresie (rys. 2), średnie natężenie przy udziale nieba przejrzystego, dla każdego miesiąca jest powyżej tej granicy. Trzeba jednak zwrócić uwagę na fakt, że oświetlenie pomieszczenia światłem dziennym zmienia się ciągle w ciągu dnia. W miesiącach letnich dni są najdłuższe i występuje największe promieniowanie słoneczne. Najefektywniej wtedy działać mogą kolektory słoneczne produkujące prąd, czy energię elektryczną. Również zużywana jest mniejsza ilość energii zasilająca oświetlenie sztuczne. Miesiące zimniejsze charakteryzują się coraz krótszym dniem, a dłuższymi nocami, a do ziemi dociera mniej promieniowania słonecznego. Skrócenie dnia powoduje konieczność większego zużycia energii do oświetlenia pomieszczeń, zmniejszeniu ulega również ilość energii cieplnej promieniowania słonecznego padającego na absorbery, co zmniejsza sprawność kolektorów słonecznych. Spada też ilość ciepła w pomieszczeniu uzyskiwana dzięki promieniowaniu słonecznemu wpadającemu przez przezroczyste przegrody.

Zwiększenie powierzchni oszklenia, zwiększa oświetlenie pomieszczenia, natomiast zmniejsza jego izolacyjność. Rozwiązaniem, które by zwiększyły udział światła dziennego w pomieszczeniu, przy mniejszej powierzchni przezroczystej mogą być [3]:

- tzw. świetliki - umieszcza się je na dachu budynku- światło wpada przez szklaną przegrodę i ulega wielokrotnemu odbiciu w specjalnej rurze, na której końcu zostaje rozproszone i oświetla dane pomieszczenie (Rys. 3),
- ekrany przysłaniająco - odbijające – ograniczają one bezpośrednie padanie dużej ilości światła w przy okiennej strefie i kierują część światła w głąb pomieszczenia (żaluzje odbijające, odbłyśniki zewnętrzne, przysłony pryzmatyczne, szkło z warstwami optycznymi (Rys. 3),
- użycie kanałów (studni lub kanałów świetlnych), naświetlaczy rurowych (światłowody rurowe) lub podsufitowych przewodnic świetlnych (Rys. 3).

Metody te, dzięki skupieniu światła i jego odbiciu w kierunku pożądanego miejsca oświetlenia, powodują, że nie trzeba specjalnie powiększać okien aby wpadała większa ilość promieniowania słonecznego. Niweluje się zatem rozmiar powierzchni szklanej, co wpływa na ograniczenie strat ciepła.



Rysunek 3. Konstrukcyjne sposoby oświetlenia wnętr światłem dziennym

Źródło: [3]

Udział strumienia świetlnego wywołanego promieniowaniem słonecznym w bilansie oświetleniowym zależy nie tylko od lokalizacji budynku itp., ale również od natężenia oświetlenia wymaganego w pomieszczeniu, które zależy od rodzaju wykonywanej pracy (według PN-EN 12464-1). Przykładowo wymagane natężenie oświetlenia w salach zajęć artystycznych wynosi 500 lx, natomiast w zwykłych salach lekcyjnych, halach sportowych czy pokojach do zajęć komputerowych jest na poziomie 300 lx. Uwzględniając te parametry oraz orientację budynku, można tak dostosować warunki oświetlenia światłem sztucznym i wykorzystać światło dzienne, aby zużyć jak najmniej energii elektrycznej. Przykładowe wyniki wskaźników zapotrzebowania na energię końcową i pierwotną dla oświetlenia, obliczone w zależności od rodzaju sterowania (ręczne, automatyczne) dla modelowej sali lekcyjnej, zaprezentowano w tabeli 1.

Tabela 1. Zapotrzebowanie na energię oświetleniową

	Sterowanie ręczne	Automatyczne z uwzględnieniem światła dziennego
<i>E_{kl}</i> [kWh/rok]	1350	1106
<i>E_{pl}</i> [kWh/rok]	4050	3317
<i>EPI</i> [kWh/m²rok]	45	37

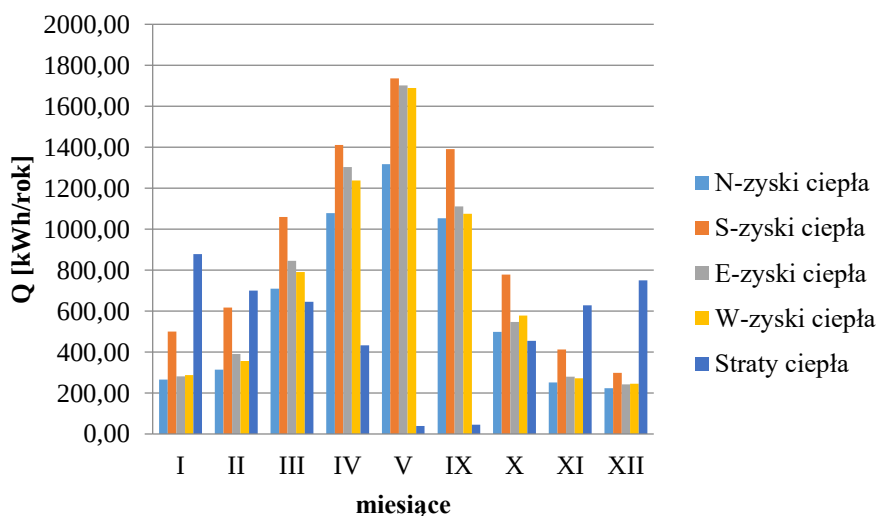
Źródło: Opracowanie własne

W badanym pomieszczeniu przyjęto normatywny czas działania oświetlania t_D (wzór 13) dla sal lekcyjnych o wartości 1800 h/rok, natomiast współczynnik wykorzystania światła F_d dla sterowania ręcznego wyniósł 1, a dla automatycznego 0,9, dzięki czemu uzyskano zmniejszenie danych wskaźników. Obniżenie współczynnika t_D , czyli czasu działania oświetlenia w ciągu dnia można otrzymać, wykorzystując wcześniej wspomniane świetliki dachowe, czy światłowody. Mogłyby być one stosowane nie tylko w salach lekcyjnych (w głębi pomieszczeń, gdzie dochodzi najmniej światła słonecznego), ale też tam gdzie zazwyczaj używane jest światło sztuczne np. łazienki i korytarze.

Na poniższym wykresie (rys. 4) zobrazowano zyski oraz straty ciepła przez okna w modelowym pomieszczeniu w zależności od położenia budynku względem stron świata. Wyraźnie widać, że straty ciepła przewyższają zyski w miesiącach najzimniejszych czyli styczniu, lutym, listopadzie i grudniu. Położenie pomieszczenia od strony południowej widocznie korzystnie wpływa na bilans cieplny budynku, szczególnie w miesiącach najzimniejszych: styczniu, lutym i listopadzie w porównaniu do pozostałych orientacji budynku. Najoptymalniejszymi położeniami budynku jest jego orientacja w kierunku południowym i wschodnim. Udział strat przez okna w stratach całkowitych

analizowanego pomieszczenia wynosi od 23,8 do 26,8%, w zależności od ustawienia względem stron świata.

Wydaje się, że aby zmniejszyć straty ciepła należałoby użyć grubszych szyb, jednakże tym sposobem zmniejsza się także ilość energii słonecznej oddającej ciepło do pomieszczenia. Takie rozwiązania mogłyby być stosowane np. dla okien od strony północnej lub tam, gdzie ilość tej energii jest zmniejszona ze względu na zacienienie budynku. Trzeba również zwrócić uwagę na fakt zbytniego nagrzewania pomieszczeń w miesiącach letnich, gdzie ilość energii słonecznej docierająca do Ziemi jest największa. Występuje wtedy od strony nasłonecznionej tzw. przegrzewanie pomieszczeń. Celem zmniejszenia tego efektu należy stosować urządzenia ochrony przeciwsłonecznej np. rolety, żaluzje, które dodatkowo w sezonie grzewczym, w godzinach nocnych stanowią dodatkową warstwę utrudniającą ucieczkę ciepła z pomieszczenia [4].



Rysunek 4. Zyski i straty ciepła przez okna

Źródło: Opracowanie własne

4. Modernizacja budynku a jego aspekty energetyczne

Do 2021 r. zużycie nieodnawialnej energii pierwotnej ma być zredukowane niemal dwukrotnie, w porównaniu z dzisiejszymi wymaganiami (tab. 2). Stopniowe zwiększanie wskaźników EP w kolejnych latach ma za zadanie płynne dostosowanie się budynków do nowoczesnych standardów energetycznych, których głównym celem jest promowanie i rozpowszechnienie nieodnawialnych źródeł energii.

Tabela 2. Częstkowe, maksymalne wartości wskaźnika EP

Lp.	Rodzaj budynku	Częstkowe maksymalne wartości wskaźnika EP_{H-W} na potrzeby ogrzewania, wentylacji oraz przygotowania ciepłej wody użytkowej [$kWh/(m^2 \cdot rok)$]		
		od 1 stycznia 2014 r.	od 1 stycznia 2017 r.	od 1 stycznia 2021 r. ^{*)}
1	2	3		
1	Budynek mieszkalny:			
	a) jednorodzinny	120	95	70
	b) wielorodzinny	105	85	65
2	Budynek zamieszkania zbiorowego	95	85	75
3	Budynek użyteczności publicznej:			
	a) opieki zdrowotnej	390	290	190
	b) pozostałe	65	60	45
4	Budynek gospodarczy, magazynowy i produkcyjny	110	90	70

^{*)} Od 1 stycznia 2019 r. – w przypadku budynków zajmowanych przez władze publiczne oraz będących ich własnością.

Źródło: [4]

Celem termomodernizacji budynku jest uzyskanie jak najlepszych parametrów energetycznych, czyli zmniejszenie jego zapotrzebowania na energię w postaci ciepła czy prądu. Poszczególne wskaźniki nakładu energii zmieniają się w zależności od rodzaju przeprowadzonych robót modernizacyjnych. Poprawa izolacyjności budynku wiąże się np. ze zwiększeniem warstw ocieplenia budynku, czy wymianą okien na te, o mniejszym współczynniku przenikania ciepła. Dzięki temu, redukcji ulegają wszystkie wskaźniki. Sprawność wytwarzania

i oddawania ciepła odwzorowuje wskaźnik EK , natomiast wskaźnik nieodnawialnej energii pierwotnej EP , jak sama nazwa wskazuje, przedstawia udział źródeł nieodnawialnych w jej produkcji. Jak ważne jest źródło energii w końcowym bilansie przedstawia tabela 3 i rysunek 5.

Tabela 3. Wartości współczynnika nakładu nieodnawialnej energii pierwotnej na wytworzenie i dostarczenie nośnika energii lub energii dla systemów technicznych w_i

Lp.	Sposób zasilania budynku lub części budynku w energię	Rodzaj nośnika energii lub energii	w_i
1	Miejscowe wytwarzanie energii w budynku	Olej opałowy	1,10
2		Gaz ziemny	
3		Gaz płynny	
4		Węgiel kamienny	
5		Węgiel brunatny	
6		Energia słoneczna	0,00
7		Energia wiatrowa	
8		Energia geotermalna	
9		Biomasa	
10		Biogaz	0,20
11	Ciepło sieciowe z kogeneracji	Węgiel kamienny lub gaz	0,50
12		Biomasa, biogaz	0,80
13	Ciepło sieciowe z ciepłowni	Węgiel kamienny	0,15
14		Gaz lub olej opałowy	1,30
15	Sieć elektroenergetyczna systemowa	Energia elektryczna	1,20
			3,00

Źródło: [1]

Obliczając wskaźnik EP mnożymy roczne zapotrzebowanie na energię końcową przez wskaźnik w_i (wzór 3). Końcowy bilans może wtedy wyjść nawet ujemny, gdy np. do ogrzewania, podgrzewania ciepłej wody, oraz produkcji elektryczności używana jest energia słoneczna, wiatrowa czy geotermalna.

W analizowanym pomieszczeniu założono przeprowadzenie prac termomodernizacyjnych, polegających na zwiększeniu izolacyjności przegród. Docieplono ścianę zewnętrzną wełną mineralną oraz wstawiono okna o większym oporze cieplnym. Ciepło do budynku szkolnego dostarczane jest z ciepłowni wykorzystującej energię węgla kamiennego.

Sprawność instalacji grzewczej założono na poziomie 0,89. Wyniki przedstawiono w tabeli 4.

Każdy ze wskaźników maleje kolejno dla orientacji N, W, E, S. Powodem są, jak już wcześniej wspomniano, zyski ciepła od słońca, które największe są dla strony południowej i wschodniej. Dlatego też w miarę możliwości powinno się sytuować ważniejsze pomieszczenia (sale lekcyjne) właśnie z tych stron, natomiast te mniej uczęszczane (wc, składziki) w orientacjach N i E.

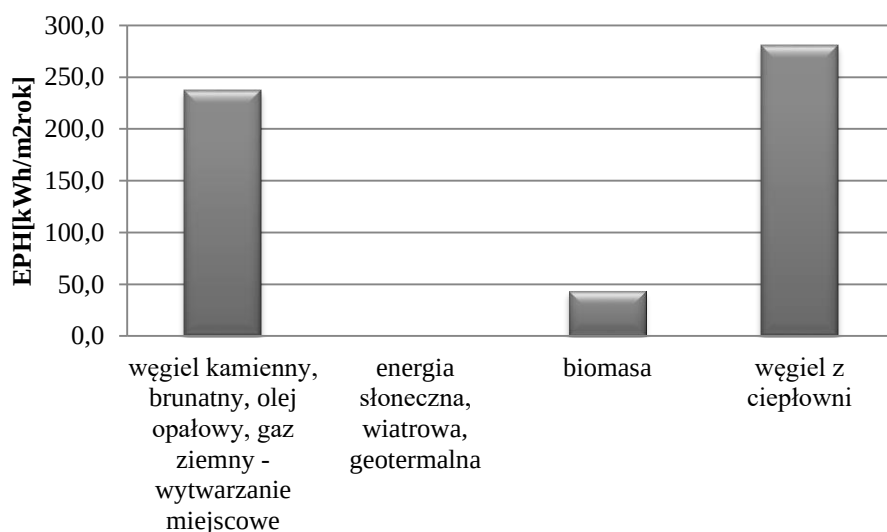
Tabela 4. Wartości wskaźników zapotrzebowania na energię przed i po modernizacji

Orientacja	Przed modernizacją			Po modernizacji		
	EU	EK	EP	EU	EK	EP
	[kWh/m ² rok]					
N	220,9	251,0	326,3	213,5	242,6	315,3
S	197,2	224,1	291,3	189,8	215,7	280,4
E	211,2	240,0	312,0	203,7	231,5	301,0
W	212,8	241,8	314,4	205,4	233,4	303,4

Źródło: Opracowanie własne

Dość duże zapotrzebowanie na ciepło może wynikać z dużej powierzchni okien, oraz strat ciepła na wentylację, w tym przypadku grawitacyjną. Rozwiązaniem mogłoby być zastosowanie wentylacji mechanicznej z odzyskiem ciepła (rekuperacji). Sprawność urządzeń służących odzyskowi ciepła zależy w dużej mierze od ich parametrów konstrukcyjnych i ich właściwego doboru. Efektywność odzysku ciepła np. w rekuperatorach krzyżowych wynosi od 57 do 75% [5]. Innym parametrem jest poprawa sprawności urządzeń i instalacji służących do produkcji, transportu i akumulacji energii cieplnej. Wyróżnić należy

efektywność pracy kotła, stratę ciepła przez rury, oraz sprawność regulacji i wykorzystania ciepła. Zastosowanie odpowiedniej izolacji na rury, centralnego sterowania przy kotle (jeśli jest) oraz zaworów termostatycznych przy grzejnikach, które utrzymują odpowiednią temperaturę w pomieszczeniu, zapewniłoby wyższą ogólną sprawność wykorzystania ciepła na cele ogrzewania (η_{Htot}). Kolejnym ważnym aspektem jest rodzaj źródła ciepła, co zostało przedstawione na rys. 5.



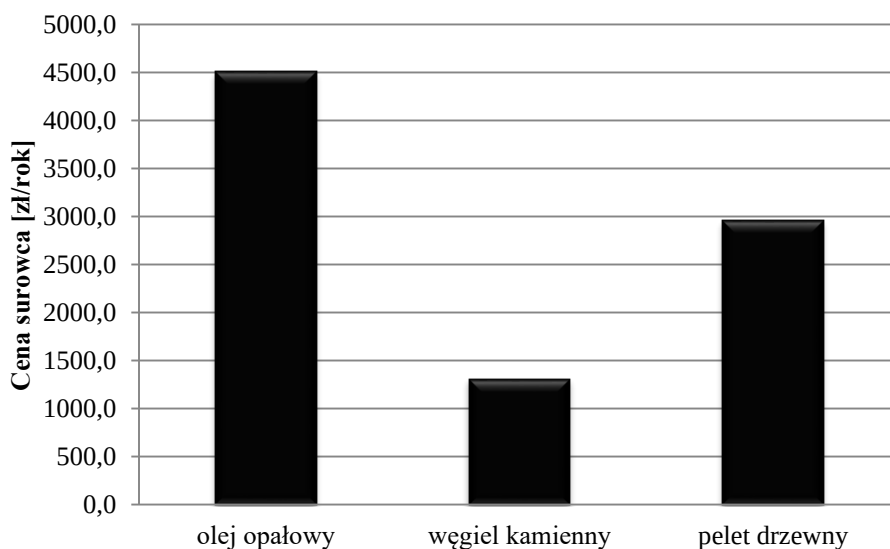
Rysunek 5. Wskaźnik EP_H dla różnych źródeł energii

Źródło: Opracowanie własne

Wykres (rys. 5) przedstawia końcowy cząstkowy wskaźnik EP_H przy orientacji południowej, po modernizacji na cele ogrzewania i wentylacji, którego wartość jak widać zmienia się znacząco, zależnie od rodzaju nośnika energii. Zmiana kotła węglowego na biomasę, przy dobrej izolacyjności przegród, może wystarczyć do spełnienia norm (EP), jednakże problemem może być eksploatacja systemu zależna od sprawności wykorzystania energii np. z biomasy. Jej wadą jest dość niska wartość opałowa, która zależna jest od wilgotności oraz wynikająca

z tego konieczność zapewnienia większej powierzchni składowania surowca.

Na rysunku 6 zostały pokazane koszty paliw. Dla ogrzania tej samej powierzchni pomieszczenia najczęściej zużyje się peletu drzewnego, o ok 1 tonę więcej niż węgla kamiennego, natomiast najmniej potrzeba oleju opałowego, którego cena jednak jest najwyższa. Ze względu na cenę oraz objętość biomasy, ekonomiczniejsze byłoby jej zastosowanie w niedużych budynkach o niskim zapotrzebowaniu na energię. Spalanie biomasy (np. peletu) w budynkach użyteczności publicznej może być prowadzone wraz z węglem kamiennym tzw. współspalanie.



Rysunek 6. Roczna cena surowca paliwowego

Źródło: Opracowanie własne

Rozwiązaniem, które zmniejszyłoby udział biomasy czy paliw tradycyjnych na cele c.o i c.w.u budynku jest wykorzystanie energii słońca, poprzez wykorzystanie kolektorów słonecznych. Jak wspomniano w poprzednim rozdziale najczęściej energii uzyskuje się w miesiącach

letnich, przy orientacji budynku ku stronie południowej. Ważny jest również kąt nachylenia kolektora do poziomu. Ciepła pora roku charakteryzuje się chwilowym natężeniem promieniowania w granicach 1100-1200 W/m², natomiast w zimniejszej porze wartości maksymalne są na poziomie 400-500 W/m² [6]. Sprawność kolektorów w zależności od ich konstrukcji wynosi ok. 60%. Przeważnie kolektory wykorzystywane są na cele c.w.u, jednak mogą również wchodzić w skład instalacji wspomagających ogrzewanie budynku. Należy jednak wtedy zwrócić uwagę na następujące parametry [2]:

- Powinna być zapewniona wysoka izolacyjność budynku, gdyż udział energii z kolektorów będzie wtedy większy,
- System ogrzewania powinien opierać się na parametrach niskotemperaturowych np. ogrzewanie podłogowe (wyższa sprawność),
- Zastosowanie większej ilości kolektorów wiąże się z większą powierzchnią (połaci dachu, ściany) potrzebną do ich zainstalowania,
- Należy przewidzieć możliwość wykorzystania nadwyżki ciepła w miesiącach letnich (ogrzewanie basenu),
- Należy dobrać odpowiedniej wielkości zasobnik, który determinuje efektywność układu solarnego.

5. Emisyjność budynków

Spalaniu paliw towarzyszy nieodłącznie tworzenie się związków toksycznych. Jednym z podstawowych produktów całkowitego spalania jest dwutlenek węgla, natomiast niezupełnemu spalaniu towarzyszy pojawienie się tlenku węgla. Zanieczyszczenia, które mogą powstać podczas spalania tworzą się dzięki obecności w paliwach niepożądanych

domieszek lub występowaniem procesów ubocznych. Zanieczyszczeniami tymi są: tlenek węgla (CO), tlenki azotu (NO_x), tlenki siarki (SO_x). Dąży się do ograniczenia negatywnych skutków spalania paliw na środowisko. Przykładowymi szkodliwymi działaniami tlenków azotu są [7]:

- Korozja metali,
- Obniżenie trwałości tekstyliów i materiałów stosowanych do ich barwienia (odbarwianie).

Ograniczenie emisji NO_x w procesie spalania można podzielić na prowadzone w kotle i poza kotłem. W pierwszej grupie wyróżnione są [8]:

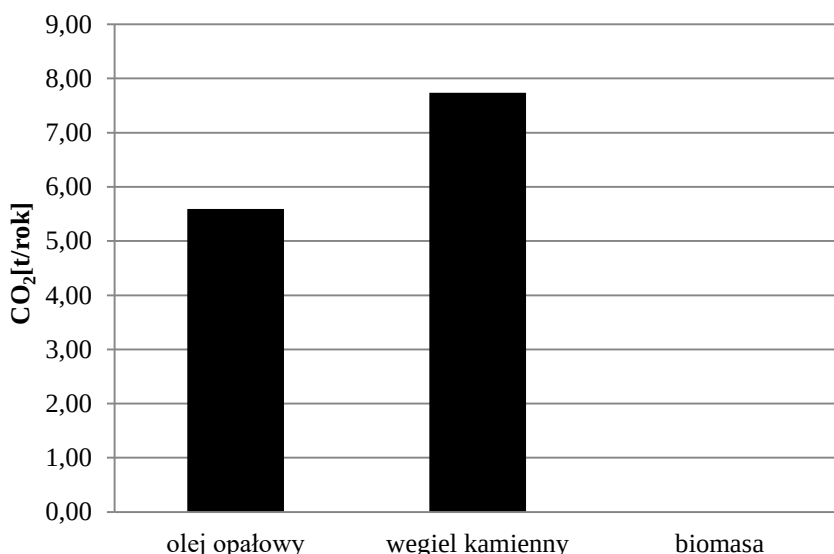
- Metody pierwotne - niskoemisyjne techniki spalania (obniżanie temp. spalania, zmiana rozdziału powietrza, rozdziału paliwa, aerodynamiki spalania, wykorzystanie redukujących właściwości płomienia bogatego),
- Metody wtórne, gdzie wprowadza się do kotła dodatkowe czynniki redukujące, np. amoniak czy mocznik.

W drugiej grupie (metody wtórne) wyróżnia się:

- SCR- selektywną redukcję katalityczną,
- NSCR- nieselektywną redukcję katalityczną,
- Metody absorpcyjne.

Redukcja tlenków siarki odbywa się przede wszystkim przez metody pierwotne, czyli usuwa SO_x już powstałe.

Na rysunku 7 zobrazowano ilość CO_2 wyprodukowanego przez poszczególne paliwa w odniesieniu do badanego pomieszczenia.



Rysunek 7. Ilość CO₂ wyprodukowanego w ciągu roku

Źródło: Opracowanie własne

Uznaje się, że emisja CO₂ przy spalaniu biomasy jest neutralna (0), dlatego też końcowy wynik dla biomasy na rysunku 7 wynosi 0.

6. Wyniki badań i dyskusja

Uzyskanie odpowiednich parametrów energetycznych budynku można uzyskać przez zmniejszenie strat ciepła przez odpowiednie ocieplenie budynku np. zwiększenie warstwy izolacyjnej, dzięki czemu uzyskuje się też redukcję kosztów paliwa służącego ogrzaniu budynku oraz podgrzaniu ciepłej wody. Zmiana czynnika produkującego energię cieplną czy elektryczną może znacząco zmniejszyć końcowy wskaźnik energii nieodnawialnej *EP*. Przy wyborze źródła tej energii trzeba się kierować zarówno względami ekonomicznymi jak i praktycznymi. Wybór np. kotła na biomasę wiąże ze sobą konieczność wydzielenia odpowiednio dużej powierzchni składowania, dlatego też wskazane jest to dla budynków małych. Surowiec do tych kotłów musi być

odpowiedniej wilgotności, gdyż w przeciwnym razie zmniejszy ilość ciepła uzyskana z jednostki surowca.

Wybór kolektorów słonecznych związany jest z dostępnością słońca. Nie można ich sytuować w miejscu zacienionym, czy od strony północnej.

Wielkość i izolacyjność okien ma zdecydowany wpływ na wielkość strat ciepła. Zmieniają się one w zależności od temperatury zewnętrznej środowiska. W miesiącach najzimniejszych zyski ciepła od słońca nie równoważą ciepła traconego przez przeszklenie, dlatego też nie warto jest powiększać okien w celu zwiększania udziału światła słonecznego w oświetlaniu pomieszczeń. Podobne wyniki uzyskano w pracy [9], gdzie stwierdzono, że przeszklenie w budynkach oświatowych powinno być na poziomie ok 15-20%, gdyż widoczna była zależność między utratą ciepła, a wielkością okien. Zauważono również utrzymywanie się niekorzystnego gradientu temperatury zarówno w pionie jak i poziomie, co w warunkach letnich zaburzało prawidłowe, równomierne oddawanie ciepła przez obiekt ze wszystkich stron. Rozwiązaniem, które mogłyby zwiększyć ilość światła dziennego w budynku z pominięciem celowego powiększania okien są tzw. świetliki, światłowodowy, odbłyśniki zewnętrzne, półki świetlne itp.

**Badania zostały zrealizowane w ramach pracy dla młodych
badaczy i sfinansowane ze środków na naukę MNiSW Politechnika
Białostocka Wydział Elektryczny.**

7. Wnioski

1. Modernizację budynków użyteczności publicznej w celu zapewnienia ich optymalnej energochłonności można przeprowadzać poprawiając ich izolacyjność, sprawność działania instalacji ogrzewczej, oraz dobór odpowiedniego źródła ciepła,
2. Dobór odpowiedniego źródła ciepła musi być przeanalizowany pod względem ekonomicznym, praktycznym oraz uwzględniać spełnienie zawartych w normach wskaźników zapotrzebowania na energię,
3. Zyski ciepła od słońca zależne są od ustawienia budynku względem stron świata, największe są od strony południowej,
4. Zwiększenie powierzchni okien może generować większe straty ciepła,
5. Odpowiednie oświetlenie budynku światłem dziennym może być zrealizowane za pomocą skupiania i odbijania światła w pożądanym kierunku,
6. Wykorzystanie światła dziennego może zredukować zapotrzebowanie na energię elektryczną o ok. 50%,
7. Wybierając źródło ciepła trzeba uwzględniać jego potencjalny wpływ na środowisko.

Literatura:

1. Rozporządzenie Ministra Infrastruktury i Rozwoju z dnia 27 lutego 2015 r. w sprawie metodologii wyznaczania charakterystyki energetycznej budynku lub części budynku oraz świadectw charakterystyki energetycznej (Dz.u. 2015 poz.376).

2. Tytko R.: *Urządzenia i systemy energetyki odnawialnej*. Wyd. i Drukarnia Towarzystwa Słowaków w Polsce, Kraków, 2013 str. 55, 145.
3. Grzonkowski J.: *Optymalne wykorzystanie światła dziennego w oświetleniu Wnętrz*, Bezpieczeństwo pracy nauka i praktyka, nr 9, 1999, str. 18-20.
4. Geryło R.: *Nowoczesny standard energetyczny budynków*. Wyd. POLCEN, Warszawa, 2015, str. 82, 230.
5. Krawczyk D.: *Certyfikacja energetyczna budynków*, Białystok, 2011, str. 70, 71.
6. Wiśniewski G., Gołębiowski S., Gryciuk M., Kurowski K., Więcka, A.: *Kolektory słoneczne energia słoneczna w mieszkalnictwie, hotelarstwie i drobnym przemyśle*, Wyd. MEDIUM, Warszawa, 2008, str. 14.
7. Muskała W.: *Tworzenie i destrukcja tlenków azotu w procesach energetycznego spalania paliw*, Projekt „Plan Rozwoju Politechniki Częstochowskiej”.
8. Smolarz A. *Diagnostyka procesów spalania paliw gazowych, pyłu węglowego oraz mieszaniny pyłu węglowego i biomasy z wykorzystaniem metod optycznych*, Politechnika Lubelska, Lublin, 2013, str. 34, 35.
9. Lis A., Lis P.: *Problemy nadmiernego przeszklenia Budynków oświatowych*, Zeszyty Naukowe Politechniki Częstochowskiej. Budownictwo, Z. 18 (168), str. 126-137.

inż. Jakub Frankowski^{1), 2)}, dr hab. Henryk Burczyk, prof. IWNiRZ²⁾

¹⁾Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Wydział Rolnictwa i Bioinżynierii
Instytut Inżynierii Biosystemów, ul. Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań

²⁾Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich
Pracownia Roślin Energetycznych, ul. Wojska Polskiego 71b, 60-630 Poznań
¹⁾jakubfrankowski2@gmail.com

Biomasa jednorocznych roślin energetycznych jako element dywersyfikacji źródeł energii w Polsce

*The biomass of annual energy crops as an element of diversification
of energy sources in Poland*

Słowa kluczowe: *biomasa, biogaz, rośliny energetyczne, sorgo, kukurydza, żyto*

Keywords: *biomass, biogas, energy crops, sorghum, maize, rye*

Streszczenie: Biomasa jest w Polsce kluczowym źródłem energii odnawialnej i alternatywą dla paliw kopalnych. Aby efektywnie wykorzystać ten surowiec niezbędne jest jednak stosowanie wydajnych rozwiązań, które umożliwiają otrzymywanie taniego biopaliwa. Dzięki temu możliwe jest minimalizowanie wpływu pozyskiwania surowców energetycznych na środowisko naturalne, przy jednocześnie postępującej, tak potrzebnej w Polsce, dywersyfikacji źródeł energii. Określenie możliwości zwiększenia produkcji biomasy z jednostki powierzchni pola i wdrożenie tych wyników badań pozwoliłoby na skuteczną realizację powyższych celów. Jak wynika z praktyki rolniczej kukurydza i sorgo są jednymi z najbardziej wydajnych gatunków uprawnych przeznaczonych do produkcji bioenergii. W artykule przedstawiono wyniki doświadczeń wprowadzających uprawę roślin jednorocznych po poplonach ozimych. W celu produkcji biomasy dla potrzeb biogazowni najwyższe plony uzyskano z uprawy żyta w poplonie ozimym i sorgo lub kukurydzy w plonie wtórnym. Łączne plony suchej masy wyniosły odpowiednio 37 Mg·ha⁻¹ dla żyta i sorgo oraz 40 Mg·ha⁻¹ dla żyta i kukurydzy. Znając wydajność biogazową i metanową tych roślin energetycznych, oszacowano także przychód możliwy do uzyskania ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepła powstających z wyprodukowanego biogazu z jednostki powierzchni tych upraw.

1. Wstęp

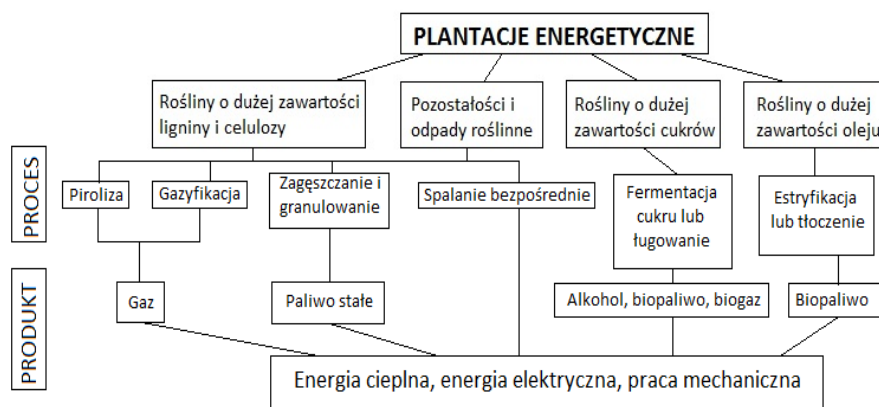
Wzrastające zapotrzebowanie na energię, a także rosnący niepokój społeczeństwa o bezpieczeństwo energetyczne kraju, związane z uzależnieniem od dostaw paliw kopalnych z innych państw, powoduje konieczność poszukiwania rozwiązań prowadzących do uniezależnienia się Polski od importu surowców energetycznych. Choć w naszym kraju węgiel jest i zapewne jeszcze przez wiele lat pozostanie głównym paliwem, to ze względu na unijne i krajowe plany działań dotyczące wytwarzania energii, niezbędne jest podejmowanie działań zmierzających do dywersyfikacji jej źródeł [1].

Zgodnie z założeniami przyjętymi przez Radę Unii Europejskiej, Polska do 2020 roku powinna osiągnąć co najmniej piętnastoprocentowy udział energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych w bilansie produkcji energii końcowej brutto [2]. Z uwagi na położenie geograficzne i związane z tym ograniczone możliwości rozwoju energetyki wiatrowej czy fotowoltaicznej, w porównaniu z takimi krajami jak Dania, Irlandia czy Hiszpania, według prognoz naukowców, jednym z filarów zwiększenia udziału energii z odnawialnych źródeł w naszym kraju będzie biomasa [3]. Opracowanie ekologicznej produkcji biomasy, jako substratu do wytworzenia bioenergii i bioproduktów jest obecnie priorytetem dla Unii Europejskiej [4]. W związku z tym, w wyniku prac hodowlanych, a także poprzez udoskonalanie procesów technologicznych, następuje wzrost efektywności i opłacalności upraw, a wykorzystywanie biomasy na cele energetyczne staje się coraz powszechniejsze [1].

2. Przegląd literatury

2.1. Plantacje energetyczne

Za niezmiernie istotne należy uznać rozpowszechnienie uzyskiwania biomasy z różnych gatunków roślin, ponieważ może to mieć znaczący wpływ na rozwiązanie problemów dotyczących bezpieczeństwa energetycznego kraju oraz nadmiernej emisji gazów cieplarnianych [2, 5]. W oparciu o literaturę dotyczącą możliwości wykorzystywania surowców roślinnych na cele energetyczne [3] opracowane zostało zestawienie możliwego wykorzystania biomasy pochodzącej z plantacji energetycznych (schemat 1.) [1].



Rysunek 1. Schemat wykorzystania roślin na cele energetyczne

Źródło: Opracowanie własne

Na podstawie rysunku 1. można wysnuć wniosek, że istnieje szerokie spektrum możliwości wykorzystania roślin na cele energetyczne. W związku z tym biomasa może mieć znaczący wpływ na dywersyfikację źródeł energii w Polsce. Wybór odpowiednich gatunków do produkcji energii ma jednak istotny wpływ na ilość i cenę produkowanego paliwa [1, 6].

Gatunki roślin uprawianych w celu konwersji zawartej w nich energii powinny wykazywać szereg właściwości, dzięki którym ich uprawa nie będzie kosztowna, przy jednoczesnym znacznym uzysku plonu biomasy [1, 2, 5, 7]. Wysoki plon suchej masy z jednostki powierzchni upraw, a także wysoka wartość opałowa, decydują przede wszystkim o jakości plonu i mają niebagatelny wpływ na opłacalność pozyskiwania i wykorzystania roślin energetycznych. Im te parametry mają wyższą wartość, tym istnieje mniejsze zapotrzebowanie na biomasę dla uzyskania pożądanej ilości energii [1, 8, 9, 10].

Jednym z obszarów, na których można by produkować duże ilości biomasy na cele energetyczne jest Wielkopolska. Znaczna jej część to tereny rolnicze, gdzie następuje dynamiczny wzrost areału upraw roślin energetycznych. Jest on możliwy między innymi dzięki rozwojowi hodowli nowych odmian tych roślin. Długookresowe doświadczenia i obserwacje wskazują jednak, iż poniesienie niezbędnych, często wysokich, kosztów inwestycyjnych sprawia, że uprawa niektórych gatunków czy odmian staje się nieopłacalna. Co więcej, niedobór opadów, zwłaszcza w okresie wegetacyjnym, powoduje, iż nie każda roślina daje na tych terenach zadowalający plon. Z tego powodu wykazanie ekonomicznej opłacalności upraw na cele energetyczne ma istotny wpływ, szczególnie dla jej potencjalnych producentów [1, 11].

Na podstawie wieloletnich badań oraz analizy danych zawartych w literaturze, określono, że największy przychód można uzyskać z uprawy roślin jednorocznych [1, 5, 11, 12]. W niniejszej pracy rozważaniom objęto kukurydzę zwyczajną (*Zea mays* L.), sorgo dwukolorowe (*Sorghum bicolor* L.) i żyto zwyczajne (*Secale cereale* L.), które wykazują największy potencjał produkcyjny w Wielkopolsce [12].

2.1.1. Kukurydza

Kukurydza zwyczajna to roślina wywodząca się z Ameryki Środkowej. Nie są jednak znane jej formy dzikie. Liczne odmiany kukurydzy, które dotychczas wyhodowano, klasyfikuje się przeważnie na podstawie kształtu ziarna. Z uwagi na dominację form mieszańcowych, często nie reprezentują one czystej formy wyjściowej, lecz typy pośrednie. Na cele energetyczne najczęściej uprawia się mieszańce kukurydzy szklistej zwanej inaczej flint oraz tzw. koński ząb (też: dent) [1, 13, 14].

Wszystkie odmiany tego gatunku są rozdzielnopłciowe jednopienne. Wykształcają grube, silne źdźbła, o wysokości do 3 m, zakończone wiechą - męskim kwiatostanem. Kwiatostan żeński - kolba wykształca się natomiast mniej więcej w połowie wysokości źdźbła, na końcu skróconego rozgałęzienia bocznego, zwanego dokolbiem. Kukurydza na ogół nie krzewi się, gdyż w uprawie to cecha niepożądana, utrudniająca zabiegi agrotechniczne. Jako roślina o fotosyntezie typu C4 kukurydza oszczędnie gospodaruje wodą. Jednak z uwagi na dużą produkcję biomasy, ma ona dość duże potrzeby wodne. Krytycznym momentem jest pod tym względem okres kwitnienia roślin [1, 12, 14]. W Polsce głównymi czynnikami determinującym wydajność uprawy kukurydzy są warunki wilgotnościowe, kształtowane poprzez ilość opadów, a także ich rozkład w trakcie sezonu wegetacyjnego. Duże wymagania termiczne kukurydzy można minimalizować dobierając odmiany o większej tolerancji na chłody oraz o krótszym okresie wegetacji [1, 14, 15].

Ze względu na różnorodność warunków środowiskowych różnych obszarów Polski występuje rejonizacja uprawy kukurydzy. Duża ilość

dostępnych odmian sprawia, że aby uzyskać optymalne plony dla danego miejsca i celu uprawy, dopasowuje się odmianę na podstawie jej klasy wczesności, czyli liczby FAO. Jest to liczba zawierająca się w przedziale od 100 do 1000. Im ta liczba jest mniejsza, tym odmiana jest wcześniejsza, czyli jej okres wegetacyjny jest krótszy [1, 16]. W Wielkopolsce odmiany wczesne, średnio-wczesne i średnio-późne (FAO 250-290) osiągają pełną dojrzałość ziarna. W jej południowej części na potrzeby biogazowni można uprawiać także odmiany późne (FAO 300-350) [14, 17].

W uprawie na cele energetyczne stosuje się dwie technologie produkcji: na kiszonkę bądź na ziarno. W technologii kiszonkowej produkuje się kiszonkę z całych roślin. Następnie stanowi ona substrat do produkcji biogazu. Natomiast w technologii ziarnowej można pozyskać kilka produktów. Są to: ziarno suche lub kiszone, kiszonka z ziarna z dodatkiem rdzeni kolbowych (tzw. CCM - z ang. corn-cob-mix), kiszonka z ześrutowanych kolb właściwych bądź kiszonka z kolb zebranych z liśćmi okrywowymi (tzw. LKS - z niem. Lieschkolben Schrott) [1, 14, 18, 19, 20].

2.1.2. Sorgo

Sorgo, należące do roślin wiechlinowatych, jest jednoroczną rośliną jarą dnia krótkiego o typie fotosyntezy C4 [14]. Na świecie na większą skalę uprawia się sorgo dwukolorowe (*Sorghum bicolor* L.) i trawę sudańską (*Sorghum sudanense* L.), a także ich liczne mieszańce. Są one wartościowymi roślinami żywieniowymi, gdyż nasiona zawierają do 13% białka. Ponadto ich biomasa służy do produkcji pasz bądź na cele energetyczne [1, 17].

W Polsce zastosowanie znajdują głównie różne podgatunki i formy sorgo dwukolorowego. Tworzą one źdźbła od 0,5 do 4 m wysokości. Liście mają długość od 0,5 do 0,8 m długości i są pokryte warstwą wosku. Chroni je to przed nadmierną transpiracją. Dodatkowo sorgo posiada rozwinięty wiązkowy system korzeniowy sięgający około 1,9 m w głąb ziemi [14]. Dzięki temu ma mniejsze wymagania glebowe niż kukurydza przez co może być uprawiane także na lekkich, piaszczystych glebach. Co więcej, lepiej wytrzymuje okresowe susze, gdyż sorgo, a zwłaszcza odmiana Sucrosorgo 506 (sorgo cukrowe), bardzo oszczędnie gospodaruje wodą [21]. Jest to istotna cecha, szczególnie przy niedoborze opadów atmosferycznych występujących często na obszarze centralnej Polski. Zaobserwowano, że w doświadczeniach polowych w zakładach doświadczalnych Instytutu Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich, sorgo cukrowe najlepiej znosiło niewielką ilość opadów i dawało większy plon biomasy w stosunku do innych odmian [1, 11, 12]. Co więcej, uprawa sorga jest o około 30% tańsza niż kukurydzy, gdyż nie wymaga tak intensywnej pielęgnacji. Spowodowane jest to mniejszymi nakładami na ochronę chemiczną plantacji, gdyż nie ma ono jeszcze naturalnych szkodników na terenie Polski [21].

Jednakże sorgo ma bardzo wysokie wymagania termiczne, przez co jego plon w głównej mierze zależy od rozkładu temperatur w trakcie sezonu wegetacyjnego. Z uwagi na późny siew (po 15 V) roślina ta może być uprawiana w plonie wtórnym po międzyplonach ozimych, a nawet po wczesnych ziemniakach [17, 22]. Zbiór biomasy dokonuje się od końca września do połowy października, przed wystąpieniem pierwszych jesiennych przymrozków. Powodują one bowiem

zmniejszenie zawartości cukrów w zielonej masie, co obniża jej jakość [11, 14].

Według Lewandowskiego i Rymsa [21] w warunkach klimatycznych Polski sorgo nie owocuje, jednak według Michalskiego [17] i Burczyka [11] niektóre europejskie odmiany sorgo dwukolorowego, przy sprzyjającej pogodzie (długie, gorące lato), osiągają czasami dojrzałość omłotową. Jednakże typowe odmiany tropikalne sorgo w klimacie umiarkowanym przedłużają okres wegetatywny i nie wytwarzają kwiatostanów [11, 17, 21].

Biomasa sorgo, zbudowana głównie z lignocelulozy, może być konwertowana na cele energetyczne za pomocą metod biochemicznych i termochemicznych. Dzięki temu, w procesie karbonizacji, gazyfikacji, spalania bądź przy produkcji bioetanolu czy biogazu, można uzyskać niedużym kosztem (około $10 \text{ PLN} \cdot \text{GJ}^{-1}$) znaczne ilości energii [12, 21].

Ze względu na dynamiczny rozwój prac hodowlanych, a przez to licznie pojawiające się na rynku nowe odmiany przedstawicieli rodzaju *Sorghum*, należy przypuszczać, że popularność tej rośliny będzie rosła. Znaczne postępy w dziedzinie uprawy sorgo sprawiają, iż roślina ta może za kilka lub kilkanaście lat stanowić alternatywne, wydajne źródło dla produkcji biopaliw z kukurydzy [1, 23].

2.1.3. Żyto

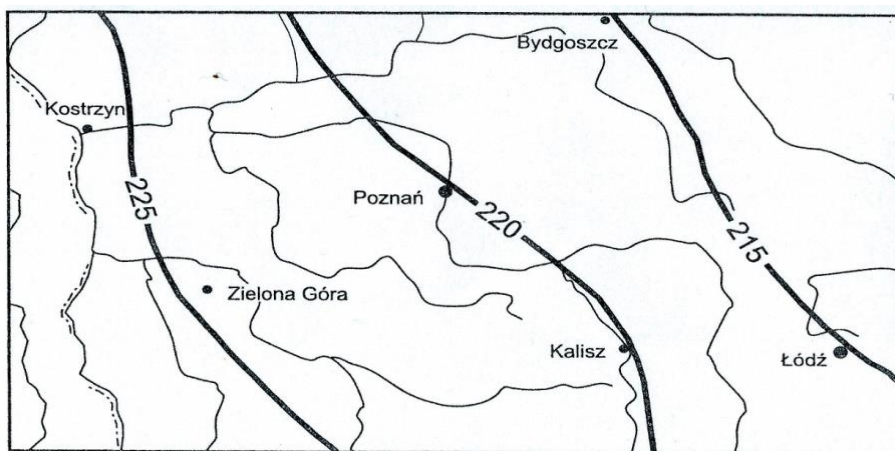
Spośród państw wchodzących w skład Unii Europejskiej produkcja żyta zwyczajnego jest w Polsce największa i pod względem masy produkowanego ziarna zbliżona do światowego lidera - Rosji [24]. Oprócz możliwości przeznaczenia niepełnowartościowego ziarna i słomy do wytwarzania energii cieplnej, żyto na cele energetyczne może być

uprawiane jako międzyplon do produkcji biogazu. Czteroletnie doświadczenia dowiodły, iż żyto zbierane w stadium mleczno-woskowej dojrzałości ziarna jest wydajnym surowcem energetycznym [1, 12, 25].

3. Teren i metodyka badań

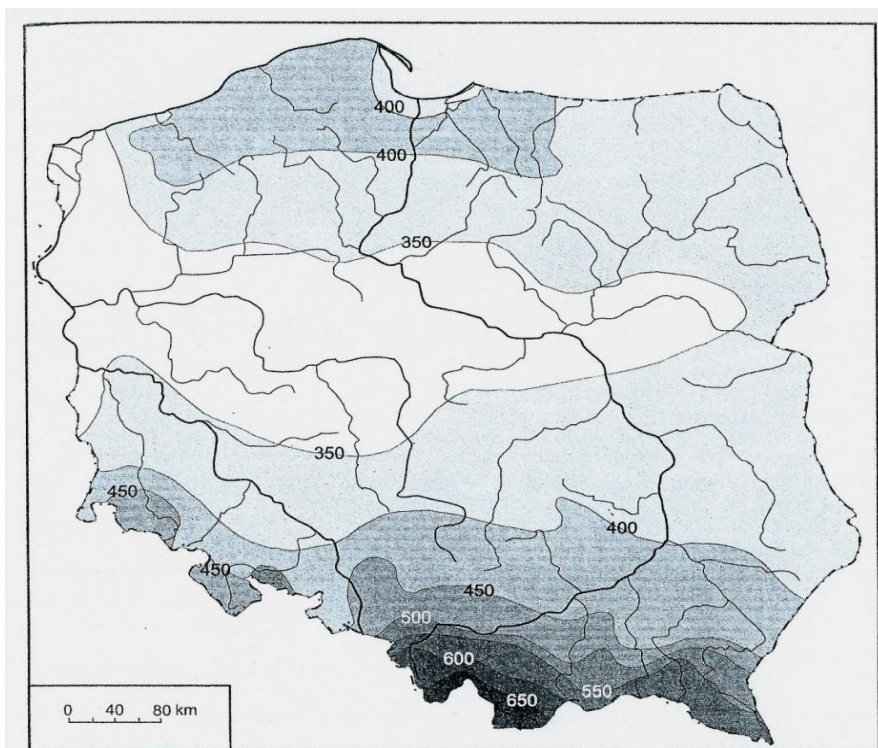
3.1.1. Teren badań

Doświadczenia polowe prowadzono w okresie trzech lat w Zakładzie Doświadczalnym Instytutu Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich Sielec Stary w powiecie Rawickim w województwie wielkopolskim. Okres wegetacyjny wynosi na tym obszarze średnio ponad 220 dni (rys. 2.) [26]. Ponadto Zakład ten położony jest w rejonie o małej rocznej ilości opadów (średnia z wielolecia wynosi poniżej 550 mm) oraz o niskim poziomie wody gruntowej [9, 10]. Powoduje to częste i długotrwałe deficyty wilgoci, zwłaszcza w okresie wegetacyjnym, gdyż dla okresu maj - październik średnie wieloletnie sumy opadów atmosferycznych wynoszą poniżej 350 mm (rys. 3.) [27, 28].



Rysunek 2. Średnia długość okresu wegetacyjnego wyrażona w dniach

Źródło: Woś 1994 [26]



Rysunek 3. Średnie wieloletnie sumy opadów w okresie maj-październik w Polsce

Źródło: Sadowski 1994 [27]

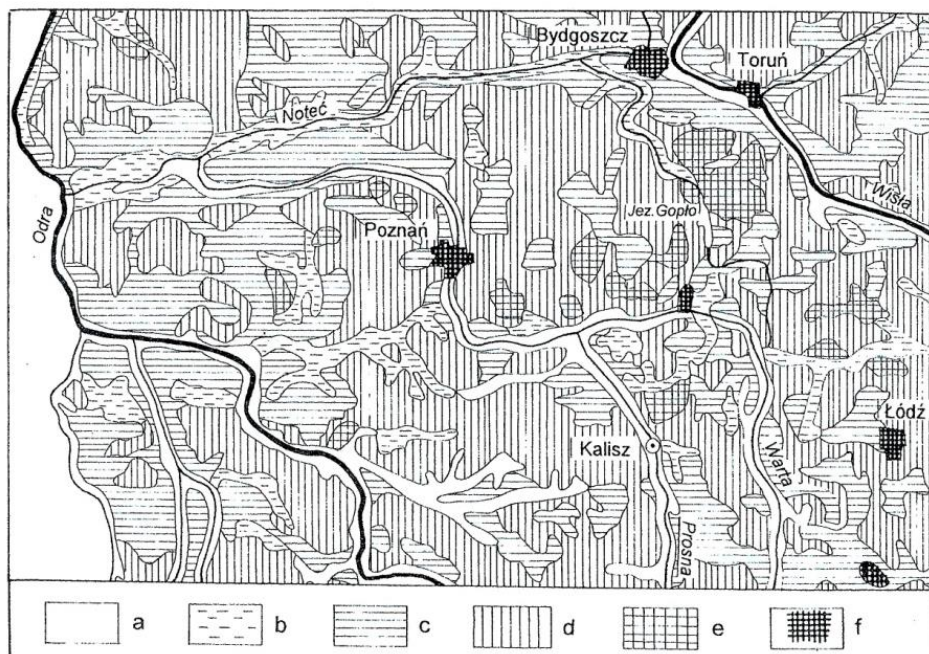
3.2. Poletka doświadczalne

Doświadczenia (rys. 4.) otoczone obsiewami zakładano w czterech powtórzeniach metodą bloków losowych na poletkach o powierzchni po 40 m² na glebie bielcowej (rys. 5.). Powstała ona z ubogich piasków oraz żwirów różnego pochodzenia. Wyróżniają się dużą przepuszczalnością, niską żyznością i odczynem od kwaśnego do bardzo kwaśnego. W Sielcu Starym gleby bielicoziemne zalegają na glinie i cechują się średnią zasobnością w składniki pokarmowe [12, 28, 29].



Rysunek 4. Poletka doświadczalne otoczone obsiewem

Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 5. Rozmieszczenie głównych grup gleb na terytorium Wielkopolski

Źródło: Bednarek, Prusinkiewicz 1997 [29]

Oznaczenia: a- mady rzeczne; b- bagna; c- gleby bielicoziemne (bielcowe i rdzawe); d- gleby brunatnoziemne (brunatne właściwe, kwaśne i płowe); e- czarne ziemie; f- gleby antropogeniczne

Teren doświadczeń obejmował stanowiska po zbożach ozimych. Wcześniej zlokalizowane były tam doświadczenia polowe z sorgo, kukurydzą, burakami cukrowymi i konopiami włóknistymi uprawianymi w plonie głównym [11].

3.3. Metodyka badań

3.3.1. Badania polowe

Uprawę roli rozpoczynano od orki na średnią głębokość pod zasiew poplonu ozimego po zbiorze przedplonu. Bezpośrednio przed siewem ziarna na początku września wykonywano bronowanie i wysiewano nawozy mineralne w ilościach: N – 20 kg·ha⁻¹, P₂O₅ – 40 kg·ha⁻¹ i K₂O – 80 kg·ha⁻¹. Następnie wysiewano żyto odmiany ‘Sellino’ w ilości 180 kg·ha⁻¹. Na początku marca, gdy rośliny rozpoczynały wegetację, zastosowano pogłównie 100 kg·ha⁻¹ azotu w formie saletry amonowej [12].

Żyto uprawiane jako międzyplon koszone w fazie mleczno-woskowej dojrzałości ziarna. Bezpośrednio po zbiorze talerzowano i bronowano pole. Następnie wysiewano nawozy mineralne w ilościach: N – 120 kg·ha⁻¹, P₂O₅ – 60 kg·ha⁻¹, K₂O – 100 kg·ha⁻¹ oraz MgO – 30 kg·ha⁻¹. W plonie wtórym wysiewano sorgo odmiany ‘Sucrosorgo 506’ (10 kg·ha⁻¹) i średnio wczesny mieszaniec kukurydzy ‘Opoka’ (80 kg·ha⁻¹). Jesienią były one zbierane również w fazie mleczno-woskowej dojrzałości ziarna [12].

3.3.2. Analiza ekonomiczna

Przydatność wybranych roślin do produkcji biomasy na cele energetyczne oceniano na podstawie uzyskanych plonów zielonej i suchej

masy. Ponadto, znając wydajność biogazową i metanową tych gatunków, oszacowano także przychód możliwy do uzyskania ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepła powstających z wyprodukowanego biogazu z jednostki powierzchni tych upraw na podstawie [6]; [12] i [30].

Objętość wytworzonego biogazu:

$$V_b = W_b \cdot M \quad (1)$$

gdzie:

V_b – objętość wytworzonego biogazu [m^3],

W_b – wydajność biogazowa substratu [$\text{m}^3 \cdot \text{Mg}^{-1}$],

M – masa substratu [Mg].

Objętość wytworzonego metanu:

$$V_{CH_4} = V_b \cdot S_{CH_4} \quad (2)$$

gdzie:

V_{CH_4} – objętość wytworzonego metanu [m^3],

V_b – objętość wytworzonego biogazu [m^3],

S_{CH_4} – stężenie metanu w biogazie [%].

Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej w kogeneracji:

$$E_E = V_{CH_4} \cdot W_{E_{CH_4}} \cdot \eta_E \quad (3)$$

$$E_E = V_{CH_4} \cdot 0,00917^* \cdot 0,4^{**} \quad (4)$$

$$E_{E_1} = E_E \cdot 0,95^{***} \quad (5)$$

gdzie:

E_E – ilość energii elektrycznej wyprodukowanej w kogeneracji [MWh],

V_{CH_4} – objętość wytworzonego metanu [m^3],

$W_{E_{CH_4}}$ – współczynnik wydajności energetycznej metanu [$\text{MWh} \cdot \text{m}^{-3}$],

* $1 \text{ m}^3 \text{ CH}_4 \approx 9,17 \text{ kWh} = 0,00917 \text{ MWh}$

η_E – sprawność elektryczna agregatu kogeneracyjnego [-],

** $\eta_E = 0,36-0,44$ [-], w obliczeniach przyjęto wartość średnią: 0,4

*** do obliczenia przychodu ze sprzedaży energii elektrycznej przyjęto ilość wytworzonej energii elektrycznej pomniejszoną o 5%, która jest wykorzystywana na potrzeby własne biogazowni

Ilość ciepła wyprodukowanego w kogeneracji [MWh]:

$$E_{T_1} = V_{CH_4} \cdot W_{E_{CH_4}} \cdot \eta_T \quad (6)$$

$$E_{T_1} = V_{CH_4} \cdot 0,00917^* \cdot 0,45^{**} \quad (7)$$

gdzie:

E_{T_1} – ilość ciepła wytworzonego w kogeneracji [MWh],

V_{CH_4} – objętość wytworzonego metanu [m^3],

$W_{E_{CH_4}}$ – współczynnik wydajności energetycznej metanu [$MWh \cdot m^{-3}$],

* $1 m^3 CH_4 \approx 9,17 kWh = 0,00917 MWh$

η_T – sprawność termiczna agregatu kogeneracyjnego [-],

** $\eta_T = 0,43-0,54$ [-], w obliczeniach przyjęto wartość: 0,48

Ilość ciepła wyprodukowanego w kogeneracji [GJ]:

$$E_{T_{GJ}} = \frac{E_{T_1}}{0,274^*} \quad (8)$$

gdzie:

$E_{T_{GJ}}$ – ilość ciepła wytworzonego w kogeneracji wyrażona w [GJ],

E_{T_1} – ilość ciepła wytworzonego w kogeneracji [MWh],

* $1 GJ = 0,274 MWh$

Przychód ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepła wyprodukowanego w kogeneracji:

$$P_{E_{el}} = E_{E_1} \cdot \text{Cena energii elektrycznej} \quad (9)$$

$$P_{Z_c} = E_{E_1} \cdot \text{Cena Zielonego Certyfikatu} \quad (10)$$

$$P_{Z_c} = E_{E_1} \cdot \text{Cena Żółtego Certyfikatu} \quad (11)$$

$$P_T = E_{T_{GJ}} \cdot \text{Cena GJ ciepła} \quad (12)$$

$$\text{Przychód}_{\text{całkowity}} = P_{E_{el}} + P_{Z_c} + P_{\dot{Z}_c} + P_T \quad (13)$$

gdzie:

$P_{E_{el}}$ – przychód roczny za sprzedaż energii elektrycznej [PLN],

P_{Z_c} – przychód roczny za sprzedaż zielonych certyfikatów [PLN],

$P_{\dot{Z}_c}$ – przychód roczny za sprzedaż żółtych certyfikatów [PLN],

P_T – przychód roczny za sprzedaż ciepła [PLN].

W celu obliczenia przychodu ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepła ilość energii elektrycznej wyprodukowanej w kogeneracji (E_{E_1}) oraz ilość ciepła wytworzonego w kogeneracji wyrażoną w gigadżulach ($E_{T_{GJ}}$) zaokrąglono zawsze do całości.

W tabeli 1. przedstawiono zestawienie cen obowiązujących w lutym 2016 roku. Wartość zielonego certyfikatu pobrano z notowań Towarowej Giełdy Energii i jest to średnia cena ważona wolumenem ze wszystkich transakcji kontraktem PMOZE_A na sesji giełdowej [31]. Pozostałe obowiązujące ceny zaczerpnięto od jednej z biogazowni funkcjonującej na terenie województwa wielkopolskiego. Wartości te posłużyły do obliczenia przychodu ze sprzedaży wyprodukowanej energii elektrycznej i ciepła z jednostki powierzchni omawianych upraw.

Tabela 1. Ceny świadectw pochodzenia oraz sprzedaży energii elektrycznej i ciepła

	Cena	Jednostka
Energia elektryczna	151	PLN·MWh ⁻¹
Zielony Certyfikat	114*	PLN·MWh ⁻¹
Żółty Certyfikat	104	PLN·MWh ⁻¹
GJ ciepła	28	PLN·GJ ⁻¹

Źródło: Opracowanie własne *cena obowiązująca na dzień 16.02.2016 r.

4. Wyniki badań i dyskusja

Wyniki kilkuletnich doświadczeń polowych wprowadzających uprawę roślin jednorocznych po poplonach ozimych przedstawiono w tabelach 2. i 3.

Tabela 2. Plony zielonej masy z poplonu ozimego i plonów wtórnych

Gatunek rośliny	Plony w latach [Mg·ha ⁻¹]				Plon średni [Mg·ha ⁻¹]
	1	2	3	4	
żyto	42,2	38,8	38,5	44,2	40,9
sorgo	48,0	68,5	79,8	92,7	72,2
kukurydza	46,8	64,8	71,7	86,6	67,5
żyto + sorgo	90,2	107,3	118,3	136,9	113,2
żyto + kukurydza	89,0	103,6	110,2	130,8	108,4

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 3. Plony suchej masy z poplonu ozimego i plonów wtórnych

Gatunek rośliny	Plony w latach [Mg·ha ⁻¹]				Plon średni [Mg·ha ⁻¹]
	1	2	3	4	
żyto	14,3	13,3	13,6	14,5	13,9
sorgo	16,7	23,7	26,8	26,4	23,4
kukurydza	17,3	25,8	25,7	34,5	25,8
żyto + sorgo	31,0	37,0	40,4	40,9	37,3
żyto + kukurydza	31,6	39,3	39,3	49,0	39,7

Źródło: Opracowanie własne

W celu produkcji biomasy dla potrzeb biogazowni najwyższe plony uzyskano z uprawy żyta w poplonie ozimym i sorgo w plonie wtórnym. Plony kukurydzy były nieznacznie niższe niż plony sorgo. Różnice w zbiorach pomiędzy poszczególnymi latami wynikały przede wszystkim ze znacznych wahań ilości opadów atmosferycznych, zwłaszcza w miesiącach, w których oczekiwany jest znaczny wzrost roślin [11, 12].

W porównaniu z plonami zielonej masy żyta, uprawianego w poplonach ozimych na paszę objętościową i zbieranego w początkowej fazie kłoszenia się roślin, uzyskane w niniejszym doświadczeniu plony są dwukrotnie wyższe [12, 32]. Wynika to z faktu intensywnego przyrostu masy organicznej w końcowej fazie wzrostu żyta. Opóźnienie zbioru tej rośliny do fazy dojrzałości mleczno-woskowej nasion pozwala na znaczne zwiększenie plonu i jednocześnie nie wyklucza możliwości uprawy wczesnych mieszańców kukurydzy lub sorgo jako plonu wtórego w celu pozyskania biomasy na cele energetyczne.

Plon biomasy z sorgo i kukurydzy uprawianych w plonie wtórnym również jest wysoce zadowalający, choć w pierwszym roku prowadzenia doświadczenia zbiory były stosunkowo niskie. Spowodowane było to obfitymi opadami deszczu, czego konsekwencją było czasowe podtopienie poletek doświadczalnych. Miało to niewątpliwie negatywny wpływ na końcowe, uśrednione wyniki. Jednak wartości uzyskane w trzech kolejnych latach pokazują, że tamten rok był wyjątkowo niekorzystny dla kukurydzy i sorgo, a zaistniała wtedy sytuacja nie powtórzyła się. Ponadto uzyskano bardzo wysokie plony tych roślin w ostatnim roku prowadzenia doświadczenia. Było to spowodowane dostatecznymi opadami w fazie tworzenia kwiatostanów oraz słoneczną

i ciepłą pogodą przed i podczas zbiorów. Łączne średnie plony suchej masy wyniosły $37 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ dla żyta i sorgo oraz $40 \text{ Mg} \cdot \text{ha}^{-1}$ dla żyta i kukurydzy.

Uzyskane w doświadczeniach plony są znacznie wyższe niż plony innych roślin uprawianych na cele energetyczne [7, 17, 21]. Z tego względu ocenia się, iż obszar Wielkopolski jest terenem korzystnym do uprawy tych roślin w zaproponowanym płodozmianie w celu maksymalizacji plonów uzyskiwanych z jednostki powierzchni pola.

W tabeli 5. zaprezentowano wyniki analizy ekonomicznej obrazującej przychód możliwy do uzyskania ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepła wytwarzanych z biogazu z kiszonek z żyta, kukurydzy i sorgo uzyskanych z hektara upraw. Przyjęte do obliczeń wydajności biogazowe i metanowe przedstawiono w tabeli 4. Na podstawie [6, 12]. Starty przy kiszeniu przyjęto na poziomie 12% na podstawie danych zawartych w literaturze [12].

Tabela 4. Wydajności biogazowe i metanowe kiszonki z żyta, kukurydzy i sorgo

Gatunek rośliny	Wydajność biogazowa	Wydajność metanowa	
	$[\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}]$	$[\% \text{ wydajności metanowej}]$	$[\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}]$
żyto	6 156	50	3 078
kukurydza	11 761	56	6 586
sorgo	6 868	55	3 777

Źródło: Opracowanie własne

Tabela 5. Przychód ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepła z kiszonek z 1 ha upraw

Gatunek rośliny	Energia elektryczna		Ciepło		Suma [PLN]
	[MWh]	[PLN]	[GJ]	[PLN]	
żyto	10,74	3 963	46,35	1 298	5 261
kukurydza	22,95	8 469	99,20	2 778	11 246
sorgo	13,16	4 856	56,90	1 593	6 449
żyto + kukurydza	33,69	12 432	145,55	4 076	16 507
żyto + sorgo	23,90	8 819	103,25	2 891	11 710

Źródło: opracowanie własne

Na podstawie wyników przedstawionych w tabeli 5. można stwierdzić, iż największy przychód można w ciągu roku uzyskać ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepłej wyprodukowanej z żyta uprawianego w polonie ozimym i kukurydzy w plonie wtórnym. Uprawiając sorgo zamiast kukurydzy uzyskano mniejszą ilość energii co bezpośrednio przełożyło się na obniżenie przychodu. Poniżej przedstawiono analizę ekonomiczną sporządzoną dla poszczególnych gatunków.

Analiza ekonomiczna dla żyta:

Objętość wytworzonego metanu:

$$V_{CH_4} = 6\,156\,m^3 \cdot 50\%$$

$$V_{CH_4} = 3\,078\,m^3$$

Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej w kogeneracji:

$$E_E = 3\,078\,m^3 \cdot 0,00917 \frac{MWh}{m^3} \cdot 0,4$$

$$E_E = 11,3\,MWh$$

$$E_{E_1} = E_E \cdot 0,95 = 10,74 \text{ MWh}$$

Ilość ciepła wyprodukowanego w kogeneracji [MWh]:

$$E_{T_1} = 3\,078 \text{ m}^3 \cdot 0,00917 \frac{\text{MWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,45$$

$$E_{T_1} = 12,7 \text{ MWh}$$

Ilość ciepła wyprodukowanego w kogeneracji [GJ]:

$$E_{T_{GJ}} = \frac{12,7}{0,274}$$

$$E_{T_{GJ}} = 46,35 \text{ GJ}$$

Przychód ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepła wyprodukowanego w kogeneracji:

$$P_{E_{el}} = 10,74 \text{ MWh} \cdot 151 \frac{\text{PLN}}{\text{MWh}} = 1\,621,74 \text{ PLN}$$

$$P_{Z_c} = 10,74 \text{ MWh} \cdot 114 \frac{\text{PLN}}{\text{MWh}} = 1\,224,36 \text{ PLN}$$

$$P_{\dot{Z}_c} = 10,74 \text{ MWh} \cdot 104 \frac{\text{PLN}}{\text{MWh}} = 1\,116,96 \text{ PLN}$$

$$P_T = 46,35 \text{ GJ} \cdot 28 \frac{\text{PLN}}{\text{GJ}} = 1\,297,80 \text{ PLN}$$

$$Przychód_{całkowity} = 1\,621,74 + 1\,224,36 + 1\,116,96 + 1\,297,80$$

$$Przychód_{całkowity} = \mathbf{5\,260,86 \text{ PLN}}$$

Analiza ekonomiczna dla kukurydzy:

Objętość wytworzonego metanu:

$$V_{CH_4} = 11\,761 \text{ m}^3 \cdot 56\%$$

$$V_{CH_4} = 6\,586 \text{ m}^3$$

Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej w kogeneracji:

$$E_E = 6\,586 \text{ m}^3 \cdot 0,00917 \frac{\text{MWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4$$

$$E_E = 24,16 \text{ MWh}$$

$$E_{E_1} = E_E \cdot 0,95 = 22,95 \text{ MWh}$$

Ilość ciepła wyprodukowanego w kogeneracji [MWh]:

$$E_{T_1} = 6\,586 \text{ m}^3 \cdot 0,00917 \frac{\text{MWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,45$$

$$E_{T_1} = 27,18 \text{ MWh}$$

Ilość ciepła wyprodukowanego w kogeneracji [GJ]:

$$E_{T_{GJ}} = \frac{27,18}{0,274}$$

$$E_{T_{GJ}} = 99,20 \text{ GJ}$$

Przychód ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepła wyprodukowanego w kogeneracji:

$$P_{E_{el}} = 22,95 \text{ MWh} \cdot 151 \frac{\text{PLN}}{\text{MWh}} = 3\,465,45 \text{ PLN}$$

$$P_{Z_C} = 22,95 \text{ MWh} \cdot 114 \frac{\text{PLN}}{\text{MWh}} = 2\,616,30 \text{ PLN}$$

$$P_{\dot{Z}_C} = 22,95 \text{ MWh} \cdot 104 \frac{\text{PLN}}{\text{MWh}} = 2\,386,80 \text{ PLN}$$

$$P_T = 99,20 \text{ GJ} \cdot 28 \frac{\text{PLN}}{\text{GJ}} = 2\,777,60 \text{ PLN}$$

$$Przychód_{całkowity} = 3\,465,45 + 2\,616,30 + 2\,386,80 + 2\,777,60$$

$$Przychód_{całkowity} = \mathbf{11\,247,15 \text{ PLN}}$$

Analiza ekonomiczna dla sorgo:

Objętość wytworzonego metanu:

$$V_{CH_4} = 6\,868 \text{ m}^3 \cdot 55\%$$

$$V_{CH_4} = 3\,777 \text{ m}^3$$

Ilość energii elektrycznej wyprodukowanej w kogeneracji:

$$E_E = 3\,777 \text{ m}^3 \cdot 0,00917 \frac{\text{MWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,4$$

$$E_E = 13,85 \text{ MWh}$$

$$E_{E_1} = E_E \cdot 0,95 = 13,16 \text{ MWh}$$

Ilość ciepła wyprodukowanego w kogeneracji [MWh]:

$$E_{T_1} = 3\,777 \text{ m}^3 \cdot 0,00917 \frac{\text{MWh}}{\text{m}^3} \cdot 0,45$$

$$E_{T_1} = 15,59 \text{ MWh}$$

Ilość ciepła wyprodukowanego w kogeneracji [GJ]:

$$E_{T_{GJ}} = \frac{15,59}{0,274}$$

$$E_{T_{GJ}} = 56,90 \text{ GJ}$$

Przychód ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepła wyprodukowanego w kogeneracji:

$$P_{E_{el}} = 13,16 \text{ MWh} \cdot 151 \frac{\text{PLN}}{\text{MWh}} = 1\,987,16 \text{ PLN}$$

$$P_{Z_c} = 13,16 \text{ MWh} \cdot 114 \frac{\text{PLN}}{\text{MWh}} = 1\,500,24 \text{ PLN}$$

$$P_{\dot{Z}_c} = 13,16 \text{ MWh} \cdot 104 \frac{\text{PLN}}{\text{MWh}} = 1\,368,64 \text{ PLN}$$

$$P_T = 56,90 \text{ GJ} \cdot 28 \frac{\text{PLN}}{\text{GJ}} = 1\,593,20 \text{ PLN}$$

$$Przychód_{całkowity} = 1\,987,16 + 1\,500,24 + 1\,368,64 + 1\,593,20$$

$$Przychód_{całkowity} = \mathbf{6\,449,24 \text{ PLN}}$$

5. Wnioski

1. Przeprowadzone kilkuletnie doświadczenia dowiodły, iż żyto uprawiane jako poplon ozimy i zbierane w stadium mleczno-woskowej dojrzałości ziarna oraz sorgo i kukurydza w uprawie na kiszonkę w plonie wtórym są wydajnymi surowcami energetycznymi.

2. Łączne plony suchej masy wyniosły odpowiednio 37 Mg·ha⁻¹ dla żyta i sorgo oraz 40 Mg·ha⁻¹ dla żyta i kukurydzy.
3. Zbiór żyta wczesnym latem i kukurydzy lub sorgo jesienią umożliwia dwukrotne pozyskanie dwóch różnych substratów z jednego pola dla potrzeb biogazowni.
4. Uprawa w ciągu roku dwóch różnych roślin niweluje ewentualne niższych plony jednego gatunku drugim w rocznym bilansie produktywności biomasy, a tym samym zwiększa prawdopodobieństwo uzyskania bardzo wysokiego plonu zielonej i suchej masy w danym okresie wegetacyjnym z jednostki powierzchni pola.
5. Przychód możliwy do uzyskania ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepła powstających z wyprodukowanego biogazu z hektara upraw wyniósł dla żyta i kukurydzy 16 507 PLN, natomiast dla żyta i sorgo był niższy o 4 797 PLN i wyniósł 11 710 PLN.
6. Wdrożenie prezentowanych wyników w skali kraju przyczyniłoby się w znacznym stopniu do dywersyfikacji źródeł energii w Polsce. Ponadto uprawa i przetwórstwo roślin energetycznych zapewniłoby wiele nowych miejsc pracy na obszarach wiejskich.

Literatura:

1. Frankowski J.: *Projekt uprawy wybranych roślin energetycznych w warunkach glebowo– –klimatycznych Wielkopolski*. Praca inżynierska, maszynopis niepublikowany, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Poznań, 2015.
2. Tworkowski J.: *Ogólna charakterystyka roślin energetycznych*, [w:] Szczukowski S. (red.) i in.: *Wieloletnie rośliny energetyczne*,

- MULTICO Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 2012, str. 6-9.
3. Gradziuk P., Grzybek A.: *Charakterystyka odnawialnych źródeł energii* [w:] Grzybek A., Gradziuk P., Kowalczyk K.: *Słoma. Energetyczne paliwo*. Wydawnictwo: Polskie Towarzystwo Biomasy PolBiom, Warszawa, 2001.
 4. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych (Dz. U. UE L09.140.16).
 5. Kuś J., Matyka M.: *Uprawa roślin na cele energetyczne*, Wyd. IUNG-PIB, Puławy, 2010.
 6. Frankowski J.: *Biomasa jako element dywersyfikacji źródeł energii w Polsce na przykładzie biogazowni w Przybrodzie*. Praca podyplomowa, maszynopis niepublikowany, Uniwersytet Ekonomiczny w Poznaniu, Poznań, 2016.
 7. Grzybek A. (red.) i in.: *Modelowanie energetycznego wykorzystania biomasy*, Wydawnictwo Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego w Falentach Oddział w Warszawie, Warszawa, 2011, str. 60, 64, 117, 138-139.
 8. Olszewska A. i in.: *Badania płyt drewnopochodnych jako surowców energetycznych*, [w:] *Ekoenergetyka*: pod red. Skoczko I., Piekutin J., Drobiszewskiej M. i Mokryckiego R. Monografie „Inżynieria Środowiska – Młodym Okiem”, tom 16., Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok, 2015, str. 98-107.
 9. Burczyk H.: *Przydatność zbóż na potrzeby produkcji energii odnawialnej w świetle wyników doświadczeń*, Problemy Inżynierii Rolniczej, Wydawnictwo Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego w Falentach, Falenty, nr 3 (73), 2011, str. 43-51.

10. Burczyk H.: *Maksymalizacja produkcji biomasy w zrównoważonym zmianowaniu roślin dla gospodarstw energetycznych*, Zagadnienia Doradztwa Rolniczego, Wydawnictwo: Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie Oddział w Poznaniu & Stowarzyszenie Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu, nr 1'13 (71), Poznań, 2013, str. 82-89.
11. Burczyk H.: *Przydatność jednorocznych roślin, uprawianych do produkcji biomasy na potrzeby energetyki zawodowej*, Problemy Inżynierii Rolniczej, Wydawnictwo Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego w Falentach, Falenty, nr 1 (75), 2012, str. 59-68.
12. Burczyk H.: *Przydatność poplonu ozimego oraz kukurydzy i sorgo w plonie wtórnym do produkcji biomasy dla biogazowni*, Problemy Inżynierii Rolniczej, Wydawnictwo Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego w Falentach, Falenty, nr 2 (80), 2013, str. 87-97.
13. Podkówka W.: *Biopaliwa dziś i jutro*, Kukurydza, Wydawnictwo: Polski Związek Producentów Kukurydzy, Poznań, nr 2 (31), 2007, str. 4-35.
14. Kołodziej B., Matyka M. (red.): *Odnawialne źródła energii. Rolnicze surowce energetyczne*, Wydawnictwo PWRiL, Poznań, 2012, str. 314-337, 359-369, 499, 518-521.
15. Podkówka W., Podkówka Z.: *Substraty dla biogazowni rolniczych*, Wydawnictwo Agroservis, Warszawa, 2010.
16. Lipski S.: <http://www.kukurydza.org.pl/siew.php> [dostęp: 7.12.2014r.]
17. Michalski T. (red.): *Problemy agrotechniki oraz wykorzystania kukurydzy i sorgo*. Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Poznań, 2008.
18. Michalski T.: *Kukurydza źródłem surowca dla różnych gałęzi*

- przemysłu*, Wieś Jutra nr 6 (47), Warszawa, 2002, str. 53-55.
19. Michalski T.: *Kukurydza - doskonały surowiec do produkcji biopaliw*, Kukurydza nowe możliwości, Wydawnictwo Agro Serwis, Warszawa, 2007, str. 3-9.
 20. Michalski T.: *Kukurydza doskonały surowiec do produkcji bioetanolu i biogazu*. Forum Producentów Surowców Rolniczych POLAGRA Agropremiery, Poznań, 2007, str. 5-8.
 21. Lewandowski W. M., Ryms M.: *Biopaliwa. Proekologiczne odnawialne źródła energii*, Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2013, str. 166-173, 176-180, 188-189.
 22. Majtkowski W.: *Sorgo i szczaw*, Agroenergetyka, nr 2, Warszawa, 2007, str. 9-10.
 23. www.nextsteppe.com [dostęp: 20.02.2016r.].
 24. Główny Urząd Statystyczny: *Rocznik Statystyki Międzynarodowej*, Warszawa, 2012.
 25. Burczyk H.: *Przydatność wybranych odmian żyta uprawianego w poplonach ozimych do produkcji biogazu*, Zagadnienia Doradztwa Rolniczego, Wydawnictwo: Centrum Doradztwa Rolniczego w Brwinowie Oddział w Poznaniu & Stowarzyszenie Ekonomistów Rolnictwa i Agrobiznesu, nr 4'15 (82), Poznań, 2015, str. 85-91.
 26. Woś A.: *Klimat Niziny Wielkopolskiej*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań, 1994.
 27. Sadowski M.: *Klimatyczny bilans wodny (II – 2B)*. [w:] Leszczycki S. (red.): *Atlas zasobów, walorów i zagrożeń środowiska geograficznego Polski*. Polska Akademia Nauk, Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania, Wyd.: Agencja Reklamowo- -Wydawnicza A. Grzegorzczak, Warszawa, 1994.

28. Chmiel J., Kasprowicz M. (red.): *Flora i roślinność środkowej Wielkopolski. Przewodnik do ćwiczeń terenowych*, Wydawnictwo naukowe UAM, Poznań, 2004, str. 12-22.
29. Bednarek R., Prusinkiewicz Z.: *Geografia gleb*. Wydawnictwo PWN, Warszawa, 1997.
30. Szulc R., Dach J. (red.): *Kierunki rozwoju ekoenergetyki w polskim rolnictwie*, Polskie Towarzystwo Inżynierii Rolniczej w Krakowie, Kraków, 2014.
31. <https://wyniki.tge.pl/>, [dostęp: 16.02.2016r.].
32. Burczyk H. i in.: *Nawożenie poplonów ozimych jako czynnik intensyfikacji oraz wzrostu produkcji rolniczej*, Pamiętnik Puławski, Nr 42, 1971, str. 32-39.

mgr inż. Maciej Cholewiński¹⁾

Politechnika Wrocławska,
Wydział Mechaniczno-Energetyczny,
Katedra Technologii Energetycznych,
Turbin i Modelowania Procesów
Ciepłno-Przepływowych
Wybrzeże Wyspiańskiego 27, 50-370
Wrocław

¹⁾maciej.cholewinski@pwr.edu.pl

mgr inż. Michał Kamiński²⁾

Uniwersytet Przyrodniczy we
Wrocławiu, Wydział Przyrodniczo-
Technologiczny, Instytut Inżynierii
Rolniczej, Zakład Niskoemisyjnych
Źródeł Energii i Gospodarki
Odpadami,
ul. C. K. Norwida 25, 50-375
Wrocław

²⁾michal.kaminski@up.wroc.pl

Koncepcja wykorzystania technologii biogazowej w celu uzyskania samowystarczalności energetycznej gospodarstwa rolnego

*The idea of obtaining energy self-sufficiency in agricultural
enterprise by biogas technology development*

Słowa kluczowe: *biogazownia, produkcja energii, odnawialne źródła energii,
zagospodarowanie odpadów*

Keywords: *biogas installation, energy generation, renewable energy sources, waste
management*

Streszczenie: Mająca obecnie miejsce transformacja krajowego systemu energetycznego, polegająca na dywersyfikacji mocy wytwórczych oraz stopniowym odchodzeniu od paliw kopalnych, stwarza realne warunki do tworzenia układów biogazowych. Zintegrowane z nimi maszyny i urządzenia pozwalają na realizację, w skali lokalnej, procesu konwersji energii chemicznej powstającego w bioreaktorach, na drodze fermentacji metanowej, paliwa gazowego na energię elektryczną, ciepło i chłód. Co jednak niezwykle istotne, wielkość produkcji poszczególnych form energii oraz ekonomia przedsięwzięcia silnie zależą w ich przypadku m.in. od dostępności substratów, przyjętych rozwiązań technicznych oraz kultury prowadzenia bloku. Przy dotrzymaniu wspomnianych wymagań układy te mogą być tworzone zarówno

na potrzeby pojedynczych gospodarstw lub zakładów rolnych, jak i całych gmin czy spółdzielni. W pracy zaprezentowano wyniki analiz dotyczących możliwości uzyskania samowystarczalności energetycznej przykładowego gospodarstwa rolnego na drodze technicznej implementacji fermentacji metanowej. Obliczono podstawowe parametry projektowanej instalacji, zaprezentowano proponowany schemat technologiczny oraz oszacowano wartości tzw. emisji unikniętych. W artykule opisano również sam proces fermentacji metanowej, przedstawiono zalety i wady tworzenia wykorzystujących go biogazowni, stosowane technologie energetycznego wykorzystania biogazu oraz komercyjne systemy fermentacji metanowej. Przytoczono przykłady polskich układów biogazowych: w Studziance oraz w Gaci Oławskiej. Całość wzbogacono o opis technik komponowania mieszanek substratów oraz wyznaczania popytu i podaży na różne formy energii w obrębie gospodarstwa rolnego.

1. Wstęp

Rozwój obszarów wiejskich, podobnie jak ma to miejsce w przypadku miast, czy też dużych aglomeracji, silnie uzależniony jest od dostępności ludności do źródeł taniej energii elektrycznej i ciepła. Systematycznie modernizujący swój park maszynowy sektor rolnictwa, przychylnie nastawiony na inwestowanie w zaawansowane technologie, wymaga stabilnych, coraz to większych dostaw różnych form energii w możliwie korzystnych cenach.

Wśród prac badawczych oraz wdrożeniowych, dotyczących technologii energetycznych dedykowanych terenom rolniczym, na pierwszy plan w ostatnich latach wysunęła się idea tworzenia lokalnych układów kogeneracyjnych zasilanych biomasą stałą – traktowaną jako materiał odpadowy lub też pochodzącą z upraw roślin energetycznych. Tak obrany kierunek pozwolił na aktywizację działalności przemysłowej na obszarach wiejskich, ograniczenie bezrobocia czy też przeciwdziałanie skutkom lokalnego zaniku napięcia

(powstających w momencie przeciążenia sieci przesyłowej lub też awarii istniejących linii elektroenergetycznych). Co więcej, doskonale wpisywał się on w realizowaną politykę dywersyfikacji źródeł energii oraz ograniczania strat przesyłowych poprzez budowę infrastruktury tzw. energetyki rozproszonej, natomiast stosowane w jej obrębie paliwo - biomasa -zaliczono, w myśl funkcjonującego prawodawstwa, do odnawialnych źródeł energii, przez co zostało one postawione w uprzywilejowanej pozycji w stosunku do alternatywnych technologii energetycznych wykorzystujących kopalne nośniki energii.

Popularnym i ekonomicznie uzasadnionym kierunkiem rozwoju jednostek agroenergetycznych jest spalanie wspomnianej grupy paliw w kotłach grzewczych małej mocy. Powstające na terenach wiejskich nadmiarowe masy słomy, drewna odpadowego czy też pozostałości z produkcji rolnej (kaczanów, łupin, kolb itd.), po uprzedniej waloryzacji [16] mogą stanowić cenny surowiec do produkcji ciepła, wykorzystywanego do ogrzewania budynków, produkcji ciepłej wody użytkowej czy też chłodu. W zależności od przyjętej struktury rolnictwa i leśnictwa oraz aktualnego modelu hodowli zwierzęcej, ich uzysk z danego terytorium może być jednak niewystarczający do pokrycia popytu na poszczególne formy energii.

Interesującą ze względu na swój potencjał energetyczny grupę paliw stanowią odpady zwierzęce oraz niskiej jakości (ze względu na zawilgocenie, obecność patogenów czy też niską wartość opalową) biomasa pochodząca z produkcji zwierzęcej – gnojowica, gnojówka oraz obornik. O ile jest ona praktycznie niemożliwa do zagospodarowania w przypadku technologii spalania, o tyle poddana procesowi fermentacji metanowej pozwala na produkcję paliwa gazowego zawierającego metan

– palny związek, główny składnik gazu ziemnego. Układy do jego wytwarzania – biogazownie – poza samą produkcją gazowego surowca energetycznego niosą ze sobą szereg korzyści środowiskowych, społecznych oraz, o ile są odpowiednio wdrażane począwszy od procesu projektowania, ekonomicznych. Fakt ten został zauważony m.in. w Niemczech, Danii, Austrii czy też we Włoszech, a więc w krajach stanowiących europejskich liderów rynku biogazowego. W przypadku Polski, za początek starań o rozbudowę sektora biogazowego uznać można dzień 10 listopada 2009 roku, kiedy to w ramach wydanej *„Polityki energetycznej Polski do roku 2030”* rząd polski założył powstanie średnio jednej biogazowni w każdej gminie w przeciągu najbliższych 20 lat. Kierunek ten wsparła 13 lipca 2010 roku Rada Ministrów w ramach dokumentu *„Kierunki rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce w latach 2010-2020”*. Także tu zakładano budowanie jednostek energetycznych (o mocach około 1 MW_{el}) opartych na technologii fermentacji metanowej we wspomnianej liczbie. Dało by to blisko 2000 biogazowni o łącznej mocy wprowadzanej do KSE (Krajowego Systemu Energetycznego) na poziomie 2 GW_{el}. Plan ten z dużym prawdopodobieństwem nie zostanie jednak zrealizowany, m.in. ze względu na długotrwałą stagnację w dziedzinie legislacji (brak ustawy o odnawialnych źródłach energii) oraz wciąż niekorzystne czynniki ekonomiczne w przypadku zawodowej generacji energii elektrycznej i ciepła z wykorzystaniem biogazu.

Wraz z dynamicznie rozwijaną polityką proekologiczną nastawioną na zrównoważony rozwój energetyki zawodowej i komunalnej, już od początku XXI wieku w literaturze [1, 2, 6, 10] zaczęła pojawiać się idea tworzenia sieci biogazowni rolniczych

w oparciu o małe, zdecentralizowane jednostki wytwórcze skojarzone wokół lokalnych społeczności – wsi, zakładów produkcji rolno-spożywczej czy też spółdzielni rolniczych. Szereg możliwości technicznych przypisano w tym miejscu pojedynczym gospodarstwom rolnym. Sprawilo to, iż indywidualni inwestorzy rozpoczęli poszukiwania sposobów na określenie minimalnych wymagań gwarantujących im uniezależnienie się od zakupu paliw kopalnych lub też poboru energii z sieci. Wskazywano przykładowo, iż w warunkach krajowych biogaz może gwarantować uzyskanie statusu samowystarczalności energetycznej gospodarstwom prowadzącym hodowlę co najmniej 200 świń, 20 sztuk bydła rогatego lub też 3500 sztuk drobiu [12]. Stanowiło to pewnego rodzaju wyznacznik w przypadku podejmowania się budowy mikrobiogazowni rolniczej „na własnym podwórku”.

Niniejsza praca stanowi studium możliwości uzyskania samowystarczalności energetycznej przykładowego gospodarstwa rolnego z wykorzystaniem technologii biogazowej, bazującej na materiałach odpadowych z realizowanej w jej obrębie działalności rolnej i hodowlanej. Wykonane obliczenia mają na celu wyznaczenie podstawowych wielkości projektowych instalacji do produkcji biogazu z dostępnych na terenie przedsiębiorstwa substratów oraz wskazanie parametrów pracy przykładowych urządzeń energetycznych tworzących indywidualny blok poligeneracyjny w systemie off-grid.

2. Biogazownie rolnicze jako źródło energii na terenach rolniczych

Biogazownie zasadniczo można podzielić na dwa ciągi technologiczne: pierwszy do produkcji, na drodze beztlenowej fermentacji podłoży biogennych, oraz magazynowania biogazu(palnej

mieszaniny gazowej składającej się głównie z metanu i dwutlenku węgla oraz śladowych związków takich jak siarkowodór, amoniak czy też azot), drugi z kolei do jego efektywnej utylizacji – w większości przypadku polegającej na energetycznym wykorzystaniu w maszynach roboczych (silnikach cieplnych). Tak skonfigurowany układ realizuje więc biochemiczną waloryzację biomasy stałej lub płynnej do postaci gazowej oraz pozwala na jej konwersję do użyteczniejszej formy energii – elektryczności, ciepła lub też chłodu.

2.1. Fermentacja metanowa

Pierwszym zasadniczym etapem pracy biogazowni jest wspomniana fermentacja metanowa. Proces ten stanowi ciąg przemian biochemicznych kreowanych przez egzystujące w wilgotnych, bogatych w substancję organiczną siedliskach specyficzne kultury bakterii beztlenowych. Naturalnie zachodzi on m.in. na torfowiskach, w dolnych warstwach wysypisk odpadów, zamkniętych zbiornikach na odpady organiczne czy też żwaczach przeżuwaczy. Co jednak istotne, możliwe jest jego techniczne wykorzystanie np. do celów energetycznych – poprzez stworzenie odpowiednich warunków do ciągłego lub quasi-ciągłego odtwarzania się populacji bakterii metanotwórczych, generujących strumienie mieszaniny gazowej bogatej w metan. Fermentacja metanowa zachodzi w czterech głównych etapach, opisywanych, kolejno, jako hydroliza, kwasogeneza, octanogeneza oraz metanogeneza. Każdy z nich obejmuje działanie różnych grup bakterii, a więc posiada swoje własne wymagania co do preferowanych wartości takich parametrów jak odczyn pH, temperatura czy też skład podłoża do rozwoju mikroorganizmów. Co więc zrozumiałe, cały proces będzie

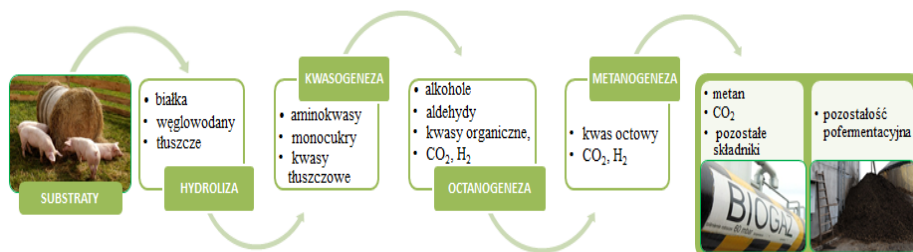
tym wydajniejszy pod kątem produkcji biogazu, im w większym stopniu możliwe będzie sterowanie parametrami poszczególnych faz fermentacji.

Łańcuch przemian złożonych związków w surowym substracie w metan oraz dwutlenek węgla jest dość prosty. W czasie hydrolizy mikroorganizmy trawią wspomniane związki organiczne, przekształcając je w prostsze aminokwasy, cukry i kwasy. Tak ukształtowana pulpa stanowi surowiec dla fazy drugiej, w której bakterie kwasowe przerabiają powstałe związki proste na kwasy organiczne (propionowy, masłowy, octowy) oraz niewielkie ilości wodoru, dwutlenku węgla i alkoholi. W kwasogenezie zmienia się odczyn pH oraz potencjały: redukcyjno-oksydacyjny i alkaliczny buforowy, a tym samym powstają korzystne warunki do zajścia octanogenezy, w której to procesy metaboliczne kolejnej grupa bakterii przekształcają powstałe w poprzedniej fazie kwasy organiczne w kwas octowy oraz kolejne porcje wodoru i dwutlenku węgla – prekursory do zajścia metanogenezy. To właśnie w ostatniej fazie fermentacji bakterie metanowe, zużywając CH_3COOH , CO_2 i H_2 , generują CH_4 oraz bilansowy CO_2 . W surowym biogazie, poza dwoma wspomnianymi związkami, występują także pewne ilości pary wodnej (do 7% objętości), siarkowodoru (do 20 000 ppm), N_2O (do 1 000 ppm), CO (0-2,1%), O_2 (<2%), N_2 (<2%) oraz H_2 (<1%) [6]. Część z nich (H_2S , para wodna) będzie musiała zostać wychwycona z mieszaniny przed jej bezpośrednim wykorzystaniem np. w silnikach spalinowych czy też turbinach gazowych.

Jako że mikroorganizmy metanogenne uznaje się za najbardziej wrażliwe na zmiany parametrów fermentacji metanowej, to właśnie ta grupa narzuca wymagania procesowe w przypadku stosowania systemu jednofazowego (tzn. opartego na jednej komorze fermentacyjnej,

w której, niezależnie od różnic w wymaganiach środowiskowych poszczególnych grup bakterii, zachodzą wszystkie cztery etapy fermentacji) – m.in. optymalny odczyn pH oraz temperaturę. Kosztem spowolnienia dwóch pierwszych etapów (hydrolizy i kwasogenezy) dotrzymuje się stabilny metabolizm bakterii odpowiedzialnych za generowanie metanu (na drodze rozkładu CH_3COOH lub też redukcji CO_2), a tym samym uzyskuje pewien kompromis pomiędzy kosztami inwestycyjnymi oraz przychodami związanymi z generowaniem i wykorzystaniem biopaliwa.

O złożoności procesu fermentacji metanowej i wpływie poszczególnych wielkości fizykochemicznych traktuje literatura specjalistyczna, m.in. [17]. Graficzny, uproszczony schemat przemian w obrębie fermentacji metanowej przedstawia rys. 1.



Rysunek 1. Uproszczony przebieg fermentacji metanowej

Źródło: Opracowanie własne autorów na podstawie [18]

Na efekt końcowy w postaci strumienia biogazu o możliwie wysokiej zawartości metanu wpływ mają dwie zasadnicze grupy parametrów: tzw. środowiskowe oraz procesowe. Do pierwszej z nich zalicza się przede wszystkim zawartość wody(np. w przypadku tzw. fermentacji mokrej na poziomie 85-92% świeżej masy) oraz tlenu (warunki beztlenowe) w fermentującej mieszaninie substratów, temperaturę procesu (najczęściej dobierane są warunki mezofilne,

tj. bakterie egzystujące w temperaturze 32-38°C), odczyn pH (dla instalacji jednofazowych wartość 6,8-7,5), obecność składników pokarmowych (m.in. optymalny stosunek C:N) oraz inhibitorów (poniżej granicznych stężeń: amoniaku, magnezu, metali ciężkich, siarki itd. [12]). Parametry związane z samym prowadzeniem procesu to z kolei graniczne obciążenia komory: suchą masą oraz tzw. objętościowe, hydrauliczny czas retencji (czas przebywania porcji substratu, związany z szybkością rozkładu beztlenowego oraz wydzielaniem się biogazu), dynamiczna równowaga objętościowa oraz intensywność mieszania. Jedynie odpowiednia kombinacja wartości powyższych parametrów, stwarzająca korzystne warunki do odżywiania i rozmnażania się bakterii, gwarantuje prawidłowy przebieg procesu fermentacji i satysfakcjonujący uzysk biogazu.

2.2. Zalety i wady budowy biogazowni rolniczych

Budowa biogazowni oraz implementacja zachodzącego w nich procesu fermentacji metanowej na terenach wiejskich niesie ze sobą szereg korzyści technicznych, społecznych oraz środowiskowych, obejmujących zarówno same przedsiębiorstwa, jak i lokalną ludność. Do czynników przemawiających za tworzeniem tego typu instalacji zaliczyć można m.in.:

- możliwość uzyskania niezależności energetycznej na danym terytorium bądź też wykorzystania biomasy odpadowej do generacji różnych form energii (elektrycznej, ciepła, chłodu) w celach zarobkowych (również z wykorzystaniem systemów wsparcia finansowego ze strony programów rządowych),

- ograniczanie emisji metanu i podtlenku azotu, stanowiących gazy cieplarniane wydzielane na drodze niekontrolowanej fermentacji metanowej w czasie składowania materiałów biogennych, oraz odorów,
- realizację polityki dywersyfikacji źródeł energii, oszczędność paliw kopalnych, redukcję tzw. niskiej emisji (SO_2 , pyły, NO_x , dioksyny i furany, CO), możliwość tworzenia małych sieci ciepłowniczych, poprawę jakości lokalnego środowiska,
- intensyfikację działalności rolniczej (np. poprzez zasiew mniej urodzajnych gleb na potrzeby produkcji roślin energetycznych) oraz energetyczną utylizację biomasy odpadowej (nienadającej się do bezpośredniego spalania),
- możliwość utylizacji odpadów niebezpiecznych i organicznych (m.in. odpady poubojowe oraz osady ściekowe),
- produkcję pełnowartościowych nawozów o stałym składzie i korzystnych parametrach użytkowych (płyn pofermentacyjny, praktycznie bezwonny, cechuje się zwiększoną zawartością azotu amonowego aniżeli materiał wejściowy),
- minimalizację obecności bakterii chorobotwórczych oraz nasion chwastów w nawozach naturalnych w stosunku do stosowania surowej gnojowicy, ograniczenie migracji azotanów i patogenów do wód, zmniejszenie zużycia pestycydów i nawozów sztucznych), efektywne zagospodarowanie gnojowicy.

Pracy biogazowni towarzyszyć mogą również zjawiska negatywne. Mają one miejsce szczególnie w przypadku nieumiejętnie przeprowadzonego procesu projektowego lub też nieodpowiedniej eksploatacji instalacji. Co jednak ważne, są systematycznie ograniczane

lub też nawet eliminowane dzięki rozwojowi technik fermentacji beztlenowej oraz upowszechnianiu związanej z nimi wiedzy na temat poprawnego prowadzenia przedsięwzięcia biogazowego – od produkcji substratu, aż do racjonalnego wykorzystania i składowania pofermentatu. Do wad budowy biogazowni zalicza się:

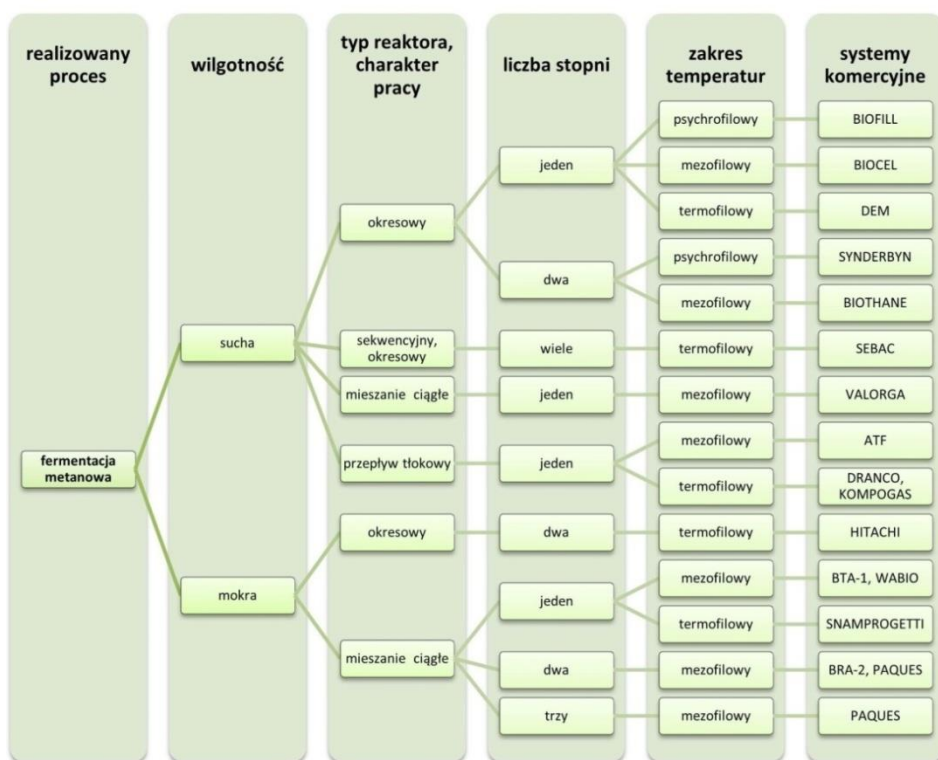
- ryzyko pogorszenia struktury gleby (na skutek zmniejszonego udziału węgla organicznego oraz substancji mineralnych w nawozie) oraz wprowadzania do gleb związków toksycznych (w przypadku kofermentacji osadów ściekowych bez uprzedniej higienizacji),
- problem akceptacji przedsięwzięcia przez lokalne społeczności i organizacje ekologiczne,
- szereg istniejących barier prawnych oraz zawłość procedur inwestycyjnych i przyłączeniowych, zniechęcające do podejmowania się inwestycji biogazowych,
- wymaganą staranną optymalizację kosztową, w wielu przypadkach stanowiącą o czasie zwrotu inwestycji
- w wielu przypadkach uzależnienie uzyskania korzystnych wskaźników ekonomicznych od zewnętrznych systemów wsparcia dla OZE.

Należy pamiętać, iż wraz z rozwojem techniki biogazownie przytoczone wady stopniowo zanikają. Przykładowo, błędy projektowe w pierwszych biogazowniach rolniczych skutkowały emisją odorów ze zbiorników, a tym samym ogólną niechęcią lokalnych społeczności do powstałej instalacji. Kwestia ekonomii procesu generacji energii elektrycznej i ciepła winna podlegać stopniowej poprawie m.in. dzięki upowszechnieniu technologii oraz powstającym programom proekologicznym wymierzonym w przestarzałe jednostki węglowe małej

mocy lub też emitujące związki niebezpieczne (dioksyny, furany, CO, HCl itd.).

2.3. Współczesne technologie biogazowni rolniczych

Wzrost zainteresowania technologiami biogazowymi ze strony inwestorów indywidualnych i zawodowych przyczynił się do opracowania szeregu niezależnych technologii prowadzenia procesu fermentacji metanowej. Ich klasyfikacja uwidacznia różnorodność możliwych do zastosowania wariantów oraz parametrów procesowych.



Rysunek 2. Zestawienie wybranych technologii biogazowych

Źródło: Opracowanie własne autorów na podstawie [21]

Technologie biogazowe dzieli się ze względu na liczbę etapów procesu biochemicznego (jedno-, dwu- lub wielostopniowe), temperaturę

procesu (psychrofilne, mezofilne, termofilne), tryb załadunku wsadu (nieciągły, quasi-ciągły, ciągły) czy też konsystencję fermentującej masy (sucha, mokra). Zestawienie przykładowych układów do produkcji biogazu na skalę przemysłową przedstawiono na rys. 2. W jego obrębie sklasyfikowano układy dedykowane zarówno pojedynczym substratom, jak i ich mieszaninom – także z zakresu odpadów komunalnych oraz osadów ściekowych. Szereg rozwiązań może również podlegać adaptacji na potrzeby małych układów energetycznych. O czym należy jednak pamiętać, część z nich stanowią wciąż układy rozwojowe lub pilotażowe, niespotykane szczególnie na rynkach otwierających się na technologie biogazowe (jak ma to miejsce w przypadku Polski).

Do technologii spoza powyższego schematu zalicza się także instalacje realizujące fermentację mokrą: BIO-STAB, DBA-WABIO, WAASA, BRV, FAL-ANAERGIE, VEGGER, SOLID-DIGEST-ITALBA, BIOLAYER, BIGADAN, BIOTHANE-RIJKENS, PLAUENER, IMK, BIOCUMP, D.U.T., LINDE-KCE, METHACOMP, AQUATHERM, PRETHANE-BIOPAQ, Schmidta-Eggerglussa, Ducelliera-Ismana, Reinholda-Darmstadta oraz suchą: ATF, KOMPOGAS, DRANCO, VALORGA, BEKON, HGG, 3-A [22, 24]. W przypadku technologii niekomercyjnych, charakterystycznych dla instalacji wykonywanych metodą gospodarczą w krajach rozwijających się, zbiór kolejnych rozwiązań zawiera m.in. praca [23].



Rysunek 3. Wizualizacja koncepcji budowy biogazowni rolniczej w Janowicach Wielkich (dolnośląskie)

Źródło: Opracowanie własne autorów

W ramach niniejszego projektu wykorzystuje się typową dla biogazowni rolniczych technologię opartą na fermentacji mokrej z quasi-ciągłym przepływem substratów. Zawiera ona trzy zasadnicze zbiorniki: wstępny, fermentacyjny i wygaszający, zbiornik biogazu, układ kogeneracyjny oraz przestrzeń magazynowe (na substraty sezonowe i pofermentat). Jej relatywnie dobrze poznana specyfika pracy (m. in. automatyzacja) sprawia, iż podejmujący się jej budowy inwestorzy liczyć mogą na trafny dobór parametrów technologicznych bazując zarówno na elementach komercyjnych, jak i tych pochodzących z odzysku lub też adaptowanych z innych zastosowań (zbiorników ciśnieniowych, silników spalinowych, podajników). Fakt ten przemawia za wykorzystaniem wspomnianej technologii także w przypadku pojedynczych gospodarstw rolnych. Autor pracy [20] na jej podstawie dokonał analizy możliwości budowy biogazowni rolniczej o mocy $800 \text{ kW}_{\text{el}}$ brutto w przykładowej gminie wiejskiej na terenie województwa dolnośląskiego. Wizualizację takiej instalacji przedstawiono na rys. 3.

2.4. Biogazownia w Studziance

O ile krajową produkcję biogazu na cele zawodowe można uznać za relatywnie powszechną (do tej pory powstało około 50 biogazowni wykorzystujących jako główny substrat materiały pochodzenia rolniczego), o tyle inwestycje ze strony pojedynczych gospodarstw należą, w warunkach Polski, do pojedynczych przypadków. Jedną z niewielu, aczkolwiek niezwykle interesującą ze względu na przyjęte rozwiązania techniczne, instalacją tego typu jest układ biogazowy w miejscowości Studzianka (gmina Pszczyna, woj. śląskie). Budowana przez 2 lata mikrobiogazownia, znajdująca się na terenie gospodarstwa Państwa Pojów, realizuje proces fermentacji mokrej we wspomnianej w poprzednim rozdziale technologii magazynowo-przepływowej (rys. 4).



Rysunek 4. Biogazownia rolnicza w Studziance

Źródło: Materiały internetowe (www.chronmyklimat.pl) oraz [1]

Biogazownia w Studziance do produkcji biogazu wykorzystuje mieszaninę odpadów rolnych z 40-hektarowego gospodarstwa w ilości (na rok): 690 ton odchodów kurzych (pochodzących od ok. 12 tys. kur

niosek), 320 ton gnojowicy świńskiej (około 300 tuczników) oraz 365 ton kiszonki kukurydzy i trawy. Powstające biopaliwo spalane jest w agregacie kogeneracyjnym (silnik spalinowy z generatorem elektrycznym) o mocy netto 30 kW_{el} oraz 40 kW_t, zasilającym budynki mieszkalne i inwentarskie. Docelowe strumienie w skali roku: 98 tys. m³ biogazu, 180 MWh energii elektrycznej, 1000 GJ ciepła [1]. Co istotne, niemal cała instalacja została wykonana sposobem gospodarczym – komorę fermentacyjną stanowi zaizolowana termicznie cysterna kolejowa, zbiornik pofermentatu z kolei – zbrojony, betonowy zbiornik. Magazynem biogazu jest blaszany silos zbożowy wyposażony w balon z tworzywa sztucznego. Wykorzystanie własnych materiałów i projektu oraz elementów pochodzących z retrofitu (m.in. silnika diesla) pozwoliły na zamknięcie się w kosztach inwestycyjnych na poziomie 400 tys. zł (85% - wkład własny, 15% - kredyt bankowy). W przypadku budowy instalacji przez firmę zewnętrzną, wartość ta wzrosłaby do 0,7-1 mln zł. Miesięczne koszty eksploatacji biogazowni w Studzionce wynosiły w 2011 roku ok. 800 zł. Czas dziennej obsługi – nie więcej niż 1,5 godziny. Biogazownia współpracuje z wydajnym systemem odbioru odpadów zwierzęcych (kanały gnojowe).

Właściciele podczas budowy nie skorzystali z obowiązujących wówczas systemów wsparcia (m.in. świadectw pochodzenia energii elektrycznej i ciepła) [1].

Doświadczenia z projektowania i eksploatacji układu w Studzionce można uznać za kluczowe w propagowaniu idei polskich instalacji biogazowych w obrębie pojedynczych gospodarstw. Sam fakt adaptacji elementów „niestandardowych” w obrębie przedsięwzięcia biogazowego (zarówno od strony bioreaktora, jak i maszyn i urządzeń

energetycznych) może okazać się niezbędny do uzyskiwania korzystnych, konkurencyjnych dla układów spalania biomasy stałej wskaźników ekonomicznych oraz satysfakcjonujących czasów zwrotu inwestycji.

Dwie kolejne polskie mikrobiogazownie w obrębie pojedynczych gospodarstw zlokalizowane są w Wiśle Małej (także w gminie Pszczyna) oraz Szewni Dolnej (gm. Zamość, woj. lubelskie) [28].

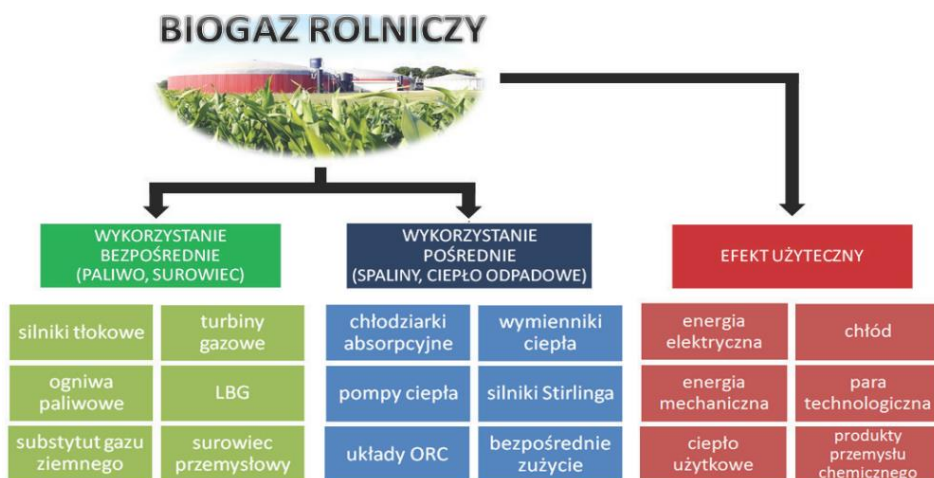
3. Technologie energetyczne wykorzystywane w obrębie biogazowni

Powstający w komorze fermentacyjnej i zbiornikach pośrednich biogaz stanowi cenny surowiec chemiczny oraz wartościowy nośnik energii chemicznej. Biopaliwo gazowe, dzięki implementacji jednej z dostępnych na rynku technologii energetycznych, może podlegać bezpośredniej lub pośredniej konwersji na energię elektryczną lub mechaniczną, chłód (np. w formie wody lodowej) bądź też ciepło użytkowe (gorąca woda, para technologiczna, oleje diatermiczne współpracujące z obiegami ORC – ang. *Organic Rankine Cycle*).

Bogaty w metan biogaz, po oczyszczeniu z pary wodnej oraz związków siarki, najczęściej spalany jest w silnikach cieplnych (tłokowych lub turbinach gazowych), napędzające generatory elektryczne lub inne maszyny wykorzystujące energię mechaniczną obracających się wałów (np. młyny lub taśmociągi). Sam w sobie, po sprężeniu do ciśnienia panującego w sieci gazowej i dodatkowym oczyszczeniu z CO₂, stanowi substytut paliwa sieciowego (typu E, Ls lub Lw). W celu zwiększenia gęstości energetycznej możliwe także jest jego sprężanie powyżej 20 MPa (do formy CBG - ang. *compressedbiogas*) lub ochłodzenie i skroplenie poniżej -161°C (LBG - ang. *liquidbiogas*) [19]. Do rozwojowych technologii bezpośredniego wykorzystania biogazu

zalicza się również stosowanie ogniw paliwowych, m.in. w tzw. układzie hybrydowym [6].

Pracy maszyn energetycznych zasilanych biogazem towarzyszy wydzielanie się ciepła odpadowego w postaci gorących spalin lub cieczy chłodzących. W zależności od temperatury czynników, możliwe jest jego wykorzystanie na cele grzewcze (wymienniki ciepłownicze, pompy ciepła, procesy suszarnicze), chłodnicze (chłodziarki sorpcyjne) lub też do dodatkowej generacji energii elektrycznej (silniki Stirlinga i termoakustyczne, układy parowo-wodne lub ORC). Zestawienie technologii energetycznego wykorzystania biogazu oraz możliwych do uzyskania form energii przedstawiono w ramach rys. 5.



Rysunek 5. Technologie energetyczne w biogazowniach rolniczych

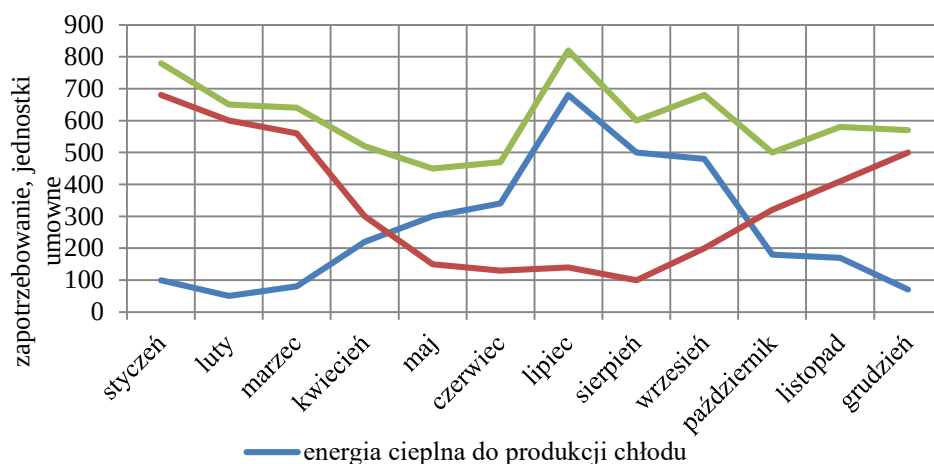
Źródło: Opracowanie własne, uprzednio opublikowane w [11]

Ze względu na ekonomię przedsięwzięcia oraz obecne realia techniczne, w większości przypadków instalacji biogazowych stosuje się tzw. elektrociepłownie kontenerowe - silniki tłokowe sprzężone z generatorem elektrycznym, współpracujące z układem wymienników ciepła zasilających wodne sieci grzewcze lub centrale chłodnicze.

3.1. Trigeneracja

Na opłacalność każdej technologii energetycznej wpływ mają m.in. dyspozycyjność instalacji oraz możliwość realizacji zagadnienia technicznego (generacji energii elektrycznej i ciepła) w warunkach zbliżonych do nominalnych. W przypadku lokalnej jednostki kogeneracyjnej wiąże się to potrzebą zapewnienia stałego popytu na energię elektryczną i, przede wszystkim, ciepło w skali roku. Z tego względu poszukuje się ekonomicznie uzasadnionych źródeł zapotrzebowania na ciepło w okresach letnich, kiedy to wyraźnie spada popyt na tą formę energii ze strony ogrzewania. Jedną z koncepcji zwiększenia popytu jest w tym przypadku wykorzystanie ziębiarek sorpcyjnych, zasilanych np. wodą o temperaturze powyżej 50°C [29]. Obecny rozwój techniczny oraz komercjalizacja tego typu urządzeń sprawia, iż ich wykorzystanie w sektorze komunalnym staje się coraz bardziej uzasadnione.

W ostatnich latach szczególną uwagę przywiązuje się do realizacji tzw. trigeneracji (CHCP – ang. *Combined Heat, Cooling and Power*), czyli tworzenia układów do pokrywania zapotrzebowania, poza elektrycznością oraz ciepłem użytkowym, także na chłód (w postaci wody lodowej lub zimnego powietrza klimatyzacyjnego). Kojarzenie węzłów ciepłowniczych ze wspomnianymi chłodziarkami sorpcyjnymi pozwala bowiem stabilnie uzyskiwanie warunków chłodniczych z wykorzystaniem ciepła. Tak stworzona instalacja energetyczna ma bardziej płaską charakterystykę obciążenia (rys. 6.) w skali roku, a tym samym generacja poszczególnych form energii uzyskuje korzystniejsze wskaźniki ekonomiczne [5].



Rysunek 6. Wykorzystanie ciepła z jednostki trigeneracyjnej w skali roku

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [5]

W analizowanym gospodarstwie proponuje się włączenie w ciąg technologiczny małej chłodziarki absorpcyjnej. Może ona zostać wykorzystana tak do chłodzenia pomieszczeń bytowych, jak i rozbudowy gospodarstwa np. o komory chłodnicze do przechowywania produktów rolnych (w zależności od charakteru produkcji). Szczególnie korzystna byłaby również współpraca z przemysłem spożywczym lub okolicznymi gospodarstwami wykazującymi zapotrzebowanie na chłód. Przyjęty model ogranicza zmienność obciążenia bloku kogeneracyjnego w kolejnych miesiącach, przez co parametry pracy silnika spalinowego uznaje się za stałe na przestrzeni całego roku.

Przy wskaźniku COP_{th} (ang. *Coefficient of Performance*, indeks th – w ujęciu ciepła zasilającego) na poziomie jedności, charakterystycznym dla chłodziarek absorpcyjnych, na każdy 1 kW ciepła dostarczanego do urządzenia przypada około 1 kW generowanej w nim mocy chłodniczej. Uzyskuje się tym samym techniczną alternatywę dla chłodziarek sprężarkowych przy jednoczesnej oszczędności energii

elektrycznej w okresach letnich i wydłużeniu żywotności układów klimatyzacyjnych [25].

3.2. Energetyczne wykorzystanie biogazu w ZGO w Gaci

Przykładem racjonalnego wykorzystania energii chemicznej zawartej w biogazie może być energetyczny układ trigeneracyjny funkcjonujący w Zakładzie Gospodarki Odpadami w Gaci k. Oławy (województwo dolnośląskie), wykorzystujący substraty w postaci biodegradowalnej frakcji odpadów komunalnych. Powstająca w dwóch komorach prostopadłościennych mieszanina gazowa jest oczyszczana i kierowana do jednej z dwóch elektrociepłowni kontenerowych wyposażonych w silniki tłokowe oraz generatory asynchroniczne (nominalna moc elektryczna na poziomie 600 kW każdy). Ciepło spalin jest obierane w serii wymienników i kierowane do układu kolektorowego, gdzie dokonuje się jego rozdział na poszczególne węzły grzewcze (ogrzewanie pomieszczeń oraz produkcja ciepłej wody użytkowej). Co istotne, blok energetyczny współpracuje z chłodziarkami absorpcyjnymi, generującymi moc chłodniczą z wykorzystaniem nadmiarowego ciepła w okresach letnich, a tym samym stanowi on jednostkę trigeneracyjną zasilaną biogazem. Opisany układ przedstawiono na rysunku 7. (od lewej: widok na elektrociepłownię kontenerowe oraz układ przygotowania biogazu; pracujący silnik tłokowy zasilany biogazem; chłodziarka absorpcyjna oraz kolektory ciepłownicze, zlokalizowane w module chłodu i ciepła).



Rysunek 7. Wykorzystanie energetyczne biogazu w ZGO w Gaci

Źródło: Opracowanie własne Autorów dzięki uprzejmości ZGO Gać Sp. z o.o.

4. Substraty stosowane w biogazowniach rolniczych

Jednym z ważniejszych czynników determinujących wartość uzyskiwanych mocy biogazowni, opłacalność inwestycji oraz możliwość wdrażania danej grupy rozwiązań technicznych, jest dostępność substratów - materiałów podatnych na efektywny rozkład beztlenowy w przyjętych warunkach procesowych. Do uzyskania wysokiej dyspozycyjności biogazowni niezbędne staje się zapewnienie stałego (pod względem ilości i jakości) strumienia substratów praktycznie przez cały okres jej eksploatacji (z wyłączeniem okresów zaszczepiania bioreaktora) – najlepiej, ze względu na ekonomie procesu, z wykorzystaniem własnych źródeł oraz strumieni biomasy dotychczas uznawanej za odpadową. Stabilność metanogenezy oraz pozostałych faz fermentacji

beztlenowej (hydrolizy, kwasogenezy, octanogenezy) wymaga bowiem prowadzenia instalacji w stanie umożliwiającym ciągłą, niezaburzoną realizację procesów biologicznych przez mikroorganizmy przy zadanym przepływie substratów. W ten sposób uzysk biogazu jest najwyższy, a wysoka dyspozycyjność układu przekłada się na obniżenie kosztów jego prowadzenia.

Materiały wsadowe, poza źródłem pochodzenia (np. rolne, hodowlane, odzwierzęce, z przemysłu spożywczego, z odpadów komunalnych), dzieli się ze względu na ich wpływ na proces produkcji biogazu. Z tego powodu klasyfikuje się je na podłoża inokulujące (zawierające grupy bakterii fermentacji metanowej, a więc nadające się do zaszczepiania reaktora – np. gnojowica), adhezyjne (pozwalające na tworzenie aglomeratów bakterii w strefie aktywnej – np. średnio rozdrobniona słoma, plewy, obornik), łatwo fermentujące (o krótkim czasie rozkładu podczas fermentacji, np. odchody zwierząt, pozostałości roślinne), trudno fermentujące i niebezpieczne (wymagające higienizacji bądź też o ograniczonych udziałach w mieszaninie, np. odpady z hodowli drobiu, odpady rzeźne), rozcieńczające (o niskiej zawartości suchej masy), zagęszczające (o zawartości suchej masy powyżej 8%), zwiększające wydajność (gwarantujące możliwie wysoki uzysk biogazu w przeliczeniu na jednostkę świeżej masy), stabilizujące (utrzymujące parametry biochemiczne mieszaniny) [6]. W wielu przypadkach tylko dzięki tworzeniu mieszanin o odpowiednich udziałach substratów z poszczególnych grup możliwy staje się satysfakcjonujący uzysk biogazu przy dotrzymaniu parametrów procesowych oraz stabilności wszystkich procesów składowych. W mniejszych biogazowniach w pierwszej kolejności zwraca się w tym miejscu uwagę na zasadność

kojarzenia odpadów zwierzęcych z odpadami z działalności rolniczej (np. gnojowicy ze słomą) [7]. Sprzyja temu charakter działalności wielu gospodarstw, gdzie, na potrzeby hodowli zwierząt, prowadzi się równoległą uprawę roślinną (zbóż, roślin paszowych) [27].

W przypadku niemożności stałej produkcji substratów (np. ze względu na sezonowość zbiorów zbóż), istotne staje się budowanie powierzchni magazynowych w celu składowania roślin zbieranych okresowo (np. kukurydzy czy też słomy, poddawanych procesom kiszenia w celu ograniczenia samoczynnego rozkładu). Dobór powierzchni zasiewu w tym przypadku ma związek z wymogiem pokrycia zapotrzebowania na substrat w okresie między kolejnymi zbiorami.

Zestawienie własności fizykochemicznych różnych substratów stosowanych w biogazowniach zostało przedstawione oraz wyczerpująco omówione w szeregu prac, m.in. [1, 6, 7, 8, 9, 10]. Autorzy niniejszej pracy ograniczają się do wskazania parametrów jedynie materiałów wsadowych wykorzystywanych w projekcie dedykowanym przyjętemu modelowi gospodarstwa rolnego (rozdział 5.).

4.1. Zasady komponowania mieszanin fermentacyjnych

Zasady tak doboru materiałów wsadowych tak w układach monosubstratowych, jak i komponowania mieszanin fermentacyjnych w oparciu o odpady roślinne oraz zwierzęce opierają się na szeregu badań oraz analiz laboratoryjnych. Stosowanie danych literaturowych dotyczących substratów w celu możliwie precyzyjnego przewidzenia uzysku biogazu oraz jakości masy pofermentacyjnej wymaga posiadania szczegółowej wiedzy z zakresu własności fizykochemicznych

i biologicznych poszczególnych substratów oraz precyzyjnego przewidzenia zachodzącej interakcji między nimi [6]. Wartości kolejnych parametrów uzyskuje się najczęściej w warunkach testowych z wykorzystaniem danego surowca. Wskazuje się, iż każda kompozycja materiału wsadowego do bioreaktora winna cechować się takimi właściwościami, jak:

- zawartość suchej masy 12-15% (dla fermentacji mokrej) lub 16-40% (dla fermentacji suchej),
- odczyn pH w zakresie 4,5-6,3 dla faz: hydrolizy i kwasogenezy oraz 6,8-7,5 dla metanogenezy (w przypadku jednej komory fermentacyjnej zaleca się stosowanie parametrów optymalnych dla metanogenezy [7]),
- stabilna pojemność buforowa,
- bilans składników pokarmowych C:N:P:S w proporcji 600:15:5:1 (szczególną uwagę zwraca się przede wszystkim na C:N [8], względem którego podaje się z kolei zakres 6-20 [9]),
- obecność cząstek o charakterze adhezyjnym (w celu umożliwienia powstawania skupisk bakterii), możliwie niska zawartość inhibitorów.

Ze względu na jakość generowanych odpadów rolniczych oraz wymagania procesu fermentacji metanowej, niezbędne staje się niekiedy komponowanie mieszanek substratów pochodzących z różnych źródeł lub też stosowanie dodatków funkcyjnych do mieszaniny (np. w celu obniżenia odczynu pH, zbyt niskiego ze względu na użycie kiszzonek roślin). W celu zwiększenia wydajności instalacji, poprzez wykorzystanie roślin energetycznych, bądź też uzyskania odpowiedniej konsystencji mieszaniny, proponuje się przykładowo wykorzystanie szarej wody do rozcieńczenia masy obecnej w reaktorze. Zagadnienia tego typu muszą

być uwzględnione w badaniach procesu fermentacji metanowej z wykorzystaniem kombinacji substratów już na etapie projektowania.

Jak widać, poza samą wydajnością produkcji biogazu, istotny staje się odpowiedni dobór parametrów procesowych takich jak stosunek C:N, pH, zawartość suchej masy czy też obecność mikroelementów na optymalnym poziomie.

4.2. Możliwości zagospodarowania masy pofermentacyjnej

Zaletą stosowania technologii biogazowych jest fakt, iż wprowadzany do komory fermentacyjnej potencjalny nawóz naturalny (obornik, gnojowica) nie jest bezpowrotnie tracony. Operator wspomnianej instalacji, po fazie fermentacji, ma do rozdysponowania homogeniczną, stałej jakości pulpę pofermentacyjną o korzystnych właściwościach nawozowych [26]. Zawiera ona bardziej przyswajalny dla roślin azot amonowy, jest praktycznie bezwonna i pozbawiona nasion chwastów czy też patogenów. Jej stosowanie pozwala na ograniczanie wykorzystania pestycydów oraz nawozów sztucznych.

Masa pofermentacyjna, w okresach zmniejszonego wykorzystania, może również służyć jako surowiec do produkcji peletów (na drodze suszenia oraz zagęszczania), a więc biopaliwa stałego. W ten sposób zwiększa się potencjalny zysk energetyczny towarzyszący fermentacji metanowej. Co równie interesujące, ich spalanie generuje popioły o wysokiej zawartości składników pokarmowych [26], a więc stanowi źródło mas nawozowych dla rolnictwa.

W wielu przypadkach do efektywnego wykorzystania pulpy pofermentacyjnej niezbędny jest jej uprzedni rozdział na odciek (fazę rzadką, bogatą w mikroelementy, stosowaną w deszczowniach

do nawadniania pól) i tzw. gęstwę (frakcję gęstą, łatwiejszą w magazynowaniu, kompostowaniu – szczególnie w celu potrzeby dodatkowej waloryzacji pod kątem jakości nawozowych – oraz przetwarzaniu na pellety). Proces ten ma miejsce w specjalnych separatorach odśrodkowych lub sitach.

5. Obliczenia biogazowni rolniczej w gospodarstwie rolnym

Zasadniczym celem mniejszej pracy było wykonanie analiz dotyczących możliwości wykorzystania odzwierzęcej oraz roślinnej biomasy odpadowej z prowadzonej działalności rolniczej przykładowego gospodarstwa oraz zaproponowanie optymalnej, dla technik biogazowych, kompozycji substratów (pól zasiewów, pogłównia zwierząt) – całość pod kątem uzyskania całkowitej samowystarczalności energetycznej jednostki terytorialnej. W tym celu wykorzystano inżynierskie metody szacowania uzysku biogazu oraz bilansowania urządzeń energetycznych - analizom nie podlegały czynności, w obrębie których wykorzystuje się paliwa transportowe. W przyjętym modelu proponuje się odejście od wykorzystania gazu ziemnego na rzecz elektryczności (np. kuchenki indukcyjne zamiast gazowych) oraz wykorzystanie ziębiarek sorpcyjnych w celu zwiększenia popytu na ciepło.

5.1. Zapotrzebowanie na energię gospodarstwa rolnego

W obliczeniach przyjęto parametry gospodarstwa rolnego jak w tabeli 1. W celu obliczeń możliwie odpowiadających warunkom polskim założenia projektowe ustalono m.in. na podstawie pozycji [27].

Tabela 1. Przyjęte w obliczeniach parametry analizowanego gospodarstwa

liczba mieszkańców gospodarstwa (os.)	6
powierzchnia domu mieszkalnego	150 m ²
powierzchnia użytków rolnych	50 ha
kierunek hodowli	krowy, tuczniki
kierunek upraw	zboża, kukurydza

Źródło: Opracowanie własne

Do oszacowania zapotrzebowania na energię elektryczną i ciepło (uznaje się odejście od stosowania palników gazowych w miejsce ogrzewania elektrycznego) przyjęto szacunkowe wskaźniki średnioroczne na podstawie [2, 3, 4]:

- energia elektryczna:
 - zastosowania podstawowe w gospodarstwie domowym, tj. oświetlenie, dźwięk, napęd itp. 600 kWh·os⁻¹
 - przygotowanie posiłków 400 kWh·os⁻¹
 - potrzeby produkcyjne (oświetlenie, napędy, konserwacja, pasze, ciepła woda sanitarna) 600 kWh·ha⁻¹
- ciepło:
 - ogrzewanie pomieszczeń, klimatyzacja 650 MJ·m⁻²
 - ciepła woda użytkowa (średnioroczne) 2700 MJ·os⁻²
 - procesy produkcyjne 500 MJ·ha⁻¹

Zapotrzebowanie na poszczególne formy energii gospodarstwa w skali roku, obliczone na podstawie przytoczonych wskaźników, wynosi

ok. 36 MWh energii elektrycznej oraz blisko 200 GJ ciepła. Daje to moce średnioroczne instalacji energetycznej równe 4,1 kW_{el} oraz 6,1 kW_{th}. Podane wartości odnoszą się do odbiorcy końcowego, a więc nie uwzględniają strat energii towarzyszących obrotowi energią oraz potrzeb własnych instalacji energetycznej.

5.2. Wymagany strumień biogazu

Do określenia mocy agregatu kogeneracyjnego oraz wymaganego strumienia biogazu przyjmuje się: 10 godzin pracy agregatu na dzień (przy ciągłej pracy bioreaktora), wartość współczynnika potrzeb własnych biogazowni na energię elektryczną równą 0,1 oraz współczynnika potrzeb własnych biogazowni na ciepło - 0,35, sprawność elektryczną agregatu 30%, sprawność cieplną agregatu 40%.

W wyniku analiz dokonuje się doboru jednostki kogeneracyjnej (z uwzględnieniem potrzeb własnych biogazowni) o mocy nominalnej 11 kW_{el} oraz 14,6 kW_{th}. Dodatkowo, układ wyposaża się w wodny kocioł szczytowy o mocy 8 kW_{th} zasilany oczyszczonym biogazem (sprawność konwersji – 85%). Finalna produkcja instalacji energetycznej wyniesie w skali roku 40 MWh_{el} oraz blisko 300 GJ ciepła.

Przyjmując zawartość metanu w biogazie równą 55% oraz uwzględniając straty energii towarzyszące konwersji energii chemicznej biogazu do form użytkowych u odbiorcy końcowego, wymagany strumień produktu fermentacji metanowej, w skali roku, wyniesie około 33,1 tys. m³ (nie uwzględniając przecieków).

5.3. Uzysk substratów

W analizach przyjmuje się, iż źródłami substratów w gospodarstwie rolnym są produkty podstawowej działalności rolniczej gospodarstwa (słoma, siano, gnojowica, obornik). Pozwoli to spełnić warunek minimalizacji kosztów produkcji substratów, jaki wystąpiłby w przypadku zasiewów roślin na nawóz zielony (np. kukurydzę o liczbie FAO 300). W obliczeniach zakłada się wykorzystanie słomy odpadowej oraz mieszaniny gnojowicy: bydłowej oraz świńskiej. Niska zawartość wody w oborniku wymagałaby dodatkowego rozcieńczania mieszaniny fermentacyjnej wodą pobieraną z sieci wodociągowej lub też zbieraną z opadów deszczu.

W przypadku słomy planuje się wykorzystanie 20% jej mas powstających w skali roku na powierzchni zasiewu 10 ha (zboże). Szacunkowy plon ziarna przyjmuje się na poziomie 8 t/ha, stosunek ziarna do słomy 0,5 t/t. Ze względu na potrzebę magazynowania substratu w celu wyrównania strumienia podawanego do komory fermentacyjnej, zakłada się samoczynny rozpad zielonej masy na poziomie 25% zebranej masy. Obliczony roczny strumień słomy jako substratu w biogazowni wyniesie więc 24 tony.

Tabela 2. Zestawienie dziennych strumieni substratów w projektowanej instalacji

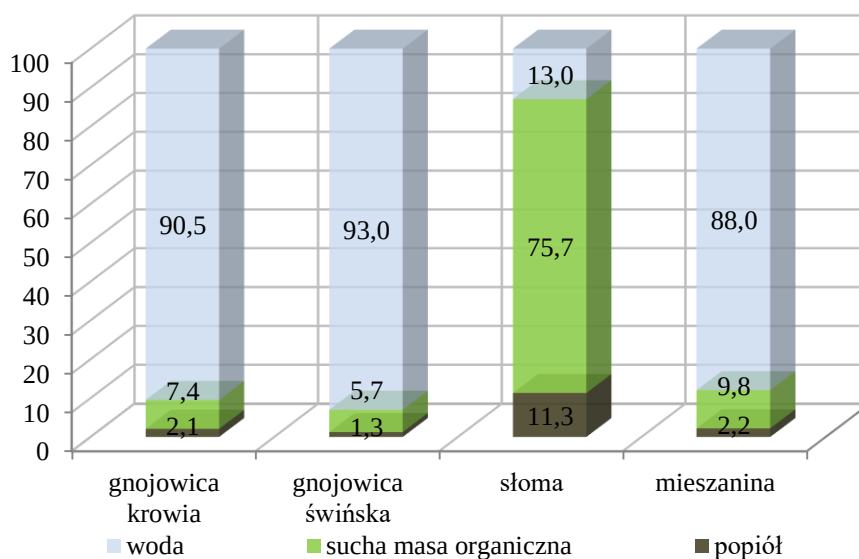
legenda: SM – udział suchej masy w świeżym substracie, SMO – udział substancji organicznej w suchej masie, P_{met} – uzysk biogazu z jednostki masy SMO (przy założonym czasie retencji)

substrat	strumień dzienny świeżego substratu	liczba zwierząt lub pole zasiewu	SM	SMO	strumień suchej masy organicznej	P_{met}
	kg/d	szt. lub ha	-	-	kg/d	m^3/t_{smo}
gnojowica krowia	1000,0	50 szt.	0,095	0,78	74,1	200
gnojowica świńska	480,0	120 szt.	0,07	0,82	27,6	428
słoma	65,8	15 ha	0,87	0,87	49,8	400

Źródło: Opracowanie własne

Drugim substratem w projektowanej instalacji będzie mieszanina gnojowicy świńskiej (120 sztuk tuczników) oraz bydłowej (50 krów mlecznych). System utrzymania obejmujący kanały gnojowe oraz podłogi szczelinowe pozwoli na relatywnie wysoki uzysk gnojowicy w przeliczeniu na jedno zwierzę (średnio 4 kg gnojowicy świńskiej oraz 20 kg krowiej dziennie). Założenia prowadzą do rocznego uzysku strumieni gnojowicy: 175,2 t świńskiej oraz 365 t krowiej.

Zestawienie strumieni poszczególnych substratów zawarto w tabeli 2. Graficzną prezentację udziałów: popiołu, suchej masy organicznej oraz wody w poszczególnych substratach oraz w uzyskanej mieszaninie stanowi z kolei rys. 8.



Rysunek 8. Zestawienie poszczególnych substratów oraz uzyskane proporcje poszczególnych składników podawanej mieszaniny (liczby przy kolejnych kolumnach oznaczają wartości procentowe)

Źródło: Opracowanie własne

5.4. Oznaczenie uzysk u biogazu z założonej bazy substratów

Uproszczony wzór umożliwiający szacowanie uzysku biogazu $\dot{V}_{bio}$ z zadanej mieszaniny substratów przedstawia równanie (1). Zgodnie z rozdziałem 5.3., w obliczeniach przyjmuje się wykorzystanie 3 różnych substratów opisanych w tab. 2. oraz tab. 3.

$$\dot{V}_{bio} = \sum_{i=1}^3 \left(\dot{m}_{subs} \cdot SM \cdot SMO \cdot \frac{P_{met}}{u_{CH_4}} \right)_i \quad (1)$$

gdzie:

$\dot{m}_{subs}$ – strumień substratu,

SM – zawartość suchej masy w świeżym substracie,

SMO – zawartość substancji organicznej w suchej masie obecnej w substracie,

P_{met} – szacunkowy uzysk biogazu z jednostki substancji organicznej obecnej w suchej masie,

u_{CH_4} – udział metanu w powstającym z rozkładu danego substratu biogazie.

Dobrana kompozycja powinna umożliwiać realizację metody magazynowo-przepływowej bez potrzeby rozcieńczania mieszaniny (tj. $SM = 5 \div 15$) oraz gwarantować także uzyskanie optymalnego stosunku $C:N \approx 20 \div 30$. Pozostałe założone parametry procesu fermentacji metanowej:

- stała temperatura (25-38°C w przypadku systemu mezofilnego),
- odpowiednie mieszanie hydrauliczne/mechaniczne,
- $pH = 6,5-7,5$,
- czas retencji HRT = 50-80 dni [6, 10] (ze względu na obecność słomy), w dalszych obliczeniach przyjmuje się 50 dni.

Tabela 3. Parametry poszczególnych substratów pod kątem procesu fermentacji metanowej

substrat	strumień suchej masy organicznej	P_{met}	uzysk metanu	u_{CH_4}	uzysk biogazu	C:N
	kg/d	m^3/t_{smo}	m^3/d	-	m^3/d	-
gnojowica krowia	74,1	200	14,8	0,525	28,2	19,9
gnojowica świńska	27,6	428	11,8	0,535	22,1	34,0
słoma	49,8	400	19,9	0,550	36,2	125,0

Źródło: Opracowanie własne

Parametry procesowe mieszaniny takie jak stosunek C:N oraz SM stanowią średnią ważoną dla przyjętych strumieni substratów i wynoszą: SM = 0,12 oraz C:N = 28,8. W ten sposób dowodzi się, iż przyjęta pierwotnie kompozycja mieszaniny spełnia wymagania dotyczące optymalnego zakresu wartości wspomnianych parametrów.

W tab. 4. zamieszczono zbiorcze wyniki obliczeń dotyczących produkcji biogazu oraz uzyskanych, na drodze doboru udziałów poszczególnych substratów, parametrów mieszaniny poddawanej fermentacji metanowej.

Tabela 4. Parametry mieszaniny substratów w projektowanej biogazowni

strumień dzienny mieszaniny	SM	SMO	strumień suchej masy organicznej	uzysk metanu		u_{CH_4}	uzysk biogazu		C:N
kg/d	-	-	kg/d	m ³ /d	m ³ /rok	-	m ³ /d	m ³ /rok	-
1545,8	0,12	0,80	151,4	46,5	16 979,7	0,54	86,5	31 560,0	28,7

Źródło: Opracowanie własne

5.5. Wielkości komór oraz zbiorników magazynowych

W obliczeniach przyjmuje się użycie dwóch zbiorników fermentacyjnych: wstępnego (czas retencji materiału $HRT_1 = 10$ dni) oraz zasadniczego ($HRT_2 = 40$ dni) [9]. Przy założeniu buforu objętości na aparaturę pomocniczą na poziomie 1,25, gęstości mieszaniny substratów równej 1050 kg/m³ oraz projektowego czasu przechowywania

pofermentatu równego 100 dni uzyskuje się następujące objętości głównych przestrzeni procesowych:

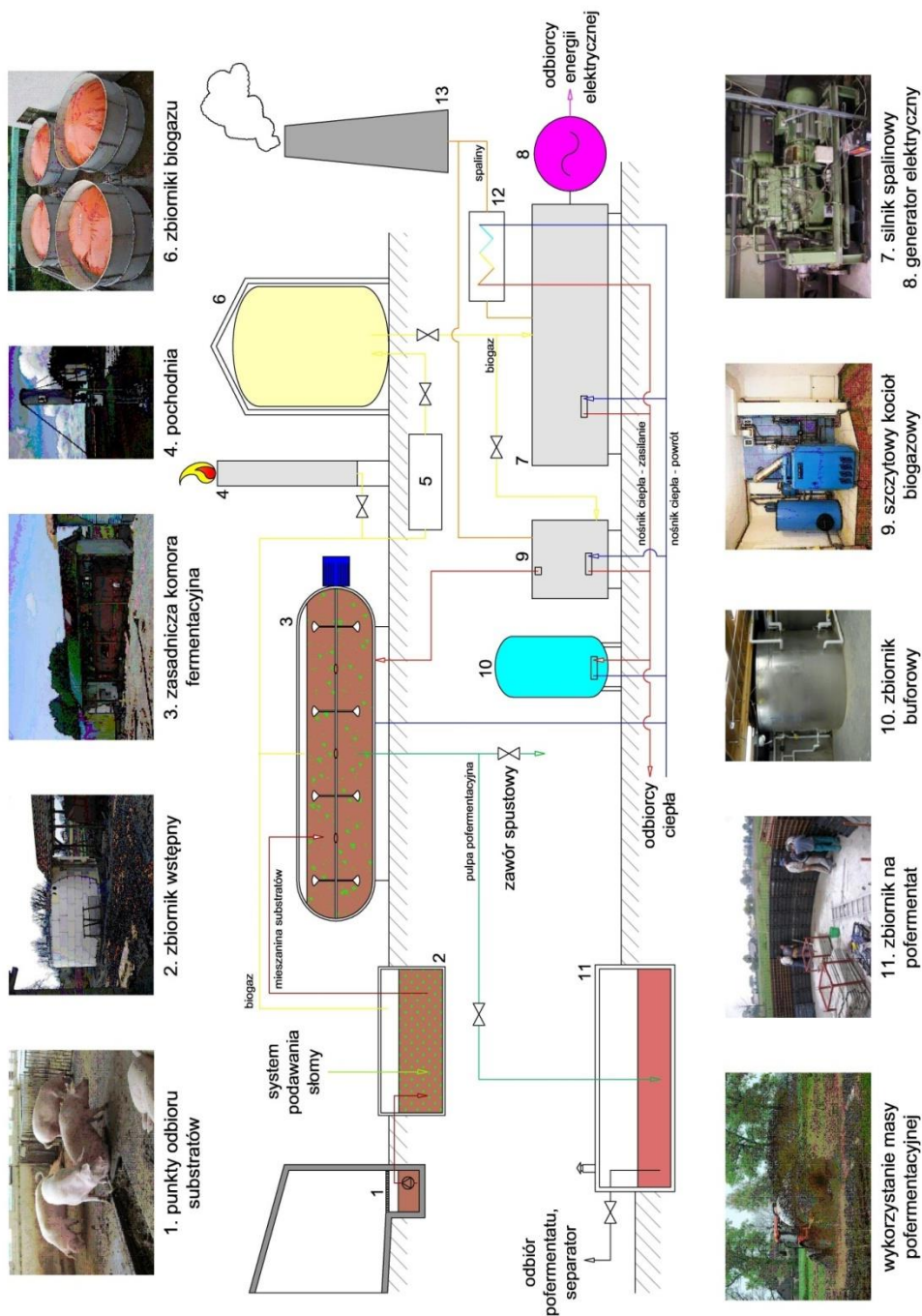
- objętość komory wstępnej (homogenizującej) – $18,4 \text{ m}^3$ (zmodernizowany zbiornik na gnojowicę lub przestrzeń kanału gnojowicowego),
- minimalna objętość zasadniczej komory fermentacyjnej – $73,6 \text{ m}^3$ (np. standardowa cysterna kolejowa),
- objętość zbiornika na pofermentat – 184 m^3 (np. zamknięty betonowy zbiornik o wymiarach $15000 \times 4500 \times 3000$ wyposażony w studzienki z biofiltrami),
- objętość zbiorników na biogaz – 260 m^3 (3-dniowy uzysk biogazu).

Objętość komory fermentacyjnej na poziomie 80 m^3 pozwala na rozważenie koncepcji wykorzystania cysterny kolejowej (wyposażonej w poziome mieszadło łopatkowe) np. o pojemności $82,4 \text{ m}^3$, średnicy wewnętrznej $2,53 \text{ m}$ oraz długości $14,7 \text{ m}$.

Biogaz może być składowany tak w specjalnych dwu- lub trójmembranowych zbiornikach, bądź też w obrębie odpowiednio uszczelnionych przestrzeni magazynowych (np. silosów zbożowych wyściełanych folią gazoszczelną).

5.6. Schemat instalacji biogazowej

Gnojowica z hodowli bydła oraz trzody chlewnej spływa grawitacyjnie do kanału gnojowego (nr 1 na rys. 9.) i jest kierowana do zbiornika wstępnego (2), gdzie ulega zmieszaniu (za pomocą pompy wirowej) z rozdrobnioną słomą.



Rysunek 9. Schemat technologiczny rozpatrywanej instalacji biogazowej

Źródło: Opracowanie własne, wszystkie zdjęcia pochodzą z materiałów internetowych – spis w bibliografii

Po homogenizacji mieszanina jest pompowana (w odpowiednich porcjach, 2 lub 3 razy dziennie) do zasadniczej komory fermentacyjnej (3), a analogiczna porcja pofermentatu jest odprowadzana do zamkniętego zbiornika kompostowego (11), np. poprzez zastosowanie rurociągu przelewowego. Zawartość reaktora jest mieszana 3-4 razy w ciągu doby (przez 10-15 min) za pomocą poziomego mieszadła (alternatywą jest mieszanie hydrauliczne za pomocą pompy).

Powstający w komorach biogaz jest kierowany, przez bezpiecznik cieczowy i układ oczyszczenia biogazu(odsiarczalniki z rudą darniową oraz odwadniacz, nr 5 na schemacie), do zbiornika biogazu (6). W przypadku niedotrzymania jakości biogazu bądź też warunków wyjątkowych paliwo jest spalane w pochodni awaryjnej (4) bądź też wyprowadzane do atmosfery. Ze zbiornika gaz jest kierowany do układu kogeneracyjnego (7), który stanowi zmodernizowany silnik tłokowy sprzężony z generatorem elektrycznym (8) oraz system wymienników ciepła, lub szczytowego kotła gazowego (9).

Energia elektryczna może być magazynowana w baterii akumulatorów bądź też, w przypadku pracy ciągłej mikroelektrociepłowni, kierowana wprost do odbiorników. Generowane ciepło (z układu chłodzenia silnika, chłodnicy oleju, wymienników spalinowych - 12) odbiera woda sieciowa, która zasila zasobnik ciepła (10), układ grzewczy komór fermentacyjnych oraz system centralnego ogrzewania i chłodzenia budynków mieszkalnych i gospodarskich (w przypadku posiadania chłodziarek sorpcyjnych). Spaliny z silnika tłokowego oraz kotła gazowego, po ochłodzeniu i ewentualnej redukcji tlenków azotu, są wyprowadzane do otoczenia przez komin (13). Schemat technologiczny projektowanego układu zaprezentowano w obrębie rys. 9.

5.7. Emisja uniknięta

W celu wykazania korzyści środowiskowych inwestycji biogazowej porównano emisję podstawowych zanieczyszczeń gazowych towarzyszących pracy układów energetycznych w dwóch wariantach:

1. za pośrednictwem proponowanej poligeneracyjnej instalacji biogazowej, generującej energię elektryczną i ciepło z obliczonego strumienia biogazu na potrzeby całkowitego pokrycia popytu na wspomniane formy energii w skali roku,
2. z wykorzystaniem indywidualnego systemu ogrzewania, opartego na spalaniu paliwa stałego w kotłach z rusztem stałym i ciągiem sztucznym (o mocy nominalnej 38 kW, sprawności średniorocznej 75%) oraz przy zakupie energii elektrycznej generowanej w systemowej elektrowni opalanej węglem kamiennym (o sprawności elektrycznej netto 37% i brutto 39,5% oraz przy stratach przesyłowych równych 12%); w kotłach indywidualnych paliwem jest węgiel kamienny o zawartości siarki i popiołu, w stanie roboczym, kolejno 0,4% i 10% oraz o wartości opałowej 24 MJ/kg; straty ciepła towarzyszące lokalnemu zagospodarowaniu wynoszą 20%.

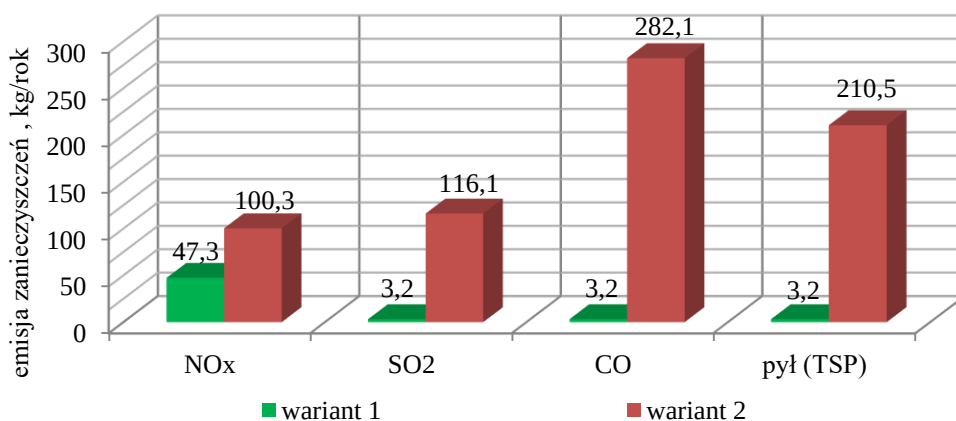
Zapotrzebowanie na energię elektryczną oraz ciepło odpowiada wartościom obliczonym w rozdziale 5.1. W analizach posłużono się wskaźnikami emisji na podstawie [13, 14, 15]. W obliczeniach nie uwzględniono pracy jednostek mechanicznych zasilanych paliwami transportowymi.

W tabeli 5. oraz na rys.10. wskazano na wartości emisji poszczególnych składników dla obu rozpatrywanych wariantów. W przypadku kotłów rusztowych niezbędny do pokrycia popytu na ciepło strumień paliwa wynosi blisko 14 ton.

Tabela 5. Przyjęte w obliczeniach wskaźniki emisji oraz szacowane strumienie zanieczyszczeń

zanieczyszczeni e	WARIANT 1				WARIANT 2	
	elektrownia		kocioł c.o. i c.w.u.		biogazownia	
	<i>kg/MWh brutto</i>	<i>kg/rok</i>	<i>kg/t</i>	<i>kg/rok</i>	<i>g/m³_n</i>	<i>kg/rok</i>
NO_x	1,36	58,6	3,0	41,7	1,5	47,3
SO₂	0,63	27,2	6,4	88,9	0,1	3,2
CO	0,10	4,3	20,0	277,8	0,1	3,2
pył	0,05	2,2	15,0	208,3	0,1	3,2

Źródło: Opracowanie własne



Rysunek 10. Porównanie emisji zanieczyszczeń dla dwóch rozważanych wariantów zasilania

Źródło: Opracowanie własne

W przypadku wariantu 1. emisja NO_x oraz SO₂ związana jest z obecnością w spalanej paliwie związków siarki, przyjętą technologią spalania (determinującą specjację azotu w spalinach) oraz ze sprawnościami wychwytu stosowanych w obrębie elektrowni układów do ochrony atmosfery (związanymi z obowiązującymi normami

emisyjnymi). Poważnym problemem ze względu na zanieczyszczenie środowiska staje się praca jednostek indywidualnych, gdzie brak należytej kontroli procesu spalania przyczynia się do uwolnień znacznych ilości CO oraz pyłów [13]. Zjawisko zaliczane do tzw. niskich emisji jest stopniowo ograniczane, m.in. dzięki wdrażaniu programów proekologicznych, szczególnie w obrębie miast (np. przez zastępowanie jednostek węglowych kotłami gazowymi lub też włączanie kolejnych budynków do miejskich sieci ciepłowniczych). W przypadku wsi problem ten mogą rozwiązać odpowiednie programy środowiskowe zachęcające do odchodzenia od spalania paliw stałych w prymitywnych układach grzewczych.

Zastosowanie jednostki kogeneracyjnej w wariantcie 2 pozwala na produkcję obu form użytkowych energii w jednym procesie technologicznym, co znacząco wpływa na zmniejszenie emisji zanieczyszczeń. Co więcej, oczyszczony biogaz zawiera niewielkie ilości siarki całkowitej, przez co emisja SO₂ jest niska. Relatywnie wysoka kultura pracy silnika tłokowego (m.in. dzięki współpracy z katalizatorem typu TWC – ang. *Three WayCatalyst*) redukuje powstawanie NO_x oraz CO. Emisja pyłu jest znikoma.

6. Podsumowanie

1. W ramach artykułu wykazano, iż możliwe jest stworzenie niezależnego, podstawowego źródła energii elektrycznej, ciepła i chłodu, dedykowanego pojedynczemu gospodarstwu rolnemu posiadającemu biomasę odpadową w postaci gnojowicy i siana, z wykorzystaniem technologii fermentacji metanowej. Małe instalacje biogazowe pozwalają na zagospodarowanie biomasy najbliższej miejsca

- jej powstawania, ograniczając tym samym emisje zanieczyszczeń towarzyszące jej transportowi i waloryzacji.
2. Przedstawiono szereg zalet, także środowiskowych, towarzyszących realizacji wspomnianego przedsięwzięcia oraz wskazano przykładowe kryteria, jakimi należy kierować się podczas doboru udziałów poszczególnych substratów w obrębie mieszaniny.
 3. Przywołany przypadek instalacji ze Studzianki pozwala na ustalenie szacunkowych kosztów inwestycyjnych i operacyjnych tego typu instalacji oraz wysuniecie tezy, iż dzięki wykorzystywaniu poresursowych lub zaadaptowanych z innych technologii elementów strona ekonomiczna przedsięwzięcia staje się konkurencyjna w stosunku do innych, komercyjnych, technologii energetycznych.
 4. Rozbudowa mocy wytwórczych w obrębie gospodarstwa daje techniczne możliwości do sprzedaży nadmiarowej energii elektrycznej i, przede wszystkim, ciepła okolicznym gospodarstwom. Tworzenie sieci przyłączy oraz węzłów musi posiadać jednak korzystne parametry ekonomiczne, niekiedy możliwe do osiągnięcia jedynie dzięki programom wsparcia dla właścicieli odnawialnych źródeł energii. Do dodatkowych źródeł finansowania biogazowi zalicza się opłaty za utylizację odpadów niebezpiecznych (np. osadów ściekowych, odpadów poubojowych) oraz sprzedaż nadmiarowej masy pofermentacyjnej (głównie nawozu).
 5. Oddzielną kwestią staje się dobór technologii. Firmy oferują zarówno instalacje w reżimie quasi-ciągłym (np. magazynowo-przepływowe), jak i okresowym (np. biogazownie kontenerowe). Rozwój nowych koncepcji technologicznych ma na celu redukcję nakładów inwestycyjnych, stopnia skomplikowania instalacji oraz uproszczenia

i zautomatyzowania eksploatacji. Wiele z przedstawionych technologii jest dynamicznie rozwijanych i niewykluczone, iż w najbliższej przyszłości pozwolą one na produkcję biogazu w znacznie korzystniejszych warunkach technicznych i ekonomicznych.

Literatura:

1. Cholewiński M., Ruziewicz A.: *Biopaliwa stale - możliwości zastosowania w gospodarstwach domowych*. Energetyka dla budownictwa - spojrzenie młodych naukowców, Kraków: Creativetime, 2015, s. 84-90.
2. Oniszk-Popławska A. (red.): *Energia w gospodarstwie rolnym*. Instytut na Rzecz Ekorozwoju przy współpracy Instytutu Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2011.
3. Turowski S., Nowowiejski R.: *Analiza układu kogeneracyjnego jako źródła ciepła i energii elektrycznej w modelowym gospodarstwie rolnym*. Inżynieria Rolnicza 1(110), 2009, str. 331-338.
4. Myczko A. i in.: *Budowa i eksploatacja biogazowni rolniczych. Poradnik dla inwestorów zainteresowanych budową biogazowni rolniczych*. Wydawnictwo ITP, Warszawa, 2011.
5. Romaniuk W., Biskupska K.: *Biogazownia rolnicza krok po kroku*. Hotpress Sp. z o.o.
6. Szkarowski A.: *Spalanie gazów. Teoria, praktyka, ekologia*. Wydawnictwo Naukowo-Techniczne, Warszawa 2014.
7. Magrel L.: *Prognozowanie procesu fermentacji metanowej mieszaniny osadów ściekowych oraz gnojowicy*. Rozprawy Naukowe Nr 112, Wydawnictwo Politechniki Białostockiej, Białystok 2004.

8. Czerwińska E., Kalinowska K.: *Warunki prowadzenia procesu fermentacji metanowej w biogazowni*. Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna, 2/2014, str. 12-14.
9. Jędrczak A.: *Biologiczne przetwarzanie odpadów*. Przegląd Komunalny nr 6/2001.
10. Veeken A.: *Digestion and composting of domestic and market biodegradable waste in Kotte MC*. Urban Environment Group, Department of Environmental Sciences, Wageningen University, Wageningen, 2005.
11. Kwaśny J., Banach M., Kowalski Z.: *Przegląd technologii produkcji biogazu różnego pochodzenia*. Czasopismo Techniczne Chemia, Zeszyt 17, rok 109, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, 2012, str. 83-102.
12. Muller C.: *Anaerobic Digestion of Biodegradable Solid Waste in Low- and Middle-Income Countries*. Eawag, Water and Sanitation in Developing Countries (Sandec), Dubendorf, 2007.
13. Cholewiński M.: *Projekt biogazowni rolniczej*. Praca dyplomowa stopnia inżynierskiego, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczno-Energetyczny, promotor: prof. dr hab. inż. Wiesław Rybak, Wrocław, 2012.
14. Kowalczyk-Juśko A.: *Biogazownie szansą dla rolnictwa i środowiska*. Fundacja na rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa.
15. Johansson N.: *Production of liquid biogas, LBG, with cryogenic and conventional upgrading technology – description of systems and evaluations of energy balances*. Master thesis, LundsUniversitet (Szwecja), Department of Technology and Society Environmental and Energy Systems Studies, 2008.

16. Cholewiński M.: *Energetyczne wykorzystanie biogazu rolniczego*.
Dokonania Młodych Naukowców, 2014 , nr 2, str. 388-393.
17. Pyrka P.: *Modelowanie trójzłożowej chłodziarki adsorpcyjnej*.
Zeszyty Energetyczne. T. 1, Problemy współczesnej energetyki.
Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 2014,
str. 207-216.
18. Zwierzchowski R., Malicki M.: *Zastosowania w budynkach
biurowych chłodziarek absorpcyjnych zasilanych z miejskiego systemu
ciepłowniczego z akumulatorem ciepła w źródle*. Rynek Energii
2/2014, str. 93-97.
19. Stefaniak J. i in.: *Aspekty środowiskowe zastosowania chłodziarki
absorpcyjnej w układach klimatyzacyjnych*. Proceedings of ECOpole,
6(1), 2012, str. 395-400.
20. Romaniuk i in.: *Biogazownie rolnicze*. Seria “Technologie energii
odnawialnej”, Oficyna Wydawnicza Multico, Warszawa 2011.
21. Główny Urząd Statystyczny: *Rocznik Statystyczny Rolnictwa 2014*,
Warszawa 2015.
22. Dioha I.J. i in.: *Effect of carbon to nitrogen ratio on biogas
production*. International Research Journal of Natural Sciences, vol. 1,
no. 3, 2013, str. 1-10.
23. *Biogas Digest*. Volume I: Biogas Basics.
24. Czekala W. i in.: *Analiza możliwości zagospodarowania pofermentatu
z biogazowni*. Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna, nr 4, 2012,
str. 13-15.
25. Subański R., Turowski S.: *Opracowanie wskaźników jednostkowego
zużycia paliw i energii w sektorze komunalno-bytowym – strefa*

- wiejska. Politechnika Szczecińska, Katedra Technika Ciepła, maszynopis powielony, Szczecin 1983.
26. Turowski S., Nowowiejski R.: *Przyzagrodowa elektrownia wiatrowa źródłem taniej energii elektrycznej*. Inżynieria Rolnicza 7(125), 2010, str. 215-222.
 27. KOBiZE: *Wskaźniki emisji zanieczyszczeń ze spalania paliw. Kotły o mocy nominalnej do 5 MW*. Warszawa, styczeń 2015.
 28. Elektrownia Opole, *Deklaracja Środowiskowa wg rozporządzenia EMAS*, wydanie VII, lipiec 2011.
 29. Schmidt A., Schmidt M.: *Raport o oddziaływaniu przedsięwzięcia: „Budowa biogazowni do przetwarzania odpadów poubojowych, gnojowicy i innych odpadów organicznych lub roślin energetycznych przy P.W. Kier Elżbieta Klimacka zakład przetwórstwa mięsnego w Jastrzębiu gm. Drzycim, na dz. Nr 4/12” na środowisko*. Grudzień 2008.

Wykorzystane materiały internetowe (data pobrania: 18.02.2016):

www.inzynierbudownictwa.pl/	www.pojezierzegostyninskie.pl/pliki/file/broszura.pdf
www.biogazownia.pl/	www.prasa.gutpr.pl/WolfSystem/BiogazowniaStudzionka/
www.przedsiębiorcarolny.pl/	www.builditsolar.com/
www.chronmyklimat.pl/projekty/wiadomosci/234/biogazownia-w-studzionce/	
www.bip.drzycim.pl/bip_download.php?id=2650/	

inż. Sylwia Bartnikowska^{1,3)}, dr inż. Damian Janczak¹⁾, inż. Jakub Frankowski^{1,2)}

¹Instytut Inżynierii Biosystemów, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
ul. Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań

²Pracownia Roślin Energetycznych
Instytut Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich
ul. Wojska Polskiego 71b, 60-630 Poznań

³⁾syll.mal@vp.pl

Określenie potencjału energetycznego biomasy słonecznika bulwiastego i rdestowca sachalińskiego pochodzącej z nieużytków

Determination of the energy potential of Jerusalem artichoke and Fallopia sachalinensis biomass obtained from uncultivated lands

Słowa klucze: *potencjał energetyczny, biomasa, rośliny energetyczne, słonecznik bulwiasty, rdestowiec sachaliński, topinambur, nieużytki*

Keywords: *energy potential, biomass, energy crops, Jerusalem artichoke, fallopia sachalinensis, topinambur, Wastelands*

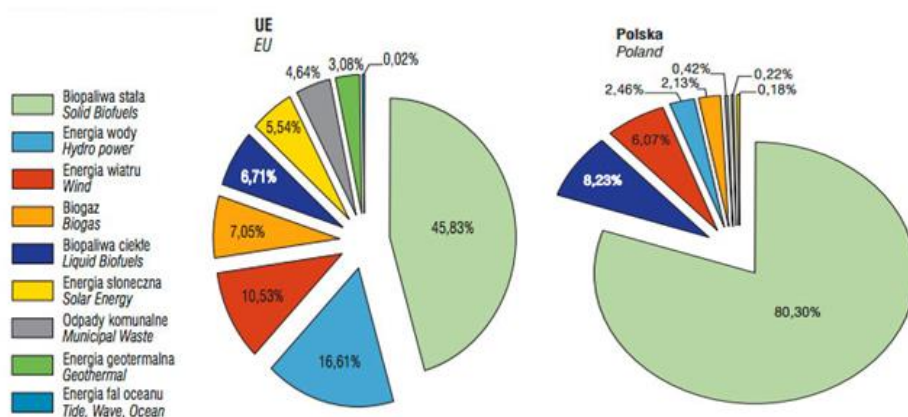
Streszczenie: Słonecznik bulwiasty (*Helianthus tuberosus* L.) oraz rdestowiec sachaliński (*Reynoutria sachalinensis* Nakai) to gatunki zaliczane do grupy wieloletnich roślin energetycznych, uprawianych w celu konwersji zawartej w nich energii. Są one jednak bardzo ekspansywne i w wielu regionach kraju rozprzestrzeniły się poza plantacje. Obecnie rośliny te występują także na nieużytkach oraz zarastają grunty orne. Jednostki samorządu terytorialnego zazwyczaj zwalczają jedynie rośliny bezpośrednio zagrażające ludziom, takie jak barszcz Sosnowskiego. Z tego powodu powyższe gatunki mogą dynamicznie się rozwijać. O skali problemu może świadczyć fakt uznania rdestowca sachalińskiego za gatunek inwazyjny w Polsce, który jest groźny dla rodzimej flory. Natomiast słonecznik bulwiasty, zwany też zwyczajowo topinamburem, jest przez Europejską i Śródziemnomorską Organizację Ochrony Roślin gatunkiem postulowanym do objęcia monitoringiem. Wykorzystanie biomasy tych roślin pozwoliłoby więc na jednoczesne osłabienie ich populacji na danym terenie oraz pozyskanie surowca,

który następnie mógłby być przeznaczony do produkcji biopaliw stałych. W artykule zaprezentowano wyniki badań określających potencjał energetyczny biomasy rdestowca sachalińskiego i słonecznika bulwiastego pochodzącej z nieużytków. Doświadczalnie określono zawartość suchej masy, suchej masy organicznej, ciepło spalania oraz wartość opałową.

1. Wstęp

W ostatnich latach wzrasta zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii. Jest to spowodowane niepokojem związanym z bezpieczeństwem energetycznym naszego kraju jak również gwałtownym wzrostem emisji dwutlenku węgla do atmosfery. Zwiększone zapotrzebowanie na energię, szybki rozwój przemysłu, a także wzrost liczby ludności powodują, iż priorytetem Unii Europejskiej jest wytwarzanie bioenergii nieszkodzącej środowisku [1]. Zgodnie z Dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE Polska jest zobowiązana zwiększyć udział energii ze źródeł odnawialnych w zużyciu energii końcowej do 15% w 2020r. w odniesieniu do 1995 r. W celu zwiększenia udziału odnawialnych źródeł w produkcji bioenergii w przeważającej większości wykorzystywana będzie biomasa. Według najnowszej wersji ustawy z dnia 20 lutego 2015r. o odnawialnych źródłach energii definiowana jest ona jako „stałe lub ciekłe substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które ulegają biodegradacji, pochodzące z produktów, odpadów i pozostałości z produkcji rolnej i leśnej oraz przemysłu przetwarzającego ich produkty (...)”. Udział biomasy jako nośnika energii odnawialnej w łącznym pozyskaniu energii pierwotnej ze źródeł odnawialnych w 2013 r. był dominujący. W Unii Europejskiej biopaliwa stałe stanowiły 45,83%, a w Polsce 80,30% energii pierwotnej pozyskanej ze źródeł odnawialnych [Rys.1]. Wartości te potwierdzają aktualny

wzrost zainteresowaniem zagospodarowania substratów odpadowych oraz tworzeniem różnego rodzaju biomasy stałej. Szacuje się, iż w nadchodzących latach od 10% do 45% ogólnej energii pierwotnej będzie pochodzić z biomasy [1].



Rysunek 1. Udział nośników energii odnawialnej w łącznym pozyskaniu energii pierwotnej ze źródeł odnawialnych w 2013r.

Źródło: http://www.teraz-srodowisko.pl/images/illustrations/wiadomosc/999_encart_zoom.jpg

dostęp: 20.02.2016

Biorąc pod uwagę ograniczone możliwości wykorzystywania słomy z rolnictwa, drewna odpadowego pochodzącego z przemysłu drzewnego czy też leśnego, dla osiągnięcia celów zawartych w „Strategii rozwoju energetyki odnawialnej”, konieczne będzie zakładanie plantacji roślin energetycznych [2].

Aktualnie w Polsce ma miejsce rozwój uprawy roślin drzewiastych, charakteryzujących się szybkim wzrostem. W przewarżającej ilości dotyczy to kilku gatunków wierzb. Inwestycja w produkcję biomasy wyłącznie na cele energetyczne daje możliwość wykorzystywania gleb mało urodzajnych lub skażonych, a tym samym stwarza szansę wprowadzania alternatywnej produkcji rolnej [3].

2. Przegląd literatury

2.1. Rośliny energetyczne

Rośliny energetyczne to gatunki uprawiane w celu konwersji zawartej w nich energii. Poprzez ich przetwarzanie otrzymujemy różnego rodzaju biopaliwa i biokomponenty, które następnie służą do wytworzenia energii cieplnej lub elektrycznej. Głównymi cechami charakteryzującymi tę grupę roślin są bardzo szybki wzrost oraz wysoka wartość opałowa. Oprócz tego, gatunki roślin energetycznych powinny odznaczać się następującymi właściwościami: rozmnażać się generatywnie, być odporne na niskie temperatury oraz długotrwałe susze. Wskazane jest także, aby wzrost roślin był jak najszybszy w początkowym okresie wegetacji. Łodygi roślin energetycznych powinny cechować się ponadto dużą zawartością suchej masy w części nadziemnej [4].

W Polsce wyróżniamy trzy grupy [tabela 1.] wieloletnich roślin energetycznych: drzewa i krzewy, trawy oraz byliny [1,5].

Tabela 1. Grupy roślin energetycznych w warunkach klimatycznych Polski

Rośliny energetyczne		
Drzewa i krzewy	Trawy	Byliny
» Wierzba (<i>Salix</i> L.), » Topola (<i>Papulus</i> L.), » Robina akacyjowa (<i>Robinia pseudoacacia</i> L.)	» Miskant olbrzymi (<i>Miscanthus x giganteus</i>) » Miskant chiński (<i>Miscanthus sinensis</i> Andersson), » Spartina preriowa (<i>Spartina pectinata</i> Link)	» Ślaziołec pensylwański (<i>Sida hermaphrodita</i> (L.) Rusby), » Rdestowiec japoński (<i>Reynoutria japonica</i> Houtt.), » Rdestowiec sachaliński (<i>Reynoutria sachalinensis</i> Nakai)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie [9,10]

Do grupy wieloletnich roślin energetycznych, które wykazują pożądane właściwości, zaliczany jest między innymi słonecznik bulwiasty (*Helianthus tuberosus* L.) oraz rdestowiec sachaliński (*Reynoutria sachalinensis* Nakai). Obie te rośliny są miododajne, charakteryzują się wysoką wartością opałową, oraz odpornością na choroby i szkodniki. Ponadto nie mają one dużych wymagań glebowych [4].

Wraz z rozwojem i zwiększaniem się ilości plantacji roślin energetycznych, zwiększają się korzyści ekologiczne dla środowiska. Zastępując konwencjonalne źródła energii energią odnawialną redukujemy emisję dwutlenku węgla oraz dwutlenku siarki. Według literatury areal o powierzchni 100 ha, na którym znajduje się plantacja roślin energetycznych, jest w stanie zastąpić około 1,5 tysiąca ton konwencjonalnego paliwa. Rocznie, podczas procesu spalania węgla

energetycznego (1,5 tys. ton), powstaje około 3,5 tys. ton dwutlenku węgla i około 30 ton dwutlenku siarki. Podane wartości wskazują, iż inwestując w odnawialne źródła energii w postaci roślin energetycznych przyczyniamy się do zmniejszenia emisji szkodliwych gazów do atmosfery [6].

2.2. Słonecznik bulwiasty

Słonecznik bulwiasty (*Helianthus tuberosus* L.) należy do rodziny astrowatych (*Asteraceae*) i jest blisko spokrewniony ze słonecznikiem zwyczajnym (*Helianthus annuus* L.). Pochodzi z Ameryki Północnej, skąd od nazwy północnoamerykańskiego plemienia Indian Tupinamba wywodzi się jego powszechna nazwa – topinambur [7,8]. Słonecznik bulwiasty ma wysoką zawartość składników odżywczych. Roślina ta była jednym z podstawowych źródeł pożywienia dla ludzi oraz zwierząt [3].

W Polsce gatunek ten pojawił się w XIX wieku. Początkowo traktowany był jako roślina dekoracyjna. Po wielu latach odkryto wiele innych zastosowań słonecznika bulwiastego [9].

Topinambur ma niewielkie wymagania klimatyczne. Termin sadzenia rośliny przypada na jesień lub wczesną wiosnę. Ciepła i słoneczna pogoda jest najbardziej korzystna dla wegetacji rośliny. Bulwy topinamburu mają wysoki potencjał produkcyjny. Plon bulw to około 40 t s.m. · ha⁻¹; zaś łodyg – od 10 do 20 t s.m. · ha⁻¹ [10].

Liście oraz łodygi słonecznika bulwiastego są wykorzystywane jako pożywienie dla zwierząt gospodarskich. Duże liście o długości wynoszącej ponad 20 cm, w górnej części pędu przyjmują kształt podłużny, owalny lub lancetowaty. W dolnej części łodygi kształt ten zmienia się; liście są owalno-sercowate, spiczaste oraz szerokie. Łodygi

słonecznika bulwiastego są wzniesione, sięgają wysokości od 2 do 4 m, a ich średnica wynosi do 3 cm. Zarówno liście jak i łodygi pokryte są szorstkimi włoskami. Są one wykorzystywane również jako kiszonka, surowiec do produkcji pasz czy przerabiane są na sieczkę stanowiącą podłoże wykorzystywane do produkcji grzybów jadalnych [9,11].

Bulwy topinamburu są niewielkie, ich średnia masa wynosi około 20-25 gramów. Mogą mieć różny odcień w zależności od odmiany. W Polsce zarejestrowane są dwie odmiany. ‘Albik’, której kolor miąższu, jak również barwa skórki bulwy, ma kolor biały oraz ‘Rubik’, której skórka bulwy ma kolor czerwono-fioletowy. W świeżej masie bulw topinamburu znajduje się około 26% suchej masy [12].



Rysunek 2. Słonecznik bulwiasty

Źródło: <http://www.leroymerlin.pl/porady/ogrod/swiat-roslin/topinambur-czyli-słonecznik-bulwiasty,e4620,11496.html> dostęp: 21.02.2016

Głównym składnikiem tych roślin jest inulina, która powoduje wzrost stężenia soku komórkowego znajdującego się w roślinie, co przyczynia się do zwiększenia odporności na mróz. Słonecznik bulwiasty dobrze znosi niskie temperatury sięgające nawet -30°C [11,13].

Bulwy tej rośliny poprzez swoje właściwości fizykochemiczne są surowcem do produkcji alkoholu oraz syropów fruktozowych.

Topinambur ma wiele zastosowań zarówno w przemyśle spożywczym jak i farmaceutycznym. Może być również wykorzystany do produkcji brykietów czy peletów, jako roślina energetyczna [9,11].

2.3. Rdestowiec sachaliński

Rdestowiec sachaliński (*Reynoutriasachalinensis Nakai*) to była pochodząca z Azji Wschodniej. W Europie gatunek ten pojawił się stosunkowo niedawno, bo w latach 1890-1940. Roślina ta w wielu krajach uznawana jest za chwast [4]. Rdestowiec charakteryzuje się dużą zawartością suchej masy. Rozmnaża się w sposób dość rzadko spotykany, ponieważ w rozmnażaniu wegetatywnym uczestniczą korzenie [4].

Wegetacja rośliny w Polsce ze względu na warunki klimatyczno-glebowe rozpoczyna się późno, ponieważ dopiero na przełomie kwietnia-maja. Główną cechą charakterystyczną rdestowca sachalińskiego jest bardzo szybki wzrost oraz szybkie rozprzestrzenianie się. Wymaga on systematycznej pielęgnacji, jak również zbierania plonów w odpowiednim czasie, w celu zapobiegnięcia niekontrolowanemu rozprzestrzenianiu i inwazyjności rośliny [9]. W przypadku, gdy rdestowiec sachaliński przedostanie się do środowiska naturalnego, powoduje zagrożenie dla gatunków rodzimych oraz siedlisk przyrodniczych [4]. Roślina ta znajduje się na liście roślin inwazyjnych. Ma on bardzo małe wymagania glebowe, gdyż może rosnąć na glebach lekkich, bardzo lekkich oraz chemicznie zanieczyszczonych. Roślina ta w uprawie celowej wymaga odpowiedniego nawożenia, ponieważ wyjaławia glebę.



Rysunek 3. Rdestowiec sachaliński

Źródło: http://ogrod-koryciny.ziolowyzakatek.pl/?page_id=2225,

http://www.szkolnictwo.pl/szukaj,Rdestowiec_sachali%C5%84sk dostęp: 22.02.2016

W przeciwieństwie do słonecznika bulwiastego roślina ta nie jest odporna na bardzo niskie temperatury. Brak opadów atmosferycznych również powoduje niekorzystne skutki w rozwoju rośliny [10]. Rdest sachaliński jest rośliną osiągnającą wysokość około 3-4 m. Ma bardzo duże liście, o zabarwieniu jasnozielonym i długości około 150-300 mm. Szerokość liści mieści się w zakresie 70-150 mm. Przybierają one sercowaty kształt [4]. Łodygi rośliny są wzniesione oraz łukowato wygięte. Rdestowiec sachaliński jest podobny wyglądem do rdestowca japońskiego (*Reynoutria japonica* Houttuyn).

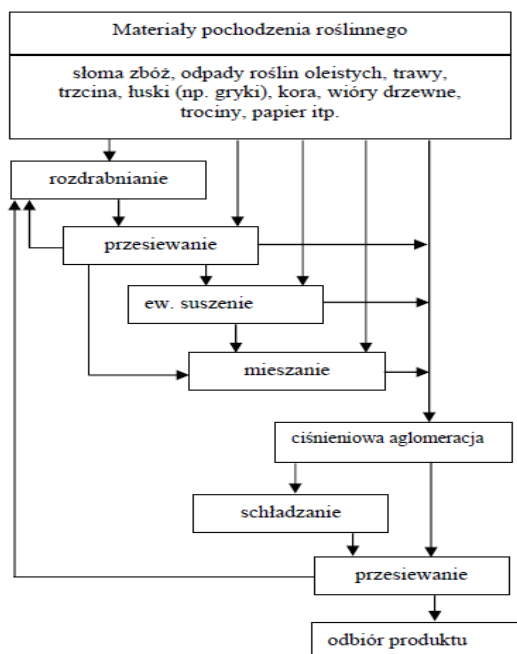
Rdestowiec sachaliński pomimo swoich wad w postaci dużej inwazyjności oraz ekspansywności znajduje wiele różnych form zastosowania. Pełne plonowanie uzyskuje w trzecim roku uprawy. Na żyznych glebach plon wynosi 15-30 t s.m.·ha⁻¹ i tym samym przewyższa wysoki plon bulw słonecznika bulwiastego. Jednak uprawiany na glebach średnich oraz skażonych daje plon podobny do roślin pastewnych, które uprawiane są na zielonkę. Roślinę tę zbiera się corocznie, kiedy łodygi rdestowca ulegają zaschnięciu [4].

Jest rośliną miododajną, która ze względu na późny okres kwitnienia jest wykorzystywana przez pszczelarzy. Charakterystyczną cechą tej rośliny jest również wysoka wartość opałowa, dzięki czemu stanowi ona substrat do produkcji biopaliw stałych. Rdest sachaliński poprzez swoją budowę ma zdolność akumulacji metali ciężkich, dlatego często wykorzystywany jest do oczyszczania gleb, które są skażone przez te pierwiastki [14].

2.4. Wykorzystanie materiału pochodzenia roślinnego do produkcji biopaliw stałych

Potencjał roślin energetycznych można wykorzystać spalając je w formie biopaliwa stałego w postaci: brykietu, peletu i zrębków (gatunki drzewiaste). Biomasa ta charakteryzuje się małą gęstością, co przyczynia się do problemów związanych z transportem oraz magazynowaniem substratu [15], dlatego materiał roślinny przetwarza się na biopaliwo stałe.

Według literatury, po przeprowadzeniu analizy ekonomicznej technologii produkcji, zestawieniu standardów jakościowych oraz porównaniu z wymaganiami stawianymi dla biomasy, wykazano, że pelety są najlepszym biopaliwem stałym. Pelety wytwarzane są z odpowiednio przyszykowanego substratu. Materiał wsadowy powinien charakteryzować się: odpowiednim rozdrobnieniem, wilgotnością (8-13%) oraz brakiem zanieczyszczeń mechanicznych. Proces peletowania polega na wytworzeniu biopaliwa stałego w postaci granulatu, poprzez ciśnieniową aglomerację oraz działanie w warunkach wysokiej temperatury. Produkcja odbywa się przy wykorzystaniu odpowiednich maszyn w postaci pras.

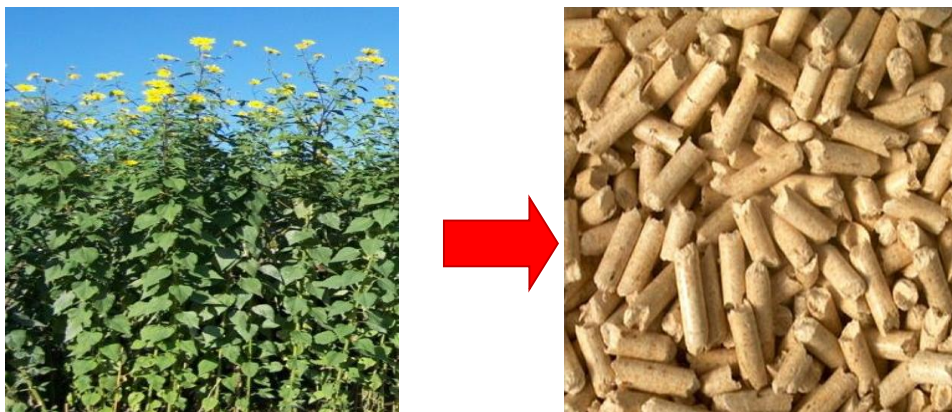


Rysunek 4. Schemat wytwarzania peletu

Źródło: Hejft R., Obidziński S.,: Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych- innowacje technologiczno-techniczne. Część 1 [16]

Często do wytwarzania peletu wykorzystywana jest mieszanka różnych roślin, w celu polepszenia właściwości biopaliwa stałego. W procesie technologicznym często wykorzystuje się substancje wiążące (lepiszcza). Pelety, w odróżnieniu od brykietów, cechują się mniejszymi wymiarami (średnica 4-10 mm, długość 20-50 mm). Pelet to biopaliwo o wysokiej gęstości energetycznej, niskiej zawartości wilgotności oraz małym i jednolitym kształtem, który ułatwia transport oraz magazynowanie biopaliwa. W Polsce do klasyfikacji biopaliw stałych oraz normujące wymagania dla peletów wykorzystuje się normę DIN 51731 oraz ONORM7135 [17]. Na rysunku 4. przedstawiono schemat blokowy składowych procesów produkcji peletu. Peleciarki charakteryzują się różną wydajnością w zakresie od 150-900 kg/t [18]. Obecnie na rynku

można kupić gotowe, odpowiednio zestawione linie produkcyjne do peletu. Ocenia się, iż rdestowiec i słonecznik bulwiasty stanowią dobry substrat do produkcji biopaliwa stałego w postaci peletu.



Rysunek 5. Słonecznik bulwiasty, pelet z słonecznika bulwiastego

Źródło: <http://www.futuregardens.pl/topinambur-słonecznik-bulwiasty-helianthus-tuberosus.html>,
<http://www.fabrykapellet.pl/dostęp: 22.02.2016>

3. Materiał badawczy i metody

Materiał badawczy stanowiła biomasa słonecznika bulwiastego (*Helianthus tuberosus* L.) oraz rdestowca sachalińskiego (*Reynoutria sachalinensis* Nakai).

W Pracowni Ekotechnologii Instytutu Inżynierii Biosystemów oznaczono podstawowe właściwości badanego materiału. Zgodnie z normą PN-75/C-04616.01 metodą wagową została oznaczona sucha masa oraz zawartość suchej masy organicznej zgodnie z normą PN-Z-15011-3.

Na początku przeprowadzono badanie na zawartość suchej masy w substracie. W tym celu w uprzednio zważonych naczynkach wagowych umieszczono rozdrobnione, reprezentatywne próbki surowców, które również zostały zważone.



Rysunek 4. Próbkki surowców

Źródło: Materiały własne

Próby wykonano w trzech powtórzeniach. Zostały one następnie umieszczone w suszarce na 24 godziny. Zgodnie z normą temperatura w jej wnętrzu wynosiła 105°C. Po określonym czasie przebywania w suszarce, próby zostały ponownie zważone, a następnie obliczono zawartość suchej masy za pomocą poniższego wzoru:

$$s. m. [\%] = \frac{m_2 - m_1}{m_0} \times 100\% \quad (1)$$

gdzie:

m_0 - świeża masa substratu [g],

m_1 - masa naczynka [g],

m_2 - masa wysuszonego substratu + masa naczynka [g].

Kolejnym etapem badań było oznaczenie zawartości suchej masy organicznej. Próby zostały umieszczone w spalarni, zgodnie z normą w temperaturze 550°C na czas 3 godzin. Po upływie określonego czasu zostały one wyciągnięte i ponownie zważone. Następnie, wykorzystując poniższy wzór, została obliczona zawartość suchej masy organicznej.

$$s. m. o. [\%] = \frac{m_c - (m_b - m_a)}{m_c} \times 100 \quad (2)$$

gdzie:

m_a - masa naczynka [g],

m_b - masa substratu po spalaniu + masa naczynka [g],

m_c - masa wysuszonego substratu [g].

W Instytucie Chemicznej Obróbki Drewna znajdującym się na Uniwersytecie Przyrodniczym w Poznaniu zbadano ciepło spalania, a następnie obliczono wartość opałową badanych substratów. Oznaczenie ciepła spalania zostało wykonane za pomocą kalorymetru. Pomiar polegał na całkowitym spalaniu próbki substratu w bombie kalorymetrycznej zanurzonej w wodzie, w atmosferze tlenu oraz pod ciśnieniem 3 barów. W sposób automatyczny odbywał się pomiar przyrostu temperatury wody, a wyniki wyświetlane są na ekranie komputera [19].

Na samym początku, z rozdrobnionych reprezentatywnych próbek substratu, za pomocą specjalnej praski uformowano pastylkę o masie około 1 g. Następnie przygotowano drut oporowy o długości około 10 cm. Drut ten został zważony i uformowany w kształt sprężyny o dwóch zwojach.

Badanie ciepła spalania wymaga uprzedniego przygotowania stanowiska badawczego. Do naczynia kalorymetrycznego została wlana woda w ilości 2,7 dm³ o temperaturze około 1°C niższej niż temperatura wody znajdująca się w płaszczu kalorymetru. Odpowiednio uformowana pastylka została umieszczona w tyglu kwarcowym, znajdującym się w uchwycie elektrody.



Rysunek 4. Bomba kalorymetryczna

Źródło: www.grafikagoogle.pl/kalorymetr_KL_12Mn dostęp: 22.02.2016

Następnymi czynnościami podczas wykonywania badania było odpowiednie uszczelnienie bomby kalorymetrycznej, napełnienie tlenem oraz umieszczenie w płaszczu kalorymetru. Po podłączeniu elektrod rozpoczął się pomiar ciepła spalania. Pojemność cieplna kalorymetru wynosiła 13 122 J/g. Dla każdego substratu badanie zostało wykonane w co najmniej trzech powtórzeniach. Dla otrzymania reprezentatywnych wartości ciepła spalania, z uzyskanych wyników wyciągnięto średnią arytmetyczną.

Zakładając, iż woda znajdująca się w spalinach występuje w stanie ciekłym została obliczona wartość ciepła spalania Q - HHV (z ang. higher heating value) [20] wykorzystując następujący wzór:

$$Q_s^a \left[\frac{J}{g} \right] = \frac{c \times (D_t - k) - c}{m} \quad (3)$$

gdzie:

Q_s^a - ciepło spalania analizowanego paliwa [J/g],

C- pojemność cieplna kalorymetru [J/g],

D_r- ogólny przyrost temperatury okresu głównego [K],

k- poprawka na wymianę ciepła z otoczeniem [K],

c- suma poprawek na dodatkowe efekty cieplne [J],

m- masa próbki paliwa [g].

Natomiast wartość opałową Q_w (woda pozostaje w spalinach w stanie pary- LHV z ang. lower heating value) [20], obliczona została ze wzoru:

$$Q_w^a \left[\frac{J}{g} \right] = Q_s^a - 24,42 \times (W^a + 8,94 \times H_a) \quad (4)$$

gdzie:

Q_w^a - wartość opałowa analizowanego paliwa w stanie analitycznym [J/g],

Q_s^a - średnia wartość ciepła spalania analizowanego paliwa [J/g],

W^a - zawartość wilgoci w badanej próbce [%],

H^a - zawartość wodoru w badanej próbce [%].

4. Wyniki badań i dyskusja

W tabeli 2 zostały przedstawione wyniki podstawowych parametrów fizykochemicznych substratów, które są niezbędne przy produkcji biopaliw stałych. Zawartość suchej masy została przedstawiana jako procent wagowy świeżej masy substratu. Sucha masa to pozostałość substratu po odparowaniu z niego wody oraz substancji lotnych. Sucha masa słonecznika bulwiastego (*Helianthus tuberosus* L.) wynosiła: 92,61%, a dla rdestowca sachalińskiego (*Reynoutria sachalinensis* Nakai) wartość ta była niższa i wynosiła: 87,78%.

Tabela 2. Podstawowe parametry fizykochemiczne badanych roślin

	sucha masa [% ś. m.]	sucha masa organiczna
słonecznik bulwiasty (<i>Helianthus tuberosus</i> L.)	92,61	99,46
rdestowiec sachaliński (<i>Reynoutria sachalinensis</i> Nakai)	87,78	96,74

Źródło: Opracowanie własne

Sucha masa organiczna przedstawiana jest jako procent wagowy suchej masy substratu. Jest to ilość materii organicznej, która ulega utlenieniu do dwutlenku węgla oraz wody zgodnie z normą w temperaturze 550°C w spalarni. Wartość suchej masy organicznej dla obu substratów miała zbliżone wartości i wynosiły: 99,46% dla słonecznika bulwiastego oraz 96,74% dla rdestowca sachalińskiego.

Przy określaniu potencjału energetycznego biomasy będącej przedmiotem doświadczeń, najważniejszym parametrem badanym było ciepło spalania oraz wartość opałowa. Ciepło spalania przedstawia ilość ciepła, która powstaje podczas procesu spalania. Badanie przeprowadzono za pomocą kalorymetru. Wykorzystane urządzenie pozwoliło określić wartość ciepła spalania, w której próba została spalona w idealnych warunkach (nastąpiło spalanie całkowite i zupełne).

Wartość opałowa jest to parametr, przy którym należy uwzględnić zawartość wodoru w badanych substratach. Wartości wodoru zostały przyjęte na podstawie danych literaturowych. Dla słonecznika bulwiastego zawartość wodoru wynosi: 6,08%, natomiast rdestowiec

sachaliński charakteryzuje się ilością składnika elementarnego w postaci wodoru w wysokości: 5,69% absolutnie suchego surowca [21]. Wyniki badań ciepła spalania oraz wartości opałowej zostały przedstawione w tabeli 3.

Wartość energetyczna jest jednym z najważniejszych parametrów technicznych dla substratów stanowiących materiał do produkcji biopaliw stałych.

Tabela 3. Wartość ciepła spalania oraz wartości opałowej badanych roślin

	Ciepło spalania [kJ/kg]	Wartość opałowa [kJ/kg]
słonecznik bulwiasty (<i>Helianthus tuberosus</i> L.)	17 451	16 650
rdestowiec sachaliński (<i>Reynoutria sachalinensis</i> Nakai).	16 372	15 560

Źródło: Opracowanie własne

Wartość opałowa dla słonecznika bulwiastego wyniosła 16 650 kJ/kg, a dla rdestowca sachalińskiego 15 560 kJ/kg. Rdestowiec sachaliński wykazał mniejszą wartość opałową niż słonecznik bulwiasty. Uzyskane wartości opałowe dla badanych substratów są zbliżone do wartości niektórych gatunków węgla np. miał węglowy.

5. Wnioski

1. Wykorzystanie biomasy w postaci słonecznika bulwiastego (*Helianthus tuberosus* L.) oraz rdestowca sachalińskiego

(*Reynoutriasachalinensis* Nakai) pozwoliłoby na osłabienie ich zdziczałych populacji i zmniejszenie ich ekspansywności.

2. Wymienione rośliny energetyczne stanowią dobry substrat do produkcji paliw stałych.
3. Potencjał energetyczny słonecznika bulwiastego jest większy od rdestowca sachalińskiego.
4. Wykorzystując rośliny energetyczne jako substrat do produkcji biopaliw stałych, ograniczamy wysoką emisję dwutlenku węgla, dwutlenku siarki, którą uzyskuje się przy spalaniu konwencjonalnych źródeł paliw. Podczas spalania biopaliw stałych wyprodukowanych z roślin energetycznych nie występuje emisja szkodliwych substancji do środowiska.

Literatura:

1. Szczukowski S.,: *Wieloletnie Rośliny Energetyczne, Technologie Energii Odnawialnej*, Warszawa, 2011
2. www.biomasa.org/index.php?d=artykul&kat=57&art=52, [dostęp: 21.02.2016r.]
3. Mystkowska I., Zarzecka K., Gugała M., Baranowska A.: *Właściwości pro biotyczne i farmakologiczne słonecznika bulwiastego (*Helianthus tuberosus* L.)*, Probl Hig Epidemiol 2015, 96(1): 64-66
4. www.kpodr.pl/index.php/galeria-2013/1374-miododajne-rosliny-energetyczne, [dostęp: 21.02.2016r.]
5. Stańczyk K., Ludwik M.,: *Uprawy roślin energetycznych- możliwości zagospodarowania nieużytków i użytków rolnych, na których produkcja rolnicza jest nieopłacalna*, Prace naukowe GIG Górnictwo i Środowisko, 3/2003

6. Stańczyk K., Ludwik M.,: *Uprawy roślin energetycznych- możliwości zagospodarowania nieużytków i użytków rolnych, na których produkcja rolnicza jest nieopłacalna*, Prace naukowe GIG, 3/2003, str. 80-81
7. www.biomasa.org/index.php?d=artykul&kat=59&art=56, [dostęp: 21.02.2016r.]
8. Ochmańska M., Jaroszewski J.,: *Rodzaje biomasy i możliwości jej wykorzystania*, Wyd. Kujawsko-Pomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego, Zarzeczewo, 2006
9. Lewandowski W., Ryms M.,: *Biopaliwa proekologiczne odnawialne źródła energii*, Wyd. WNT Sp. z o.o., Warszawa, 2013
10. Rokosz E.: *Uprawa roślin energetycznych*, Zachodniopomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Barzkowicach, Barzkowice, 2-3, 12-13, 16, 2010
11. <http://agroenergetyka.pl/?a=article&id=210>, [dostęp: 22.02.2016r.]
12. www.sites.google.com/site/heliatest/topinambur-a-zdrowie/wlasciwosci-i-sklad[dostęp: 22.02.2016r.]
13. Prośba- Białczyk U.,: *Produkcyjność topinamburu (Helianthus Tuberosus L.) uprawianego bez nawożenia*, fragment Agronomica 2007 (XXIV) Nr 4(96).
14. www.szkolnictwo.pl/szukaj,Rdestowiec_sachali%C5%84ski, [dostęp: 21.02.2016r.]
15. Maj G., Kuranc A.,: *Technologie produkcji oraz systemy certyfikacji jakości peletów z biomasy roślinnej*, W: *Wybrane problemy z zakresu ekoenergii i środowiska*, Monografia Naukowa „Towarzystwo Wydawnictw Naukowych LIBROPOLIS” pod red. Piekarskiego W., Lublin, 2014, str. 43-56.

16. Hejft R., Obidziński S.,: *Ciśnieniowa aglomeracja materiałów roślinnych- innowacje technologiczno-techniczne. Część 1*, Politechnika Białostocka, Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering, 2012, Vol. 57
17. Jakubiak M., Kordylewski W.,: *Pelety podstawowym biopaliwem energetyki*, Archiwum Spalania, vol.8 (2008), nr. 3-4.
18. <http://www.redmet.pl/m-do-biomasy,pelleciarki-peleciarki.html>, [dostęp: 21.02.2016r.]
19. www.ztch.umcs.lublin.pl/materialy/cw_03_ztch.pdf, [dostęp: 21.02.2016r.]
20. Żogała A., *Problemy technologiczne i środowiskowe związane z termiczną konwersją osadów ściekowych*, Inżynieria Ekologiczna, Vol.46, Feb. 2016, str. 109-120.
21. Komorowicz M., Wróblewska H., Pawłowski J.,: *Skład chemiczny i właściwości energetyczne biomasy z wybranych surowców odnawialnych*, Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych, nr.40, 2009r.

inż. Paulina Widz^{1) 2)}, inż. Szczepan Jakubaszek¹⁾,

inż. Adam Widz¹⁾, inż. Remigiusz Soćko¹⁾,

dr inż. Magdalena Kachel-Jakubowska³⁾,

¹⁾Studenckie Koło Naukowe Ekoenergetyków

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Akademicka 13, Lublin

³⁾Katedra Eksploatacji Maszyn i Zarządzania Procesami Produkcyjnymi

Wydział Inżynierii Produkcji Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

²⁾widz.paulina@gmail.com

Zastosowanie fotowoltaiki – zasady doboru oraz wymiarowania

*Use of photovoltaic technology - the principles of selecting
and dimensioning*

Słowa klucze: *technologia fotowoltaiczna, projekt instalacji*

Keywords: *photovoltaic technology, project of installation*

Streszczenie: Podstawowe wymagania dotyczące instalacji fotowoltaicznych wynikają przede wszystkim z miejsca, w którym chcemy taką instalację umieścić i celu jej wykorzystania. Spośród ostatnio najbardziej dostępnych systemów możemy wyróżnić dwa o nazwie off-grid oraz on-grid. Wykorzystanie systemu off-grid stosuje się przy stosunkowo małym zużyciu energii (domki jednorodzinne lub letniskowe), natomiast on-grid jest uznawany za zdecydowanie bezpieczniejszy i bardziej opłacalny, umożliwiając nie tylko na sprzedaż nadwyżek energii, ale i na bezpośrednie bilansowanie mocy – zasilanie z sieci energetycznej w przypadku, gdy ogniwa dostarczają zbyt mało energii. Na opłacalność budowy instalacji wpływa wiele zmiennych czynników. Rentowność projektów fotowoltaicznych zależy między innymi od: wielkości nakładów inwestycyjnych, ceny sprzedaży energii elektrycznej z sieci, cena coraz bardziej rozpowszechnionych zielonych certyfikatów, produktywność instalacji, kurs walutowy oraz regulacje prawne obowiązujące na terenie danego państwa. Warto zaznaczyć, że podczas początkowego inwestowania w farmę fotowoltaiczną inwestor nie otrzymuje żadnego dochodu, więc konieczne jest znalezienie źródła lub źródeł finansowania inwestycji.

W Polsce do 2020 r. zakładany jest wzrost udziału odnawialnych źródeł energii w ogólnym zużyciu i ma wynieść co najmniej 15%. Według polityki energetycznej Polski do 2030 r. zakładany jest dalszy wzrost tego wskaźnika w latach następnych. Zobowiązanie to wynika z dyrektywy Unii Europejskiej w sprawie promowania energii ze źródeł odnawialnych.

1. Wstęp

Według polityki energetycznej Polski do 2030 r. zakładane jest zwiększenie zastosowania odnawialnych źródeł energii oraz jej udziału do około 15% w 2020 r. i dalszy wzrost tego wskaźnika w kolejnych latach [1]. Zobowiązanie to jest efektem dyrektywy Unii Europejskiej dotyczącej promowania stosowania energii z odnawialnych źródeł [2].

Energia odnawialna jest to energia, która jest uzyskiwana z naturalnych, regularnych procesów środowiskowych. Pozyskiwanie energii jest przyjazne środowisku, gdyż nie naraża go na emisję substancji szkodliwych. Ich pokłady są pozyskiwane w naturalnych procesach, przez co traktuje się je jako zasoby niewyczerpalne. Do odnawialnych źródeł energii można zaliczyć: energię wiatru, promieniowania słonecznego, zasobów geotermalnych, wodną, energię z biomasy, biogazu i biopaliw ciekłych [3].

Rozwój energetyki odnawialnej powinien opierać się przede wszystkim na produkcji rozproszonej, która powoduje zmniejszenie strat przesyłu energii, wzrost bezpieczeństwa energetycznego i spadek emisji gazów cieplarnianych do atmosfery ziemskiej. Nowelizacja ustawy, która weszła w życie 11.09.2013 wspiera rozwój tzw. energetyki prosumenckiej, dzięki której wytworzoną energię elektryczną z OZE będzie można wykorzystać na własne potrzeby, a pozostałą część energii, czyli jej nadwyżkę odsprzedać do sieci elektroenergetycznej. Jednym ze

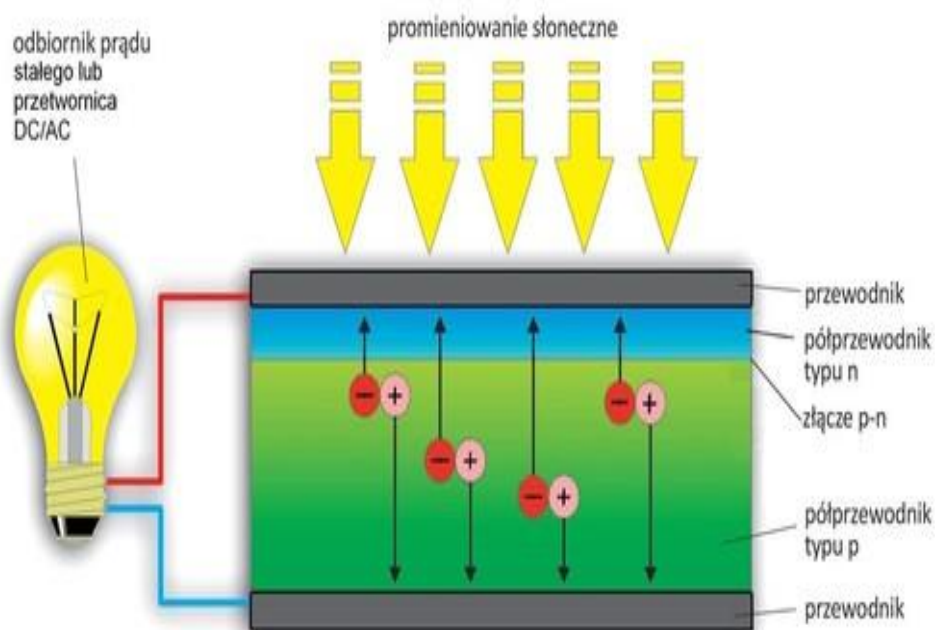
źródeł energii odnawialnych, wymienionym przez ustawodawcę w rozporządzeniu – Dz.U.2012, poz.1229 [4], jest produkcja energii elektrycznej przez instalację fotowoltaiczną.

2. Czym jest fotowoltaika w Polsce?

Obecnie cywilizacja skupia się na energii elektrycznej, jednak w przyrodzie występuje niedostatek naturalnych źródeł o odpowiednich parametrach. Aby uzyskać energię elektryczną o wymaganej mocy potrzebne są generatory. Jednym z prostych generatorów, w którym w sposób bezpośredni przetwarza się powszechnie dostępną energię słoneczną na elektryczną, jest ogniwo fotowoltaiczne. Pierwszą osobą, która zaobserwowała efekt fotowoltaiczny, będący podstawą ogniwa fotowoltaicznego był Becquerel w 1839 r. W początkowym okresie nie były one wydajnymi źródłami energii. Wzrost ich wydajności wiąże się nieodłącznie z użyciem półprzewodników, a szczególnie z rozwojem technologii wytwarzania elementów elektronicznych, wykorzystujących krzem i german. W 1961 r. Shockley i Queisser przeprowadzili analizę teoretyczną, która udowodniła, że największą wydajność fotoogniwa, po oświetleniu widmem promieniowania słonecznego, można otrzymać wówczas, gdy przerwa energetyczna w półprzewodniku to ok. 1,2 eV. Dopasowanie przerwy energetycznej do widma promieniowania słonecznego może być realizowane nie tylko poprzez dobranie odpowiednich półprzewodników, ale również przez wpływ na wymiary półprzewodnika [5].

2.1. Zasada działania oraz podział

W 1839 roku francuski fizyk Edmond Becquerel po raz pierwszy zaobserwował efekt fotowoltaiczny, w którym światło ulega bezpośredniej zamianie na prąd elektryczny. Fotony padające na element fotowoltaiczny, wybijają elektrony z ich stabilnych położeń, pozwalając im poruszać się swobodnie wewnątrz materiału. Na złączu półprzewodnikowym powstaje wówczas napięcie [6].



Rysunek 1. Schemat efektu fotowoltaicznego

Źródło: [7]

System fotowoltaiczny jest zespołem urządzeń, które przetwarzają energię światła słonecznego na energię elektryczną. Zasadniczym problemem wykorzystania energii słonecznej do produkcji prądu elektrycznego jest nieregularność promieniowania słonecznego np. zachmurzenia. Dla zapewnienia ciągłości dostępu do energii

elektrycznej, szczególnie w systemach pracujących niezależnie od sieci energetycznej, należy akumulować wyprodukowane nadwyżki na czas nocy, złej pogody i szczytów energetycznych.

Magazynowanie energii elektrycznej, która została wytworzona z promieniowania słonecznego można rozwiązać dwoma sposobami: bezpośrednio (akumulatory) lub pośrednio - współpraca z innymi źródłami energii elektrycznej np. generatory spalinowe, wiatrowe itp. Powszechnie stosowanym i prostym procesem jest bezpośrednie ładowanie akumulatorów, gdyż wytworzony w ogniwach słonecznych prąd stały wymaga jedynie odpowiedniej regulacji.

System fotowoltaiczny składa się z modułów, paneli lub kolektorów fotowoltaicznych oraz elementów dostosowujących wytwarzany w ogniwach prąd stały do potrzeb zasilanych urządzeń. Gdy zaistnieje potrzeba wykorzystania energii elektrycznej w nocy, należy zastosować odpowiedni system, który będzie magazynował energię wytworzoną w ciągu dnia. Jeżeli system zasila urządzenie stałoprądowe potrzebny jest kontroler napięcia. Do zasilania z systemu fotowoltaicznego urządzeń zmiennoprądowych konieczne jest użycie falownika, a także odpowiednia konstrukcja kierująca moduły lub panele w kierunku Słońca [8].

Systemy autonomiczne nazywane również jako wolnostojące lub wyspowe nie są podłączonego sieci elektrycznej, a więc korzystają jedynie z energii, którą wyprodukują w ciągu dnia z ogniw słonecznych. W ich skład mogą wchodzić następujące elementy: moduły fotowoltaiczne, baterie akumulatorów, urządzenia kontrolujące stopień naładowania i rozładowania akumulatorów oraz falowniki. Systemy takie

można podzielić na: systemy bez baterii akumulatorów pracujące zwykle jako układy prądu stałego oraz systemy z baterią akumulatorów [9].

Systemy hybrydowe są połączeniem autonomicznego systemu fotowoltaicznego z innym systemem wytwarzania energii elektrycznej, takim jak: generator spalinowy, generator wiatrowy lub mała elektrownia wodna. Stosowane są w celu pokrycia pełnego zapotrzebowania na energię elektryczną w określonym z reguły niewielkim obszarze, będącym poza zasięgiem sieci elektroenergetycznej [10].

3. Możliwości wykorzystania promieniowania słonecznego w Polsce

Słońce, jest to najbardziej dostępne źródło energii odnawialnej z jakiej możemy skorzystać. Energia promieniowania słonecznego nie zanieczyszcza środowiska naturalnego, jednak jej rozkład w ciągu roku jest nierównomierny zarówno w ciągu dnia jak i w nocy. Większość energii, czyli około 80% jest dostarczana latem, czyli w okresie od kwietnia do września.

Energia wytwarzana przez słońce powstaje w wyniku przemian wodoru w hel, które zachodzą w bardzo wysokich temperaturach. Promieniowanie słoneczne powstające w wyniku tej konwersji dociera do górnej powierzchni atmosfery. Rozkład promieniowania docierającego do Ziemi:

- 20% promieniowania, które dociera do Ziemi jest przez nią pochłaniane;
- 40% jest odbijane;
- 40% jest wykorzystywane do produkcji energii lub do innych potrzeb.

Czynnikiem powodującym duże straty energii słonecznej jest obecność pyłów i gazów, znajdujące się w warstwach atmosfery. Eliptyczny kształt Ziemi powoduje, że promieniowanie słoneczne dociera

nierównomiernie do powierzchni planety, a tym samym energia dociera w różnej postaci. Część pada na płaszczyznę Ziemi bezpośrednio, część zostaje pochłonięta lub rozproszona przez chmury, może być także odbita od przeszkód [11].

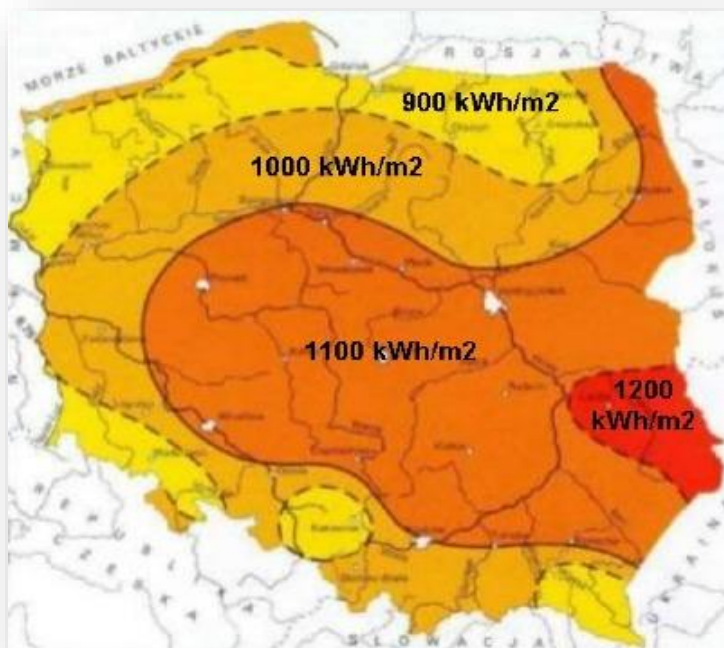
Ocenę zasobów energii promieniowania słonecznego oraz możliwości jej pozyskiwania dla celów technicznych można przeprowadzić na podstawie dwóch podstawowych wielkości, jakimi są:

- średnioroczne usłonecznienie wyrażane w godz./rok,
- roczna gęstość promieniowania słonecznego wyrażona w kWh/m²/rok.

Warunki usłonecznienia na obszarze Polski leżącej w strefie klimatu umiarkowanego pomiędzy 49°00' a 54°30' szerokości geograficznej północnej, odpowiadają warunkom panującym w niektórych krajach Europy Środkowej, jak np. w Niemczech, Austrii i Czechach, czy też na Węgrzech, Słowacji i Ukrainie [12, 13, 14].

Najbardziej uprzywilejowanymi rejonami Polski pod względem napromieniowania słonecznego jest południowa część województwa lubelskiego. Centralna część Polski, tj. około 50% powierzchni kraju, uzyskuje napromieniowanie rzędu 1022-1048 kWh/m²/rok, a południowa, wschodnia i północna część Polski - 1000 kWh/m²/rok i mniej. Najmniejszy w skali roku dopływ energii obserwuje się w rejonie Śląska oraz w obszarze znajdującym się na styku Czech, Niemiec i Polski, do niedawna nazywanym "Czarnym Trójkątem", z uwagi na wysokie zanieczyszczenie powietrza. Do obszarów słabo nasłonecznionych należy również rejon północny obejmujący pas wybrzeża z wyjątkiem Wybrzeża Zachodniego. W skali roku północne krańce Polski otrzymują o około 9% mniej energii słonecznej niż południowe. Z kolei rejony nadmorskie wyróżniają się najbardziej przezroczystą dla promieniowania atmosferą.

Roczna gęstość promieniowania słonecznego w Polsce na płaszczyznę poziomą waha się w granicach 950 - 1250 kWh/m² [15].



Rysunek 2. Natężenie promieniowania słonecznego w Polsce

Źródło: [16]

Tabela 5. Potencjalna energia użyteczna w kWh/m²/rok w wyróżnionych rejonach Polski

Region	Rok (I- XII)	Półrocze letnie	Sezon letni	Półrocze zimowe
Pas nadmorski	1076	881	497	195
Wschodnia część Polski	1081	821	461	260
Centralna część Polski	985	785	449	200
Zachodnia część Polski z górnym dorzeczem Odry	985	785	438	204

Region	Rok (I- XII)	Półrocze letnie	Sezon letni	Półrocze zimowe
Południowa część Polski	962	682	373	280
Południowo-zachodnia część Polski obejmująca Sudety z Tuchowem	950	712	393	238

Źródło: [15]

4. Projektowanie i etapy budowy

Fotowoltaika jest bardzo często błędnie mylona z kolektorami słonecznymi (ogrzewanie wody użytkowej i wspomaganie ogrzewania). Fotowoltaika to system służący do produkcji prądu, który wykorzystujemy na dowolne potrzeby w naszym domu. Dodatkowo należy tu wspomnieć, że nadwyżkę prądu, możemy odsprzedać do elektrowni.

Przykładowe zastosowania fotowoltaiki:

- małe elektrownie słoneczne np. na budynkach oraz farmy słoneczne,
- wykorzystanie instalacji fotowoltaicznej do ogrzewania ciepłej wody użytkowej, jako przydomowa niezależna elektrownia,
- działki, domki letniskowe,
- tablice ogłoszeniowe, sygnalizacja drogowa,
- systemy zasilania awaryjnego,
- maszyny drobnego handlu (np. parkomaty, automaty z napojami),
- urządzenia monitoringu środowiska,
- zasilanie jachtów, przyczep kampingowych,
- odległe miejsca zasilania (np. schroniska, przepompownie wody, przekaźniki telekomunikacyjne) [17].

Decydując się na montaż instalacji fotowoltaicznej warto dokładnie przeanalizować, czy będzie się ona nam opłacała. Ważnym aspektem jest policzenie kosztów związanych z inwestycją, dzięki czemu będziemy wiedzieć ile kosztować będzie realizacja projektu. Na etapie przygotowywania projektu, jak i kosztów z nimi związanych niezbędna jest ścisła współpraca ze specjalistami z dziedziny fotowoltaiki, w celu zapobiegnięcia niższej efektywności działania instalacji, bądź ich wysokim kosztem eksploataowania.

Głównym zadaniem jest ustawienie paneli w kierunku światła słonecznego, a także obliczenie kątów zacienienia fasad budynku. Najwyższa produktywność jest wtedy, gdy panele ustawione są w zakresie od południowego-wschodu do południowego-zachodu pod kątem od 35 do 45 stopni. Należy też zbalansować zacienienie poprzez zastosowanie półprzezroczystych systemów z gwarancją maksymalnego nasłonecznienia pomieszczeń. Projektant wybiera zarówno rodzaj ogniw fotowoltaicznych jak również ich kształt, wydajność elektryczną, przezroczystość oraz kolor [18].

Podczas projektowania układów fotowoltaicznych bardzo istotne jest ustawienie modułów w kierunku promieniowania słonecznego. Moduł fotowoltaiczny odbiera największą ilość energii, gdy promienie słoneczne padają prostopadle do jego płaszczyzny. Nieznaczne odchylenie modułu od kierunku południowego ma niewielki wpływ na efektywność pracy instalacji jednak wiąże się ze zmniejszeniem uzysków energetycznych.

Optymalna odległość pomiędzy modułami można wyznaczyć na podstawie zależności:

$$a = d \cos \beta + h \cos \alpha = d(\cos \beta + \sin \beta \cos \alpha) \quad (1)$$

gdzie:

a – odległość między początkami następnych rzędów modułów,

h – wysokość krawędzi modułu od ziemi,

d – długość modułu,

α – kąt padania promieni słonecznych,

β – kąt nachylenia modułu do powierzchni.

Moduły fotowoltaiczne mogą być łączone ze sobą szeregowo i równolegle. Połączenie szeregowe powoduje wzrost napięcia proporcjonalnie do ilości modułów, np. dla trzech modułów trzykrotnie. Należy wiedzieć, że łączone moduły, które tworzą łańcuchy powinny posiadać te same parametry. Połączenie równoległe powoduje wzrost prądu proporcjonalnie do ilości modułów i dlatego łączenie kilku łańcuchów szeregowych możliwe jest wówczas tylko dla takiej samej liczby modułów. Moduł fotowoltaiczny dostarcza prąd stały i stąd konieczne jest wykorzystanie do tego celu falownika. Charakteryzuje się kilkoma parametrami m.in. zakresem napięcia pracy, mocą, napięcia startu, minimalnym i maksymalnym napięciem wejściowym itp. Wyróżnia się trzy podstawowe rodzaje włączenia falowników: szeregowy, centralny oraz mikroinwerter wbudowany w moduł [19, 20, 21, 22, 23].

Osoby decydujące się na montaż instalacji fotowoltaicznej nie muszą mieć pozwolenia na budowę, niepotrzebne jest również zgłoszenie przy wykonywaniu robot polegających na instalowaniu urządzeń na obiektach budowlanych (art. 29 ust.2 pkt 15 w zw. z art. 30 ust. 1 ustawy). Instalacja ogniw fotowoltaicznych wraz z konstrukcją mocującą nie wymaga zgłoszenia ani uzyskania pozwolenia

pod warunkiem, że zainstalowana całość nie przekroczy 3 m. Jeżeli natomiast wysokość urządzenia będzie wyższa niż 3 m, inwestor będzie musiał dokonać zgłoszenia. Spełnienie powyższych obowiązków nie wymaga również montaż ogniwo wolnostojących [24].

5. Wsparcie finansowe w Polsce

Brak opłacalności inwestowania w instalacje fotowoltaiczne, mógłby poprawić system dotacji dla tego typu inwestycji oraz spadające ceny instalacji fotowoltaicznych w ostatnim okresie na rynku. W trzecim kwartale 2014 r. uruchomiony został program „Prosument” [25], czyli krajowy program dofinansowania z Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej, przy pomocy którego będzie można preferencyjnie finansować budowę mikroinstalacji OZE dla wspólnot mieszkaniowych i gospodarstw domowych. Na ten cel przewidziano środki w wysokości 600 mln zł, wydatkowane do 31.12.2020 dla okresu wdrażania projektu w latach 2014-2018. Systemy fotowoltaiczne mają być również objęte tym dofinansowaniem. Udzielony kredyt obejmowałby 100% kosztów kwalifikowanych zakupu i montażu małych lub mikroinstalacji odnawialnych źródeł energii. Oprocentowanie w skali roku ma wynieść 1%, natomiast maksymalna kwota dofinansowania będzie wynosić: dla osób fizycznych 100 000 zł (jedno źródło energii cieplnej lub elektrycznej) lub 150 000 zł (kilka źródeł energii cieplnej lub elektrycznej). W przypadku spółdzielni lub wspólnot mieszkaniowych kwota dofinansowania ma wynieść odpowiednio 300 000 lub 450 000 zł. Jeżeli chodzi o wysokość opłat i prowizji ma ona łącznie wynieść maksymalnie 6% kwoty wysokości kredytu. Wysokość prowizji za udzielenie kredytu w pierwszym roku nie może być większa niż 3%,

a pozostała ma być pobierana w kolejnych latach proporcjonalnie do okresu i kwoty spłacanego kredytu. Dodatkowo maksymalny okres kredytowania ma wynieść 10 lat dla osób fizycznych i 12 lat dla wspólnot i spółdzielni mieszkaniowych.

Jednym z podobnym projektów NFOŚiGW, który cieszy się bardzo dużym zainteresowaniem jest pro-program dopłat NFOŚiGW na zakup i montaż kolektorów słonecznych. Program cieszył się tak dużą popularnością, iż w roku 2012 fundusz podjął decyzję o zwiększeniu całkowitego budżetu programu do kwoty 450 mln zł [26]. Jak wykazały badania, wykorzystanie kolektorów słonecznych w polskich warunkach meteorologicznych jest opłacalną inwestycją, a skorzystanie z dofinansowania w formie dotacji NFOŚiGW, w wysokości 45% kapitału kredytu bankowego, przyczynia się do skrócenia czasu zwrotu inwestycji [27].

6. Opłacalność budowy w Polsce

W ciągu ostatnich lat fotowoltaika z obiektu zainteresowania naukowców, wykorzystywana jest obecnie w sektorze energetycznym w większości krajów rozwiniętych. Wzrost produkcji modułów fotowoltaicznych jak i zainstalowanej mocy w ciągu ostatnich lat jest niespotykany i nieporównywalny z jakimkolwiek innym rodzajem generatorów. Mimo kryzysu w latach 2008-2011, odnotowano wzrost zainstalowanej mocy, pochodzącej ze źródeł fotowoltaicznych, równy ponad 1300 %. Z raportu, które przedstawiło Europejskie Stowarzyszenie Przemysłu Fotowoltaicznego można wywnioskować, że w 2011 r. moc zainstalowanych urządzeń fotowoltaicznych na świecie wyniosła ponad 64 GW, co w porównaniu do 2010 r., gdzie wartość ta wynosiła 40 GW,

jest to wzrost o ponad 20 GW. W takim samym tempie rośnie liczba firm działających w branży fotowoltaicznej, dzięki czemu następuje wzrost zatrudnienia.

Aby dowiedzieć się czy nasza inwestycja przyniesie sukces, należy odpowiednio przeanalizować wszystkie za i przeciw. Pierwszym bardzo ważnym etapem jest koszt budowy, czyli wydatki jakie poniesiemy na projekt, zakup i montaż instalacji fotowoltaicznej, oraz kalkulacja przychodu, jaki przyniesie nam instalacja oraz czas jej zwrotu [28].

Zmniejszające się ceny paneli fotowoltaicznych i inwerterów, mogą tylko zachęcić do inwestowania w energię odnawialną uzyskiwaną przy użyciu fotowoltaiki. W 2013 r. odnotowano powolną zmianę dotyczącą udziału inwestycji w elektrownie fotowoltaiczne. Porównując lata 2012 i 2013, można wywnioskować, że w 2012 r. największy odsetek inwestorów stanowiły przedsiębiorstwa, natomiast w 2013 r. ten odsetek zmniejszył się poprzez wzrost inwestorów prywatnych. Wzrost udziału inwestycji osób prywatnych (gospodarstw domowych) wskazuje na zwiększenie zainteresowania rynku energetyką prosumencką oraz na obniżeniu aktywności w obszarze przygotowywania inwestycji większych tj. elektrowni słonecznych [29].

7. Podsumowanie

Polska do wykorzystania energii słonecznej ma warunki równie dobre co Niemcy, Austria czy Czechy. Jednak nadal jej użycie ogranicza się do systemów podgrzewania wody, a warto również pomyśleć o możliwościach wytwarzania energii elektrycznej za pomocą paneli fotowoltaicznych. Jest ona najbardziej ekologiczną formą pozyskiwania

energii elektrycznej. To technologią, która nie wymaga skomplikowanej konserwacji, nie wymaga wymiany części ze względu na brak elementów ruchomych. Jedynie po upływie okresu eksploatacyjnego tj. 25 lat, wszystkie elementy mogą zostać zutylizowane w prawie 99%, gdyż składają się głównie ze szkła, krzemu i aluminium [30]. Instalacje fotowoltaiczne z każdym rokiem stają się coraz to bardziej popularnym źródłem energii odnawialnej, ich **łączna moc wynosi aktualnie blisko 40 MW, to oznacza, wzrost o około 50% w ciągu ostatnich miesięcy [31]**. Ważnym aspektem przemawiającym za zwiększeniem popularności systemów fotowoltaicznych będzie na pewno spadek cen modułów oraz możliwości odsprzedaży energii elektrycznej. Bardzo ważną informacją jest również zwiększenie się ilości firm zajmujących opracowywaniem projektów i ich wykonaniem w ciągu ostatnich lat. Fotowoltaika stając się coraz popularniejsza w codziennym zastosowaniu, staje się jednym z najbardziej perspektywicznych odnawialnych źródeł energii w najbliższych latach.

Warto również zauważyć, że znaczenie energetyki słonecznej w nadchodzącej dekadzie wzrośnie jeszcze bardziej na tle całego sektora OZE, gdyż „Program trzech dwudziestek” i nowa dyrektywa 2009/28-WE o promocji stosowania odnawialnych źródeł energii wprowadzają konkurencję pomiędzy nośnikami; biopaliwami transportowymi, zieloną energią elektryczną i ciepłem, a właśnie ciepło, w tym słoneczne, wydaje się być w pakiecie klimatycznym UE jednym z najtańszych sposobów redukcji emisji CO₂.

Literatura:

1. Polityka Energetyczna Polski do 2030 roku. Ministerstwo Gospodarki. Warszawa 10.11.2009.
2. Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych.
3. www.mg.gov.pl [dostęp: 12.02.2016 r.].
4. Ustawa z dnia 18 października 2012 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązków uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia, uiszczenia opłaty zastępczej, zakupu energii elektrycznej i ciepła wytworzonej w odnawialnym źródle energii. Dz.U. 2012, poz. 1229.
5. Godlewski J., Czysta energia 2013: *Wydajna fotowoltaika-potencjalne możliwości*. 5(141), str. 32-33.
6. Hoagland W.: Energia słoneczna, Świat Nauki, Listopad 1995.
7. www.budujemydom.pl [dostęp: 11.02.2016].
8. www.pv.pl - Polski serwer zastosowania fotowoltaiki informacje z całej Polski.[dostęp 11.02.2016].
9. bc.pollub.pl [dostęp: 12.02.2016 r.].
10. Rodacki T., Kandyba A.: *Przetwarzanie energii w elektrowniach słonecznych*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
11. Chwieduk D., *Modelowanie i analiza pozyskiwania i konwersji termicznej energii promieniowania słonecznego w budynku*, Warszawa, Instytut Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, 2006.
12. Gogół W. *Konwersja termiczna energii promieniowania słonecznego w warunkach krajowych*. PAN. Warszawa 1993.

13. Nowak W., Stachel A.A.: *Stan i perspektywy wykorzystania niektórych odnawialnych źródeł energii w Polsce*. Wydawnictwo Politechniki Szczecińskiej, Szczecin 2004.
14. Smolec W.: *Fototermiczna konwersja energii słonecznej*. PWN, Warszawa 2000.
15. www.ioze.pl [dostęp 10.02.2016].
16. www.fotowoltaika.net [dostęp 11.02.2016].
17. www.unicate.pl [dostęp 11.02.2016].
18. Karaś A., Czysła Energia 2014: *Fotowoltaika zintegrowana z budynkiem*. 4(152), str. 31.
19. Haberlin H., *Photovoltaics. System Design and Practice*, Wiley, 2012.
20. Klugmann-Radziemska E., *Fotowoltaika w teorii i praktyce*, Wydawnictwo BTC, Legionowo 2010.
21. Pietruszko S., *Perspektywy i bariery rozwoju fotowoltaiki w Polsce*, Czysła Energia, nr 1/2012 (125).
22. Stapleton G., Neill S., *Grid-Connected Solar Electric Systems*, Earthscan, London 2012.
23. Gevorkian P., *Large-Scale Solar Power System Design*, McGraw-Hill Companies, Inc. 2011.
24. www.administrator24.info [dostęp 12.02.2016].
25. www.nfosigw.gov.pl [dostęp 12.02.2016].
26. Zabawa J.: *Aktualne kierunki wsparcia finansowania inwestycji w odnawialne źródła energii przez współczesne banki*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013, str. 405-414.
27. Dąbrowski J., Hutnik E.: *Efektywność pracy instalacji słonecznej dla okresu 2002 – 2012 w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych*.

- Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2013, str. 293-302.
28. Sibiński M., Jatczak A., Czysta Energia 2012: *Rentowność i perspektywy rozwoju instalacji PV w Polsce*. 12(136), str. 24-25.
29. Bolesta J., Czysta Energia 2014: *Fotowoltaika sektor w latach 2013-2014*, 10(158), str. 24-25.
30. Zysiński B., Czysta Energia 2010: *Fotowoltaika w praktyce*, 11(111), str. 42-43.
31. [dostęp 27.02.2016].

inż. Paulina Widz^{1) 2)}, inż. Adam Widz¹⁾,
inż. Remigiusz Soćko¹⁾, inż. Szczepan Jakubaszek¹⁾,
dr inż. Magdalena Kachel-Jakubowska³⁾

¹⁾Studenckie Koło Naukowe Ekoenergetyków

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie, Akademicka 13, Lublin

³⁾Katedra Eksploatacji Maszyn i Zarządzania Procesami Produkcyjnymi

Wydział Inżynierii Produkcji Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

²⁾widz.paulina@gmail.com

Projektowanie instalacji kolektorów słonecznych i ich opłacalność

Designing Installation of solar collectors and their profitability

Słowa klucze: instalacja solarna, zwrot inwestycji, kolektor

Keywords: solar installation, return on investment, collector

Streszczenie: Spośród wszystkich dostępnych źródeł energii najliczniejsze nadzieje wiąże się z energetyką słoneczną. Można stwierdzić, iż jest to czysta technologia, produkcji energii aczkolwiek dotychczas niekonkurencyjna w stosunku do aktualnych konwencjonalnych technik pozyskiwania ciepłej wody użytkowej. Wykorzystanie energii słonecznej poszerza perspektywy związane z nowymi technologiami w tym zakresie. Najbardziej popularne, dostępne i całkowicie czyste ekologicznie jest bezpośrednie wykorzystanie promieniowania słonecznego. Dlatego też te instalacje stały się bardzo rozpowszechnione w ostatnim czasie.

Podjęcie decyzji o zakupie instalacji kolektorów słonecznych powinno być przemyślane pod wieloma względami. Podstawowym czynnikiem skłaniającym do zakupu instalacji kolektorów słonecznych jest chęć obniżenia kosztów ogrzewania poprzez zmniejszenie ilości zużywanego paliwa lub energii. Jednak w wielu przypadkach wątpliwości wzbudza przede wszystkim fakt ekonomicznej opłacalności instalacji kolektorów, a przede wszystkim okres jej zwrotu. Bez wątpienia inwestycja w kolektory zwraca się i przynosi oczekiwane oszczędności. Jednak samo obliczenie okresu zwrotu kosztów poszczególnych instalacji nie jest takie proste, ponieważ trzeba wziąć pod uwagę pewne zjawiska występujące w czasie eksploatacji kolektorów.

Zużycie wody w okresach użytkowania, ceny energii, czy też nasłonecznienie w kolejnych latach podlegają nieoczekiwanym i nieustannym zmianom. Dlatego też rzeczywisty wynik ekonomiczny odbiega zatem in plus lub in minus od wyniku uzyskanego z toku obliczeń.

Rozważając opłacalność inwestycji należy ponadto wziąć pod uwagę szereg dodatkowych czynników między innymi: - możliwość pozyskania dotacji przez inwestora, czy też możliwość pozyskania tanich kredytów przez kredytobiorcę. Szereg instytucji użyteczności publicznej (szkoły, szpitale itp.), może korzystać ze środków pomocowych przeznaczonych na inwestycje ściśle związanych z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii. Warto zaznaczyć jednak, że koszty instalacji solarnej zależą w znacznym stopniu od zakresu modernizacji istniejącej już tradycyjnej instalacji.

1. Wstęp

Słońce jest największą gwiazdą, która znajduje się najbliżej Ziemi mającą również największe znaczenie umożliwiające jej prawidłowe funkcjonowanie. Jest olbrzymią kulą gazową, gdzie w jej wnętrzu nieustannie zachodzą procesy jądrowe wyzwajające ogromne ilości ciepła. Energia słoneczna, która dociera do naszej ziemi ma postać fal elektromagnetycznych o różnej długości fali. Dzięki tym falom życie na Ziemi może funkcjonować. Docierające światło słoneczne wykorzystywane jest przez wszystkie organizmy żywe w różny sposób również np. przez rośliny w procesie fotosyntezy. Bez jego obecności, życie na Ziemi byłoby nie możliwe. Energia słoneczna powstaje w wyniku przemian wodoru w hel podczas bardzo wysokich temperatur. Promienie słoneczne docierają do górnej części powierzchni atmosfery. Rozkład promieniowania docierającego do ziemi przedstawia się następująco:

- 20 % promieniowania, które dociera do Ziemi jest przez nią pochłaniane;

- 40% jest odbijane;
- 40% jest wykorzystywane do produkcji energii lub do innych potrzeb.

Energia słoneczna jest jedną z metod otrzymywania czystej energii odnawialnej jak również najbezpieczniejszą i w najmniejszym stopniu prowadzącą do niekorzystnych zmian w środowisku naturalnym. Wadą pozyskiwania tej energii w naszym klimacie, jest nierównomierna podaż zarówno w okresie roku, jaki w ciągu dnia. Jest to spowodowane porami roku. Najwięcej energii dostarczane przez Słońce jest latem. Aż 80% tej energii przypada na okres wiosenno-letni [1]. Stały wzrost zapotrzebowania na energię na świecie oraz możliwość wyczerpania się zasobów paliw kopalnych, rosnąca degradacja środowiska naturalnego, przyczyniły się do rozbudzenia zainteresowania odnawialnymi źródłami energii, co doprowadzając do dużego wzrostu jej zastosowania [2]. Energię tą można wykorzystać na trzy różne sposoby:

- Wykorzystując zamianę bezpośrednią energii promieniowania słonecznego na energię elektryczną- konwersja fotowoltaiczna;
- Wykorzystując zmianę energii promieniowania słonecznego na energię ciepłą w kolektorach słonecznych – konwersja fototermiczna [3]
- Wykorzystując pośrednią zamianę energii słonecznej w energię elektryczną w piecach słonecznych.

Powszechnie energia słoneczna zamieniana jest na energię ciepłą poprzez instalację kolektorów słonecznych. Tak uzyskana energia może być wykorzystywana do ogrzewania mieszkań oraz ciepłej wody. Kolektory słoneczne w najlepszym rozwiązaniu powinny być umieszczane na dachach budynków mieszkalnych w celu jak najlepszego wykorzystania ich sprawności.

2. Kolektory słoneczne i sposób ich działania

Kolektory słoneczne są podstawowymi elementami instalacji słonecznej. Zadaniem kolektorów słonecznych jest przekształcenie energii promieni słonecznych w energię cieplną poprzez specjalną płytę absorpcyjną. Kolektory słoneczne są podstawowymi elementami instalacji słonecznej. Ich zadaniem jest przekształcenie energii promieni słonecznych w energię cieplną poprzez czynnik roboczy wewnątrz absorbera. W kolektorach słonecznych energia pochłonięta przez absorber jest oddawana w postaci ciepła strumieniowi przepływającego powietrza lub czynnika ciekłego w odpowiednio ukształtowanym kanale kolektora [4]. W naszych warunkach klimatycznych najczęściej stosuje się kolektory słoneczne służące do ogrzewania wody użytkowej, lub jako system wspomagający główne źródło ogrzewania mieszkań.

Kolektory słoneczne można podzielić na dwa rodzaje:

- płaskie, które z kolei dzielą się na gazowe, dwufazowe oraz cieczowe (Rys. 1);
- drugim rodzajem są kolektory rurowe, zwane też próżniowe (Rys. 2).



Rysunek 8. Kolektor typu płaskiego

Źródło: [5]



Rysunek 2. Kolektor typu rurowego

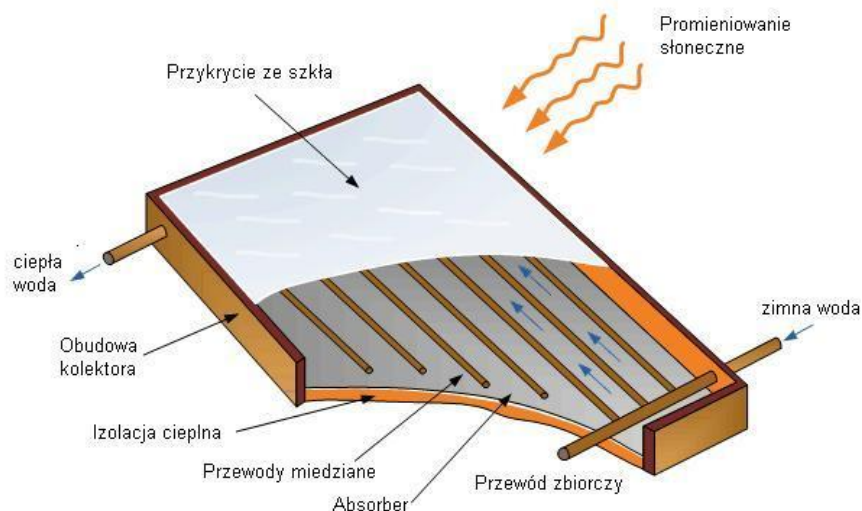
Źródło: [6]

2.1. Budowa i działanie kolektorów słonecznych

Płaskie kolektory słoneczne są zbudowane z następujących elementów:

- absorbera, zbudowanego jako płyta, która jest wykonana z ciemnych tlenków metali, które bardzo dobrze pochłaniają promienie słoneczne.
- przewody rurowe, w których pomiędzy ścianką wewnętrzną, a zewnętrzną istnieje próżnia. W rurce wewnętrznej znajduje się powłoka absorbująca. Zadaniem próżni jest uniknięcie niezamierzonych strat ciepła. W rurach transportowany jest czynnik grzewczy – glikol.
- szklane pokrycie zewnętrzne, które posiada wysoką przepuszczalność promieni słonecznych oraz pełniące jednocześnie działanie ochronne wnętrza kolektora.

- z izolacji cieplnej. Jej zadaniem jest zapobieganie utracie ciepła. Jako materiały izolacyjne stosuje się: polistyren porowaty, poliuretan spieniony, wełnę mineralną, korek [7].
- obudowa kolektora, której zadaniem jest izolacja elementów kolektora od czynników zewnętrznych. Materiały pokryciowe z tworzyw sztucznych wykazują znacznie mniejszą trwałość ok. 5 lat, po tym okresie należy je wymienić [8]. Ważne jest aby materiał z którego wykonana jest obudowa charakteryzował się dużą przepuszczalnością promieniowania słonecznego przy zachowaniu odporności na promieniowanie ultrafioletowe i trwałością.



Rysunek 3. Schemat budowy płaskiego kolektora słonecznego

Źródło: [9]

Jednym z najważniejszych elementów kolektorów słonecznych jest absorber. Budowa absorbera powinna zapewnić pochłonięcie jak największej ilości promieniowania bezpośredniego (do 95%), a emisja promieni rozproszonych powinna być jak najmniejsza. Wykonanie absorbera może być z różnych materiałów, najprostszym absorberem może być miedziana lub aluminiowa blacha, pokryta czarną farbą. Dla

zwiększenia efektywności absorber pokrywa się powłokami selektywnymi. Poprzez zastosowanie powłoki selektywnej współczynnik efektywności może wzrosnąć o 15-20%. Wysoka przewodność cieplna materiału z którego wykonany jest absorber ma szczególne znaczenie w kolektorach służących do pogrzanania w wody, gdzie powierzchnia styku czynnika roboczego z powierzchnią absorbera jest mniejsza od powierzchni absorbera [10]. Materiały, z których wykonuje się absorbery powinny spełniać następujące właściwości:

- dobre przewodnictwo cieplne;
- mała gęstość
- odporność na korozję atmosferyczną i korozję od strony czynnika roboczego;
- odporność na wysokie temperatury;
- łatwa obróbka mechaniczna.

1.1. Działanie płaskiego kolektora słonecznego

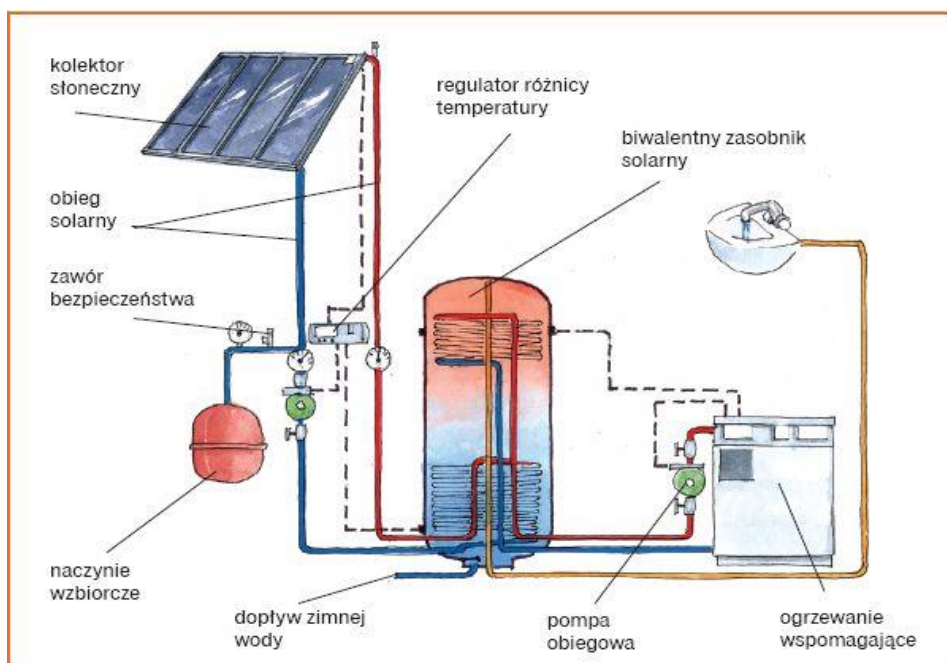
Na płaski kolektor słoneczny padają promienie słoneczne, które nagrzewają do bardzo wysokich temperatur, znajdujący się w środku kolektora absorbera. W kolektorach płaskich nie występuje koncentracja energii promieni słonecznych. Zadaniem kolektorów płaskich jest absorbowanie promieniowania słonecznego bezpośredniego i rozproszonego. Absorber pokryty jest ciemną warstwą tlenków metali, aby jak najwięcej pochłoniąć promieni słonecznych. Do absorbera połączony jest system rurek miedzianych, przez które przepływa glikol – czynnik grzewczy. Glikol jest czynnikiem odbierającym ciepło od absorbera, który nie zamarza. Są dwa sposoby połączenie ze sobą rurek: połączenie meandrowe oraz połączenie harfowe. Gorący glikol

transportowany jest przewodami rurowymi do dalszych elementów instalacji solarnej. Nośnik ciepłą krąży dzięki instalacji pompy obiegowej w zespole sterowniczo-pompowym. Bateria kolektora połączona hydraulicznie z węzownią umieszczoną w podgrzewaczu wody użytkowej dwiema rurami miedzianymi albo ze stali nierdzewnej, o średnicy dobranej do wielkości kolektorów słonecznych. Roztwór glikolu odbiera ciepło z kolektorów i przenosi je do węzownicy, która z kolei nagrzewa wodę w podgrzewaczu.

Układ instalacji solarnej składa się z kolektorów, przewodów rurowych, układu pompowego, z naczynia przeponowego, które zapewnia bezpiecznie działanie instalacji oraz z zbiornika z wymiennikiem ciepła (Rys. 4). Bardzo dobrym rozwiązaniem jest zastosowanie zbiornika składającego się z dwóch węzownic [11]. Do dolnej węzownicy podłącza się układ instalacji solarnej, a do drugiej kocioł centralnego ogrzewania. Dzięki takiemu rodzajowi podłączenia, możemy sobie zapewnić ciepłą wodę przez cały rok. Zimą kocioł c.o. będzie nam dogrzewał wodę, ponieważ sprawność kolektorów zimą jest o wiele niższa niż latem.

Zalety kolektorów płaskich [12]:

- niski koszt, łatwość montażu;
- długa żywotność;
- dostępność na rynku, wysoka jakość;
- wytrzymałość na uderzenia gradu o średnicy 25 mm;
- bardzo dobra izolacja termiczna;
- wysokiej jakości szkło;
- szczelna, estetyczna obudowa.



Rysunek 4. System budowy instalacji solarnej

Źródło: [11]

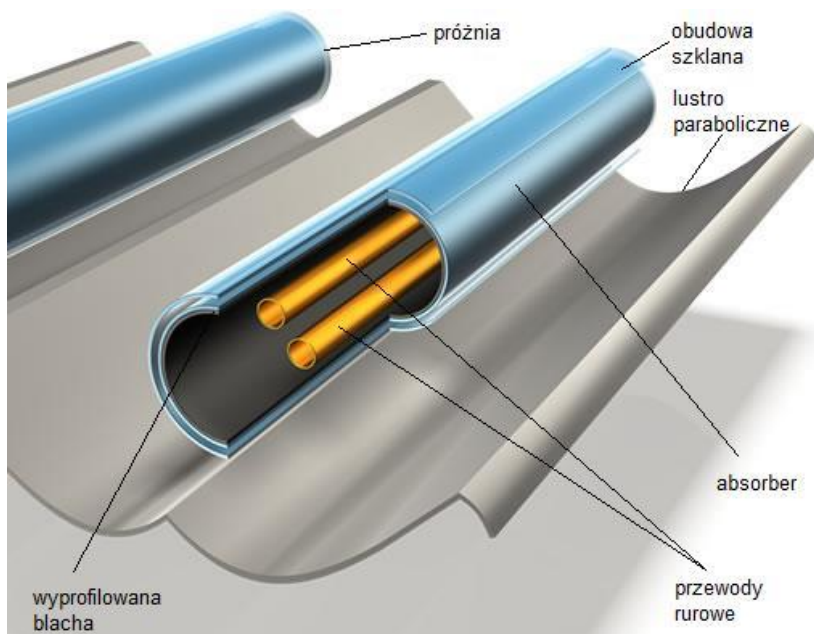
1.2. Budowa kolektora rurowego

W Polsce coraz bardziej popularne stają się kolektory słoneczne typu rurowego (próżniowego). Koszt takich kolektorów jest wyższy niż w przypadku kolektora płaskiego. Wiąże się to z możliwością uzyskania lepszych parametrów ilości ciepła.

Elementy budowy kolektora rurowego (Rys. 5):

- zestaw kilku lub kilkunastu walcowatych i wydłużonych rur szklanych w których panuje próżnia, każda rura składa się z wyprofilowanej blachy, absorbera wykonanego z ciemnych tlenków metali oraz miedzianych przewodów rurowych, przez które przepływa czynnik grzewczy;
- obudowa kolektora, tak samo jak w przypadku kolektora płaskiego, chroni przed czynnikami zewnętrznymi;

- izolowana skrzynia zbiorcza, której znajdują się przewody zasilania i powrotu czynnika grzewczego do dalszych elementów instalacji solarnej.



Rysunek 5. Budowa rurowego, próżniowego kolektora słonecznego

Źródło: [13]

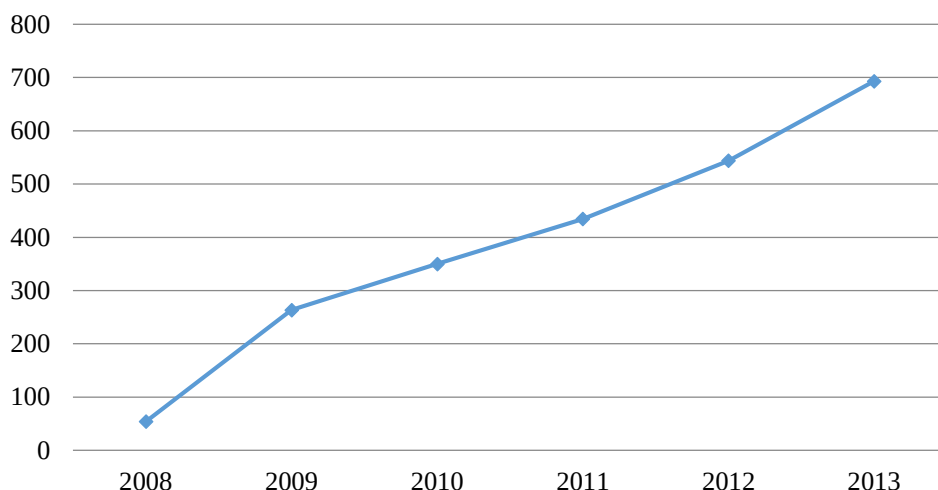
1.3. Działanie kolektora rurowego

Na szklane rury znajdujące się w kolektorze rurowym, padają promienie słoneczne, które nagrzewają wewnątrz nich absorber. Odbiór ciepła jest możliwy dzięki panującej w rurach próżni. Ciepło przekazywane jest do rurek miedzianych, w których przepływa np. glikol – czynnik grzewczy. Ogrzany glikol jest transportowany do dalszych części instalacji na skutek pracy pompy obiegowej w zespole sterowniczo-obiegowym. Bateria kolektora połączona jest hydraulicznie z węzownią, która jest umieszczona w podgrzewaczu wody użytkowej dwiema rurami elastycznymi ze stali nierdzewnej bądź też miedzianymi.

Roztwór glikolu pobiera ciepło z kolektorów i przenosi je do węzownicy, która podgrzewa wodę w podgrzewaczu [10]. Zaletą kolektorów rurowych jest niewątpliwie łatwy montaż. Tego typu urządzenia możemy montować zarówno na dachu jak i pionowo na elewacji budynku. Do wad tych kolektorów należy między innymi możliwość przegrzania się latem [14]. Kolektory rurowe, ze względu na niskie straty ciepła, są montowane do instalacji pracujących w niskich temperaturach oraz przy małym natężeniu promieni słonecznych.

1.4. Wykorzystanie kolektorów słonecznych

Kolektory słoneczne płaskie jak i rurowe w głównej mierze są wykorzystywane do podgrzewania ciepłej wody. Istnieje również możliwość wykorzystania kolektorów do ogrzania budynków i mieszkań. Zastosowanie działania kolektorów słonecznych wykorzystywane jest także do ogrzania basenów krytych. Kolektory w polskich warunkach klimatycznych są stosowane w wielu dziedzinach, choćby w przypadku produkcji zwierzęcej, do podgrzewania wody użytkowej do celów sanitarnych, a także w przygotowaniu pasz, pojenia zwierząt oraz ogrzewanie budynków inwentarskich. W hodowli ryb, kolektory podgrzewają wodę w stawach rybnych [14]. W ostatnim czasie można również zauważyć wzrost pozyskiwania dzięki kolektorom słonecznym ciepła, które wykorzystuje się do ogrzania wody i mieszkań. Największe pozyskanie ciepła uzyskano w roku w 2013 (693,3 TJ). W roku 2008 pozyskanie ciepła wahało się w granicach 54 TJ (Rys. 6). Wzrost ten spowodowany jest większą świadomością społeczeństwa na temat odnawialnych źródeł energii, a także możliwość dofinansowania do budowy instalacji ciepłej.



Rysunek 6. Pozyskanie ciepła słonecznego w latach 2008-2013 (TJ)

Źródło: Opracowanie własne na podstawie danych GUS

W 2006 r. łączna powierzchnia zainstalowanych kolektorów wynosiła około 164 000 m², w 2007 r. przekroczyła 230 000 m², a na początku 2010 r. szacowano tę liczbę na ponad 300 000 m². [15, 16]. W ostatnich latach można zaobserwować dynamiczny rozwój tego sektora. Wzrasta sprzedaż kolektorów oraz intensywnie rozwija się krajowa produkcja urządzeń solarnych, a większość sprzedawanych w Polsce, wysokiej jakości kolektorów słonecznych jest produkowana w kraju. Krajowi producenci ponad 50% produkowanych urządzeń trafia na rynki poza granice naszego kraju. Wyróżnia to energetykę słoneczną na tle innych odnawialnych źródeł energii, wśród których dominuje import urządzeń i często krajowej produkcji urządzeń brakuje na polskim rynku [17]. Kolektory słoneczne zagościły w naszych budynkach na dobre. Są darzone dużym zaufaniem przez użytkowników i stosuje się je coraz chętniej. Stają się nieodzownym elementem budynków jednorodzinnych i obiektów wypoczynkowo-hotelowych, czy też sportowych, szpitali [18].

3. Nasłonecznienie w Polsce

W odbiorze energii słonecznej przez kolektory słoneczne napotyka się problem niskiej gęstości strumienia promieniowania, a także różny odbiór promieni słonecznych, który zależy od pory dnia i roku. Od wielu czynników zależy ilość promieniowania słonecznego, które dociera od powierzchni Ziemi. Głównymi czynnikami jest stan atmosfery oraz uwarunkowania astronomiczne. Bezchmurne niebo czerwcowe, kiedy Słońce jest najwyżej nad horyzontem, ilość promieni słonecznych jest największa. Wartość ta jednak się zmniejsza wraz z nową porą roku, kiedy to Słońce znajduje się najniżej nad horyzontem. Wpływ na ilość energii słonecznej dochodzącej do kolektora słonecznego ma również zachmurzenie nieba. Największa liczba godzin usłonecznienia występuje w miesiącach letnich. Podczas bezchmurnego nieba i warunkach idealnej przejrzystości nieba promieniowanie słoneczne może stanowić 90% promieniowania całkowitego docierającego do Ziemi, osiągając w miesiącach letnich w południe $1050 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Inaczej wygląda to kiedy mamy pełne zachmurzenie nieba, gdzie do powierzchni nieba dociera tylko promieniowanie rozproszone, którego wartość waha się od 50 do $150 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ [19].

Usłonecznienie definiuje się jako liczbę godzin słonecznych w ciągu roku. Polska leży w strefie klimatu umiarkowanego, między $49^{\circ}00'$ a $54^{\circ}34'$ szerokości geograficznej północnej odpowiada to warunkom, które występują w takich krajach jak: Węgry, Ukraina, Czechy, Niemcy czy też Austria. W Polsce usłonecznienie wynosi od 1390 do 1900 godzin rocznie [20]. Z kolei nasłonecznienie jest to suma natężeń promieni słonecznych na danej powierzchni w danym czasie. Nasłonecznienie jest wielkością opisującą zasoby energii słonecznej

w danym miejscu i czasie. Nasłonecznienie w Polsce charakteryzuje się równomiernym rozkładem promieniowania słonecznego. Średnie roczne nasłonecznienie w Polsce wynosi około 1000 kWh/m^2 . Są jednak obszary, gdzie nasłonecznienie jest znacznie lepsze. Najbardziej nasłonecznionymi regionami są: Pomorze, Wielkopolska, Mazowsze Południowe i Lubelszczyzna (Rys. 7). Około 80 % rocznego nasłonecznienia przypada na okres wiosna-lato (kwiecień-wrzesień). Najlepsze warunki usłonecznienia panują w drugiej dekadzie maja oraz pierwszej czerwca, najgorsze warunki panują od drugiej dekady grudnia do pierwszej stycznia [21].



Rysunek 7. Mapa nasłonecznienia w Polsce

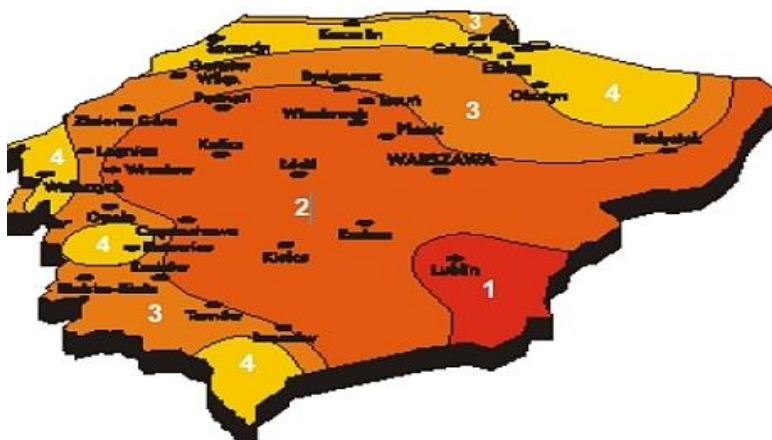
Źródło: [22]

Z mapy można odczytać iż największe nasłonecznienie występuje na Lubelszczyźnie (1200 kWh/m^2). W Polsce w porównaniu do innych

krajów, różnice nasłonecznienia są niewielkie. W warunkach Polski udział godzin ze słońcem w sezonie letnim stanowi od 60-70% sum rocznych, a czas trwania usłonecznienia wynosi od około 5,8 do 6,8 dziennie [23]. Obszar Polski został podzielony w ekspertyzie na 11 regionów, które charakteryzowały się różnym stopniem wykorzystania energii słonecznej [24].

4. Projekt oraz koszty jego wykonania

Kolektor słoneczny największą moc uzyskuje, kiedy jego położenie jest stale prostopadłe do kierunku padania promieni słonecznych [25]. Przy projektowaniu instalacji kolektorów słonecznych ważna jest optymalizacja nachylenia kolektora względem Słońca. Kąt nachylenia kolektora powinien być powiązany z szerokością geograficzną i przeznaczeniem instalacji grzewczej. Kolektory umieszcza się w takim miejscu aby nie był zasłonięty przez drzewa bądź też inne budynki. Właściwy dobór kolektorów do instalacji ciepłej wody użytkowej jest uwarunkowany wieloma czynnikami. Do czynników tych można zaliczyć między innymi dzienna ilość zużycia wody ciepłej, liczba mieszkańców, rodzaj budynku (jedno czy wielorodzinny).



Rysunek 8. Strefy klimatyczne

Źródło: [26]

Wytyczne do projektowania układu solarnego:

- strefa klimatyczna, podział na 4 strefy (Rys. 8);
- kąt nachylenia dachu;
- zapotrzebowanie na ciepłą wodę użytkową (c.w.u.);
- liczba mieszkańców.

Przykładowe wyliczenie doboru ilości kolektorów słonecznych (założenia):

- strefa klimatyczna: Lublin
- nachylenie dachu 45° , ustawienie kolektorów SE
- zapotrzebowanie na c.w.u: $75 \text{ dm}^3/\text{dobę}/\text{osobę}$
- liczba mieszkańców: 5

Tabela 6. Określenie liczby kolektorów słonecznych

Wskaźnik strefy klimatycznej	Wskaźnik nachylenia dachu	Wskaźnik zapotrzebowania c.w.u.	Liczba mieszkańców	Stały współczynnik*	Liczba kolektorów
0,9	1,1	1,0	5	0,4	=1,98 czyli 2 kolektory

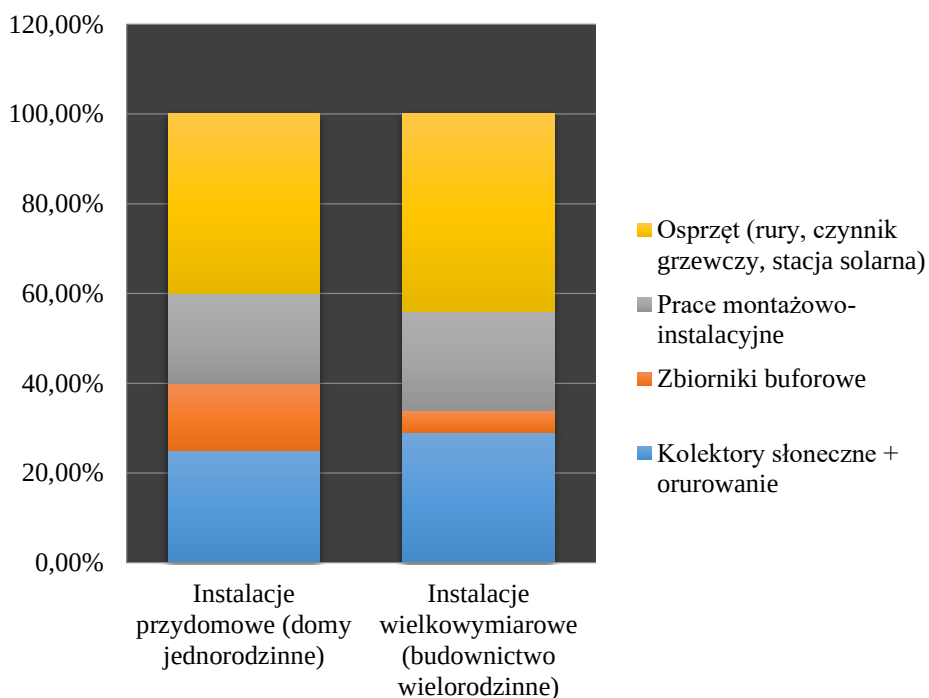
Źródło: [26]

*Wartości odnoszą się do pokrycia średniorocznego zapotrzebowania na c.w.u. w 60%.

Wartość ta może zostać zmieniona poprzez zaokrąglenie (w górę bądź w dół) wyniku liczby kolektorów.

4.1. Koszt instalacji cieplnej

W skład instalacji cieplnej należy się wyposażać w takie elementy jak: kolektory słoneczne, zbiornik na podgrzewaną wodę, zespół pomp, zapewniających cyrkulację czynnika roboczego, regulator temperatury oraz solarne naczynie przeponowe, które zabezpiecza obieg na wypadek wzrostu ciśnienia w instalacji. Koszt zakupu samych kolektorów jest zależny od paru czynników. Wpływ na to ma wielkość powierzchni czynnej, rodzaj absorbera oraz rodzaj zastosowanych materiałów konstrukcyjnych.



Rysunek 9. Struktura nakładów inwestycyjnych dla systemów kolektorów słonecznych

Źródło: [27]

Największe koszty przy budowie systemów kolektorów słonecznych ponosi się na wszelaki osprzęt, na co składa się: stacja solarna, czynnik grzewczy, rury i in. Najmniejszy koszt ponosi się na zakup zbiorników buforowych (Rys. 9). Koszty przydomowej instalacji w odróżnieniu od kosztów instalacji wielkowymiarowych charakteryzuje się przede wszystkim mniejszym udziałem kosztów kolektorów słonecznych oraz większym udziałem kosztów zakupu zasobników ciepłej wody. Jednak koszty pozostałych elementów instalacji jest uzależniony od wielkości instalacji.

5. Dofinansowanie do instalacji kolektorów słonecznych

Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej uruchomił program wsparcia finansowego do mikroinstalacji odnawialnych źródeł energii - PROSUMENT. Celem tego programu jest ograniczenie lub uniknięcie emisji CO₂ w wyniku produkcji energii z odnawialnych źródeł energii, poprzez zakup i montaż małych instalacji lub mikroinstalacji OZE, do produkcji energii elektrycznej lub ciepła dla osób fizycznych, wspólnot mieszkaniowych czy też spółdzielni. Program ten jest kontynuacją i rozszerzeniem zakończonego w 2014 roku programu „Wspieranie rozproszonych, odnawialnych źródeł energii. Część 3. Dopłaty na częściowe spłaty kapitału kredytów bankowych przeznaczonych na zakup i montaż kolektorów słoneczny dla osób fizycznych i wspólnot mieszkaniowych” [28]. Budżet programu wynosi 800 mln zł na lata 2014-2022 z możliwością zawierania umów pożyczek (kredytu) wraz z dotacją do 2020 r.

Dofinansowanie w ramach programu „PROSUMENT”, obejmuje zakup i montaż nowych instalacji i mikroinstalacji odnawialnych źródeł energii do produkcji:

- energii elektrycznej lub,
- ciepła i energii elektrycznej dla potrzeb budynków mieszkalnych jednorodzinnych i wielorodzinnych.

Podstawowymi zasadami udzielania dofinansowania z NFOŚiGW:

- pożyczka lub kredyt preferencyjny wraz z dotacją łącznie do 100% kosztów kwalifikowanych instalacji,
- dotacja w wysokości 20% lub 40% dofinansowania (od roku 2016 odpowiednio 15% lub 30%),

- maksymalna wysokość kosztów kwalifikowanych 100 tys. zł 500 tys. zł, w zależności od rodzaju beneficjenta i przedsięwzięcia,
- został określony maksymalny jednostkowy koszt kwalifikowany dla każdego rodzaju instalacji,
- oprocentowanie pożyczki lub kredytu: 1%,
- maksymalny czas finansowania pożyczką lub kredytem do 15 lat,
- program wyklucza możliwość dofinansowania kosztów przedsięwzięcia z innych środków publicznych.

6. Opłacalność

Instalacja kolektorów słonecznych na basenach bądź też innych większych obiektów architektonicznych, które podgrzewają wodę jest na pewno opłacalna. Przy takich dużych inwestycjach koszt budowy po paru latach się zwraca. Natomiast inaczej jest przy instalacjach w domach jednorodzinnych. Opłacalność ta zależy od paru czynników. Pierwszym z nich jest cena nośnika energii, gdzie prąd jest najdroższym z nich, mniej kosztowny jest gaz płynny, czy olej opałowy. Instalacja solarna powinna tyle wytrzymać ile w ciągu najbliższych kilku czy kilkunastu lat będą drożeć paliwa. Czynnikiem do zakupu kolektorów słonecznych jest obniżenie kosztów ogrzewania wody bądź też mieszkania. Analizując opłacalność instalacji kolektorów słonecznych warto zwrócić uwagę na długoterminowy charakter instalacji solarnej. Wysokość nakładów finansowych na realizację inwestycji w kolektory słoneczne w rzeczywistości jest niższa niż wynika to z kosztów zakupu kompletnego zestawu solarnego [10]. Przy inwestycji należy uwzględnić różnego rodzaju dofinansowania (dopłaty gminne i programy rządowe). Na ilość uzyskiwanej energii cieplnej w instalacjach solarnych

ma wartość energii promieni słonecznych, która zależy od pory roku oraz lokalnych warunków klimatycznych. Opłacalność zależy również od ilości poboru ciepłej wody. Szacunkowo inwestycja w ogrzewania wody za pomocą instalacji kolektorów słonecznych może być opłacalna w perspektywie 15-letniej w gospodarstwie domowym, gdzie zużycie wody nie jest mniejsze niż 280 dm^3 na dobę. Przy mniejszym zużyciu okres ten może się wydłużyć do nawet 25 lat [29]. W warunkach polskich o opłacalności inwestycji można mówić w perspektywie długoletniej, przy założeniu wysokiej trwałości, jakości urządzeń oraz niezawodności jego eksploatacji [30]. W instalacji cieplnej służącej do podgrzewania budynków powierzchnia kolektorów musi być większa niż, gdyby tylko miała służyć do podgrzewania ciepłej wody użytkowej, dlatego też przyjmuje się zwykle, że 1 m^2 powierzchni kolektora przypada na 5 m^2 ogrzewanej powierzchni. Przykładowo do ogrzania domu o powierzchni 200 m^2 potrzebujemy 40 m^2 powierzchni kolektorów słonecznych. Dla rodziny 4 osobowej do ogrzania ciepłej wody instaluje się zaledwie od 6 do 8 kolektorów. Fakt instalacji kolektorów do ogrzania domu trzeba dobrze przemyśleć pod względem opłacalności. Instalacja kolektorów słonecznych w domu jednorodzinnym wiąże się jeszcze problem sezonowego zagospodarowania ciepła wytwarzanego przez kolektory. Najefektywniej kolektory pracują latem, przy dużym nasłonecznieniu. Wytworzone ciepło jest potrzebne wówczas do ogrzania ciepłej wody. Natomiast zimą kiedy to efektywność kolektorów jest niższa, do ogrzania mieszkania i podgrzania wody ciepłej potrzebne jest dogrzanie innymi sposobami. Wówczas instalacje grzewczą podłącza się do centralnego ogrzewania. W warunkach klimatycznych Polski,

instalacja kolektorów może jedynie wspomagać inne urządzenia grzewcze.

7. Podsumowanie

Nieustający wzrost cen energii, który jest spowodowany stopniowym efektem wyczerpania światowych zasobów gazu i ropy naftowej, a także zmiany klimatyczne, zmuszają do poszukiwania nowych źródeł energii. Odnawialne źródła energii w ostatnim czasie stały się jednym z najprężniej rozwijających się sektorów światowej gospodarki. Zainteresowanie instalacją kolektorów słonecznych wciąż wzrasta, ma na to wpływ coraz większa świadomość społeczeństwa na temat zmian klimatycznych. Na wzrost także ma wpływ możliwość dofinansowania budowy instalacji ciepłej. Chęć obniżenia kosztów ogrzania wody użytkowej, a także mieszkań wpływa również na zainteresowanie instalacją kolektorów słonecznych. Instalacja kolektorów słonecznych jest bardzo dobrym rozwiązaniem przyjaznym środowisku oraz człowiekowi, dzięki takiemu rozwiązaniu zmniejsza się emisja dwutlenku węgla do atmosfery. Od roku 2017 sprzedaż kolektorów słonecznych na polskim rynku przekroczy 2 mln m². Po roku 2020 nastąpi potrzeba dostarczenia zakupu nie tylko kolektorów słonecznych oraz systemów instalacji ciepłej, ale także wymiana starych instalacji zabudowanych przed 2000. Po roku 2022 powierzchnia zainstalowanych kolektorów słonecznych w Polsce wyniesie około 0,7 m²/mieszkańca, a w roku 2025 wzrośnie do 1 m²/mieszkańca. Rozwój energetyki w Polsce w nadchodzącej przyszłości zapewni miejsca pracy dla ponad 40 tys. osób. Warto dodać dla porównania, że wg prognozy Europejskiej Rady Energetyki Odnawialnej (EREO) zatrudnieni w sektorze energetyki słonecznej

w całej Unii Europejskiej w 2020 roku wzrośnie do 660 tys. miejsc pracy i będzie najwyższe w całym sektorze energetyki odnawialnej [31].

Energetyka słoneczna jest jedną z najszybciej rozwijających się gałęzi energetyki odnawianej w Polsce i na całym świecie. W latach 2001-2008 średnie roczne tempo wyniosło ponad 43%. Rok 2008 w Polsce był rekordowy pod względem sprzedaży instalacji słonecznej – ok. 130 tys. m², powierzchnia zainstalowanej wyniosła 365 tys. m², co odpowiadało 526 TJ „zielonego” ciepła zużytego na podgrzanie wody użytkowej. Dzięki temu Polska stała się siódmym rynkiem energetyki słonecznej w Unii Europejskiej.

Do roku 2020 kraje wysoko rozwinięte Unii Europejskiej osiągną poziom ok. 20% energii z OZE w bilansie energetycznym poszczególnych krajów, Polska ok. 15%. Z każdym rokiem w krajach Unii Europejskiej rośnie ilość instalacji solarnych montowanych na obiektach użyteczności publicznej (szpitale, sanatoria, hotele) [32].

Literatura:

1. www.giwk.pl [dostęp: 31.01.2016]
2. Klugman – Radzimeska E., 2008; *Praktyczne wykorzystanie energii słonecznej*.
3. Cichy L., *Wykorzystanie kolektorów słonecznych i biomasy w Polsce w świetle wyników badań własnych*, Polityka Energetyczna, 2012, t. 15, nr 2, s. 30.
4. Praca zbiorowa, pod red. Józefa Szlachty. *Niekonwencjonalne źródła energii*. Akademia Rolnicza we Wrocławiu. Wrocław 1999.
5. www.soltec.pl [dostęp: 18.01.2016].
6. www.insbud.org [dostęp: 12.02.2016].
7. Wiśniewski G., Gołębiowski S., Gryciuk M., Kurowski K., Więcka A.: *Kolektory słoneczne. Energia słoneczna w mieszkalnictwie, hotelarstwie i drobnym przemyśle*, 2008.
8. Lewandowski Witold M.: *Proekologiczne Źródła energii*, WNT, Warszawa 2006.
9. www.alternative-energy-tutorials.com [dostęp 10.02.2016]
10. www.hewalex.pl [dostęp: 22.01.2016].
11. www.budujemydom.pl [dostęp: 15.01.2016].
12. Tytko R., 2010. *Odnawialne źródła energii*. OWG, Warszawa.
13. www.poradnik.sunage.pl [dostęp: 20.02.2016].
14. Pabis J., Szeptycki A., 2012. *Wykorzystanie kolektorów słonecznych w suszarnictwie produktów rolnych*. Inżynieria w Rolnictwie. Monografie 8. ITP.
15. Laskowski P.Ł *Nowocześnie, oszczędnie, ekologicznie. Jak poskromić energię słoneczną*. Murator, 312 (2010), nr 4.

16. Głuszek J.: *Polityka Energetyczna*, Politechnika Krakowska, Instytut Inżynierii Chemicznej i Procesowej (C-3), Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Kraków; 2009, str. 10-05.
17. Chwieduk D., *Możliwości wykorzystania energii słonecznej na Lubelszczyźnie*, Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN.
18. www.polskiinstalator.com.pl [dostęp: 19.02.2016].
19. Instytut Energetyki Odnawialnej (EC BREC IEO): *Ocena stanu i perspektyw produkcji krajowej urządzeń dla energetyki odnawialnej*. Ekspertyza na zamówienie Ministra Środowiska, Warszawa, 2007
20. Chochwsi A., Czekałski D., 1999. *Słoneczne instalacje grzewcze*. COIB, Warszawa.
21. www.ekologicznetechnologie.pl [dostęp: 03.02.2016].
22. www.ogrzewanieelektryczne.blogspot.com [dostęp: 29.01.2016].
23. Koźmiński C., Michalska B., 2005, *Usłonecznienie w Polsce*. AR Szczecin.
24. Koźmiński C., Michalska B., 2004, *Usłonecznienie rzeczywiste* [w Atlas zasobów i zagrożeń klimatycznych Pomorza]. AR Szczecin, US Szczecin.
25. www instalacjebudowlane.pl [dostęp: 05.02.2016].
26. www.gospodarzzenergia.pl [dostęp: 15.02.2016].
27. Januszewski J., 1986. *Zasady projektowania urządzeń słonecznych do celów grzewczych*. Politechnika Wrocławska.
28. www.nfosigw.gov.pl [dostęp: 20.02.2016].
29. Kusto Z. 2000a: *Bilans energetyczny i analiza ekonomiczna instalacji słonecznego ogrzewania wody użytkowej*. Zeszyty Naukowe Politechniki Gdańskiej nr 584, Elektryka LXXXVII, str. 53–62.

30. Bogdanienko J. 1995: *Gospodarka energetyczna wybranych krajów Europy Zachodniej*. Wydawnictwo Ekonomia i Środowisko, Białystok, str. 121.
31. www.ekoenergia.pl [dostęp: 21.02.2016].
32. www.ieo.pl [dostęp: 21.02.2016].

inż. Paulina Widz^{1) 2)}, inż. Adam Widz¹⁾, inż. Szczepan Jakubaszek¹⁾,
dr inż. Magdalena Kachel-Jakubowska²⁾, mgr inż. Lidia Duda³⁾

¹⁾Studenckie Koło Naukowe Ekoenergetyków

Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie Akademicka 13, Lublin

²⁾Katedra Eksploatacji Maszyn i Zarządzania Procesami Produkcyjnymi

Wydział Inżynierii Produkcji Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie

¹⁾widz.paulina@gmail.com

Wykorzystanie zintegrowanych systemów OZE

Use of integrated renewable energy systems

Słowa kluczowe: *systemy zintegrowane, pompy ciepła, energia wiatrowa, kolektory słoneczne*

Keywords: *integrated systems, heat pumps, wind energy, solar collectors*

Streszczenie: Racjonalne oraz odpowiedzialne wykorzystanie energii pozyskanej ze źródeł odnawialnych jakimi są: rzeki, wiatr, promieniowanie słoneczne, energia geotermalna oraz biomasa jest jednym z ważniejszych komponentów zrównoważonego rozwoju, przynoszącym wymierne efekty ekologiczno-energetyczne. Znaczący wzrost odnawialnych źródeł energii w bilansie paliwowo-energetycznym świata przyczynia się do poprawy stanu środowiska, oszczędzania surowców energetycznych i redukcję wytwarzanych odpadów. Sektor szeroko pojętej energetyki stoi obecnie przed dużymi wyzwaniami. Powiększający się popyt na energię oraz aktualnie funkcjonujący system jej wytwarzania stanowią realną barierę rozwoju gospodarczego. Wszystkie podejmowane działania powinny dążyć w kierunku tego, aby energia była przyjazna środowisku, dostępna i tania. Energia spełniająca wszystkie trzy warunki będzie fundamentem zrównoważonego rozwoju.

Coraz większa popularność oraz możliwość zastosowania zintegrowanych systemów odnawialnych źródeł energii wiąże się z możliwością ograniczenia emisji dwutlenku węgla, ograniczenia uzależnienia od importu surowców energetycznych, większego wykorzystania krajowego potencjału środowiskowego oraz rozwoju lokalnego. Wykorzystanie w choćby gospodarstwach rolnych kilku różnych technologii energetyki odnawialnej w postaci budownictwa pasywnego, kolektorów słonecznych,

pomp ciepła, mikro-biogazowni, systemów PV (fotowoltaicznych), małych elektrowni wiatrowych z całą pewnością będzie sprzyjać zwiększeniu efektywności tych urządzeń, oraz bezpieczeństwu energetycznemu lokalnych odbiorców energii. Pozyskiwanie energii elektrycznej i ciepła z odnawialnych źródeł energii przynosi nie tylko korzyści, ale też często „zielona energia” postrzegana jest jako droższe źródło energii.

1. Wstęp

W obecnych czasach coraz częściej można spotkać powiązane ze sobą systemy odnawialnych źródeł energii, określane jako zintegrowane systemy OZE tworzące mikrosieci, które współpracują ze sobą i wzajemnie się ze sobą uzupełniają oraz zapewniając niezależność zasilania na wypadek przerwy w dostawie energii. Najczęściej spotykanymi rozwiązaniami są połączenia kolektorów słonecznych z małymi przydomowymi turbinami wiatrowymi. Ten sposób połączenia daje bezpieczeństwo użytkownikowi tego systemu.

Zmieniające się warunki funkcjonowania gospodarstw rolnych, rosnące wymagania proekologiczne, a także efekty ekonomiczne sprawiają, że społeczeństwo poszukuje alternatywnych nośników energii. Szacuje się, że do 2030 r. przy sprzyjających warunkach i wsparciu ze strony państwa będzie możliwy udział 5-10% energii odnawialnej w ogólnokrajowym biznesie energetycznym [1]. Odnawialne źródła energii mogą stanowić istotny udział w bilansie energetycznym poszczególnych gmin, a nawet województw naszego kraju. Mogą przyczynić się do zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego regionu, a zwłaszcza do poprawy zaopatrzenia w energię na terenach słabo rozwiniętych w infrastrukturze energetycznej. Potencjalnie największymi odbiorcami energii z odnawialnych źródeł energii może być rolnictwo,

ale także domy jedno rodzinne oraz komunikacja. Istnieje niemal powszechna zgoda, że rozwój energetyki opartej na źródłach odnawialnych może przyczynić się do rozwiązania wielu problemów ekologicznych stwarzanych przez energetykę konwencjonalną. Wzrost zapotrzebowania na energię, spowodowany szybkim rozwojem gospodarczym, ograniczoną ilością zasobów kopalnianych oraz nadmiernym zanieczyszczeniem środowiska, spowodował w ostatnich latach duże zainteresowanie odnawialnymi źródłami energii [2].

2. Zintegrowane systemy OZE

Budowa i instalacja zintegrowanych systemów OZE jest racjonalnym i efektywnym sposobem na zwiększenie niezawodności ekologicznego systemu energetycznego pracującego w danych warunkach klimatycznych. Jest to wykorzystanie kilku lokalnie dostępnych źródeł energii odnawialnej tworząc tzw. systemy zintegrowane [3]. Każde ze źródeł odnawialnych (m.in. energia wiatrowa, energia słoneczna, energia wody biogaz, biomasa) ma zarówno swoje wady, jak i zalety, lecz umiejętne i optymalne zintegrowanie pozwala na maksymalne wykorzystanie ich możliwych zalet, a jednocześnie na znaczną minimalizację ewentualnych konsekwencji ich wad. Korzyści ekonomiczne z zastosowania zintegrowanych systemów energetyki odnawialnej to przede wszystkim mniejszy koszt eksploatacyjny (przy wciąż stosunkowo wysokich nakładach inwestycyjnych) i bardziej przyjazny ekologicznie wpływ na otaczające środowisko naturalne. Stworzenie zintegrowanego systemu zapewni płynną i efektywną dostawę energii do gospodarstwa (np. ciepło uzyskiwane z biomasy, promieniowania słonecznego, ewentualnie rezystancyjnych grzejników

elektrycznych wykorzystane jest do ogrzewania budynku mieszkalnego lub szklarni). Podstawowym założeniem zintegrowanych systemów z OZE jest to aby potrzeby energetyczne obiektu (zarówno gospodarstwa rolnego jak i domu mieszkalnego) w maksymalnym stopniu mogły być pokrywane energią otrzymaną z lokalnie dostępnych zasobów odnawialnych, a korzystanie z energii z nośników kopalnych ograniczyć do niezbędnego minimum [4].

Zintegrowane systemy OZE wiążą się z wieloma zaletami jakie mogą wynikać z realizacji i budowy tego typu instalacji. Przykładami mogą być m.in. korzyści wynikające ze:

- zmniejszenie zużycia tradycyjnych środków energii,
- zmniejszenie szkodliwości oddziaływania na środowisko,
- zwiększenie produktywności danego obiektu rolniczego,
- zwiększenie dyspozycyjności i niezawodności systemu energetycznego,
- zwiększenie parametrów jakościowych produkcji rolniczej (np. lepsza jakość suszu, uzyskanie wysokogatunkowego nawozu organicznego, itp.) [5].

Budowa instalacji musi być tak zaprojektowana aby spełniała zapotrzebowanie energetyczne gospodarstwa, które wynika m.in. ze specyfiki i parametrów procesów produkcyjnych oraz profilu produkcji. Powinna być także dostosowana do warunków klimatycznych i geodezyjnych istniejących na danym terenie.

2.1. Systemy wsparcia

Cele jakie zakładają kraje aby osiągnąć zwiększenie udziału energii ze źródeł odnawialnych w bilansie energetycznym to ok 15%

w 2020 roku w strukturze zużycia pierwotnych nośników energii, zgodnie ze zobowiązaniami przejętymi przez Polskę w Brukseli, oraz zmniejszeniem CO₂ o ok 20% [6]. Wejście w życie ustawy o odnawialnych źródłach energii (ustawy z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. z 2015 r., poz. 478)) można podzielić na następujące etapy:

- 1) W dniu 4 kwietnia 2015 r. wchodzi w życie zmienione przepisy w zakresie obowiązku uzyskania i przedstawienia do umorzenia świadectw pochodzenia;
- 2) Od dnia 1 maja 2015 r. można się ubiegać o wydanie przez Prezesa URE zaświadczenia o dopuszczeniu do udziału w aukcji;
- 3) Z dniem 4 maja 2015 r. co do zasady zaczyna obowiązywać ustawa o odnawialnych źródłach energii;
- 4) Od dnia 1 października 2015 r. wejdą w życie postanowienia dotyczące Operatora Rozliczeń Energii Odnawialnej S.A.; oraz
- 5) Z dniem 1 stycznia 2016 r. zaczyna obowiązywać nowy system wsparcia. Jednocześnie należy również pamiętać o terminach wypełnienia obowiązków przewidzianych w ustawie, takich jak na przykład termin dostosowania umów przyłączeniowych.

W Polsce jako zachętę do rozwoju OZE stosuje się tzw. „system portfela”. Odnosi się to do obowiązku zakupu lub wytworzenia odpowiedniej ilości energii w ciągu roku z OZE przez jednostki związane z obrotem energią. System wsparcia które odnoszą się do odnawialnych źródeł, które produkują energię elektryczną został oparty o obowiązki:

- zakupu świadectw pochodzenia lub uiszczenia opłaty zastępczej,
- zakupu energii elektrycznej (tylko OZE),

- odbioru i przesyłu energii elektrycznej z instalacji przyłączonych bezpośrednio do sieci danego operatora.

Obowiązującym obecnie w naszym kraju systemem wsparcia, tzw. świadectwo pochodzenia (zielone certyfikaty). Jest to potwierdzeniem wytworzenia energii elektrycznej w źródłach odnawialnych. Zielone certyfikaty potwierdzają ilość energii elektrycznej wytworzonej w odnawialnym źródle energii. Charakteryzuje się wartością materialną zbywalną na rynku. Są to dokumenty wydawane przez prezesa Urzędu Regulacji Energetyki (URE). Certyfikaty podlegają obrotowi na Towarowej Giełdzie Energii. Są nabywane przez przedsiębiorstwa, które mają nadwyżkę produkcji energii z OZE, którzy przez zbycie zielonych certyfikatów mogą uzyskać dodatkowe źródło przychodu. Przedsiębiorstwa, które się nie wywiązują się z tych obowiązku, muszą dokupić brakującą liczbę certyfikatów lub uiścić opłatę zastępczą [7].

Dla nowych instalacji OZE, w których energia elektryczna wyprodukowana została po raz pierwszy po 1 stycznia 2016 r. i w których urządzenia wchodzące w skład tych instalacji zostały wyprodukowane nie później niż 48 miesięcy (lub 72 miesiące w przypadku instalacji wykorzystujących siłę wiatru na morzu) przed dniem wytworzenia po raz pierwszy energii elektrycznej, a także opcjonalnie dla dotychczasowych wytwórców energii oraz wytwórców zmodernizowanych instalacji został przewidziany aukcyjny system wsparcia. Wg ustawy z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii ma na celu wsparcie dla instalacji wykorzystujących odnawialne źródła energii w sposób efektywny kosztowo. Oznacza to, że środki przeznaczane na wsparcie wytwarzania energii elektrycznej z OZE będą trafiały w pierwszej kolejności do wytwórców energii (którzy zaakceptują cenę rynkową

za jednostkę energii elektrycznej- niezależnie od instalacjach w której zostaje wytworzona).

Zgodnie z ustawą o OZE, ceny referencyjne dla nowych inwestycji w odnawialne źródła energii wyniosą dla poszczególnych technologii:

- biogazownie rolnicze o mocy do 1 MW – 450 zł/MWh
- biogazownie rolnicze o mocy powyżej 1 MW – 435 zł/MWh
- biogazownie wykorzystujące biogaz ze składowisk odpadów – 210 zł/MWh
- biogazownie wykorzystujące biogaz z oczyszczalni ścieków – 400 zł/MWh
- wytwarzanie energii elektrycznej z odpadów przemysłowych lub komunalnych, ulegających biodegradacji, w tym z odpadów z uzdatniania wody i oczyszczania ścieków, w szczególności osadów ściekowych w instalacji termicznego przekształcania odpadów – 385 zł/MWh
- elektrownie wiatrowe na lądzie o mocy do 1 MW – 415 zł/MWh
- elektrownie wiatrowe na lądzie o mocy powyżej 1 MW – 385 zł/MWh
- elektrownie wodne o mocy do 1 MW – 445 zł/MWh
- elektrownie wodne o mocy powyżej 1 MW – 480 zł/MWh
- geotermia – 455 zł/MWh
- fotowoltaika o mocy do 1 MW – 465 zł/MWh
- fotowoltaika o mocy powyżej 1 MW – 445 zł/MWh.

W przypadku gdy instalacja już była zainstalowana ustawa o OZE określa cenę referencyjną jako sumę średniej ceny sprzedaży energii elektrycznej na rynku konkurencyjnym w poprzednim kwartale

oraz kwoty 239 złotych i 83 groszy za 1 MWh. Wartość ta została ustalona przez Ministerstwo Gospodarki na podstawie średniej wartości transakcji na rynku zielonych certyfikatów (indeks PM OZE A) na Towarowej Giełdzie Energii w latach 2011-2013 [8].

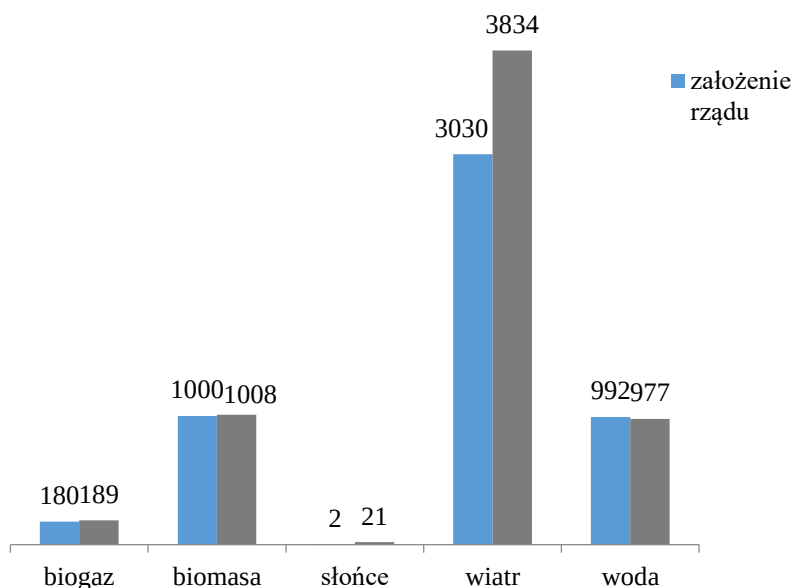
3. Stan obecny a możliwości wykorzystania OZE

Polska, jako członek Unii Europejskiej, wprowadza rozwiązania prawne dotyczące odnawialnych źródeł energii opierające się na europejskich regulacjach prawnych:

- „Strategia rozwoju energetyki odnawialnej” przyjęta przez Sejm RP 23.08.2001r.
- „Polityka energetyczna państwa do 2025r”
- „Polityka Ekologiczna Państwa na lata 2007-2010 z uwzględnieniem perspektywy na lata 2011-2014”.

Polscy naukowcy od wielu lat prowadzą badania oraz analizy, które mają dać odpowiedź na pytanie, czy w Polsce są warunki na optymalne wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, czy warto inwestować w rozwój tego typu instalacji. Natomiast w Europie oraz na całym świecie wykorzystuje się ją i to w coraz większym stopniu [9]. Energia wiatru, geotermalna, słońca, biomasy, wody oraz inne OZE systematycznie zwiększają swój udział w strukturze paliw pierwotnych. Odnawialne źródła energii w naszym kraju rozwijają się szybciej niż wymaga tego od nas UE. Wzrost udziału OZE w ogólnych zapotrzebowanych Polski przewyższa nawet oczekiwania naszego rządu. Zgodnie z unijną dyrektywą minimalny cel dla Polski wynosił 9,54% na lata 2013-2014. Natomiast cel na koniec 2020 roku do którego dążymy

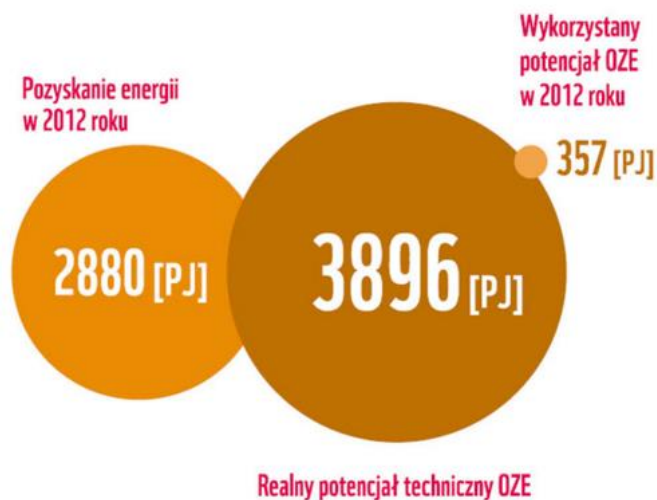
do 15% udział odnawialnych źródeł energii w końcowym zużyciu energii brutto (Rys. 1) [8].



Rysunek 1. Planowana i rzeczywista moc OZE w Polsce na koniec 2014 roku MW

Źródło: Opracowanie własne na podstawie www.gramwzielone.pl [8]

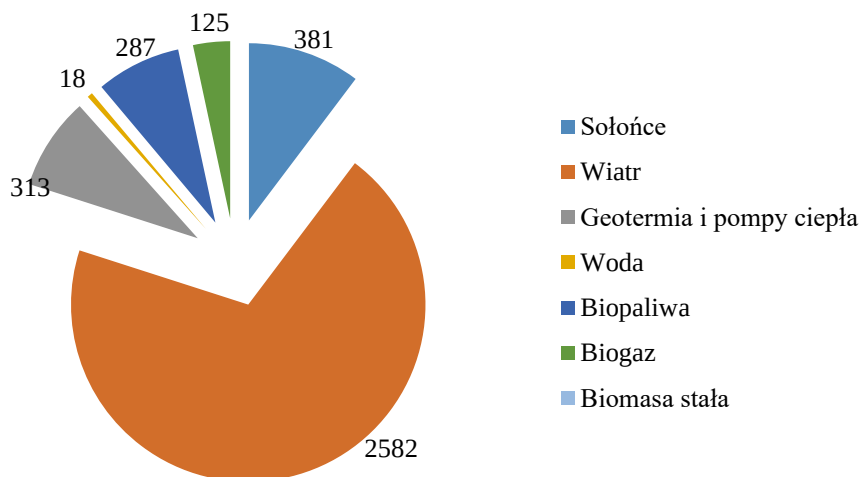
Szacuje się, że całkowity potencjał techniczny energii odnawialnej może nawet 100 krotnie przekraczać obecne światowe zapotrzebowanie energetyczne. W Polsce także występują bogate zasoby energii odnawialnej, które o 26% przewyższają krajowe zapotrzebowanie na energię. Niestety tylko w niewielkim stopniu wykorzystujemy ten potencjał. W roku 2012 wykorzystaliśmy 357 PJ z dostępnych 3896 PJ, czyli około 9% (Rys. 2) [10].



Rysunek 2. Możliwości wykorzystania odnawialnych źródeł energii w Polsce do 2020 roku

Źródło: www.ekologicznaelektrownia.pl [10]

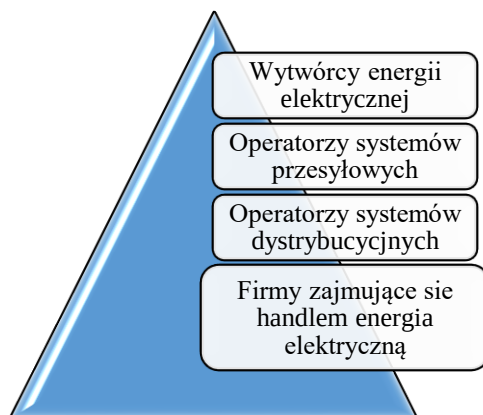
Spośród dostępnego potencjału najwięcej energii jesteśmy w stanie uzyskać z: wiatru, słońca, geotermii i pomp ciepła (Rys. 3).



Rysunek 3. Podział potencjału OZE w Polsce w PJ

Źródło: Opracowanie własne

We współczesnych czasach produkcja energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii ma zastosowanie na coraz większą skalę. To oznacza, że ten rodzaj pozyskiwanej energii stanowi coraz istotniejszy element pokrycia zapotrzebowania odbiorców na energię elektryczną, w tym sektorze publicznym zarówno w UE jak i w Polsce. Na polskim rynku można wyróżnić następujące grupy podmiotów, które są w tzw. łańcuchu dostaw zielonej energii elektrycznej do konsumenta (Rys. 4) [11].



Rysunek 4. Dostawa zielonej energii w kolejności od producenta do konsumenta

Źródło: Opracowanie własne

4. Nowoczesne systemy energetyczne

Woda – słońce

Systemy energetyczne „woda – słońce” mogą być szczególnie ekonomicznie, efektywne gdy sieci energetyczne są oddalone od głównych sieci energetycznych, są w regionach nieuprzemysłowionych, oraz charakteryzują się sezonową zmiennością obu tych źródeł energii. Wykorzystuje się je np. w Azji, Ameryka Południowej czy Australii). System ten stanowi ważne ogniwo w lokalnej

infrastrukturze energetyki rozproszonej i dostarczając taną energię elektryczną. Na kontynentach tych, w które korzystają głównie z takiego zintegrowanego systemu, jest wzajemną naprzemienną sezonowa co do ich intensywności (np. energia słońca dominuje w czasie suszy przy ograniczonym natężeniu przepływu wód, zaś w porze deszczowej, kiedy z kolei nie ma możliwości efektywnego wykorzystania energii słonecznej jest nadmiar wody). W takim przypadku woda (np. deszczowa) może być również magazynowana w systemie zbiorników retencyjnych na odpowiednio wyższej wysokości względnej i doprowadzana do łopatek hydroturbiny dopiero w sytuacji, gdy zajdzie taka potrzeba. Wykorzystać ją można gdy zachodzi potrzebą lub w czasie awarii instalacji, w sytuacji doraźnego braku energii słonecznej (np. zachmurzenia, przy jednoczesnym niskim poziomie wody w rzekach).

Systemy hybrydowe oparte na czystych źródłach energii są bardziej opłacalne ekonomicznie (m. in. mniejszy koszt eksploatacyjny), lecz uzależnienie od nieprzewidywalnych warunków pogodowych, ogranicza w 100% wykorzystanie jej.

Woda – wiatr

Innym możliwym połączeniem różnych źródeł energetyki odnawialnej jest zintegrowanie energii wiatru i energii wodnej. Połączenie tych dwóch źródeł energii odnawialnej prowadzi do tworzenia niezawodnych i stabilnych rozwiązań technicznych m.in. dla małych, lokalnych sieci energetycznych, np. wysp greckich (na Morzu Egejskim) lub północnej Portugalii.

System hybrydowy typu „woda – wiatr” składa się zazwyczaj z zespołu turbin wiatrowych, które umieszczone są na niewielkiej

przestrzeni oraz ze stacji pomp, gdzie woda jest tłoczona i magazynowana w sytuacji wystąpienia niewykorzystanej nadwyżki energetycznej pochodzącej z zespołu turbin wiatrowych, a przekazywanej silnikowi pompy. Pompy napędzane wiatrem napędzają pompę która może gromadzić wodę w wyżej położonych zbiornikach do wykorzystania hydroturbin w okresach niedoboru wiatru. Ta zgromadzona woda w zbiorniku ma zastosowanie w przypadku braku wiatru. Dodatkowo istnieje możliwość podłączenia takiego zintegrowanego układu energetycznego do lokalnej sieci energetycznej i uzupełnienia jej w zakresie ewentualnych niedoborów energetycznych. Należy niemniej jednak pamiętać że, energia wiatru z uwagi na zmienność pogody może powodować wahania energetyczne i być źródłem niestabilności lokalnego systemu energetycznego. Wahania te uzupełniane są przez hydroenergetykę, która w pewnym stopniu łagodzi wahania energii.

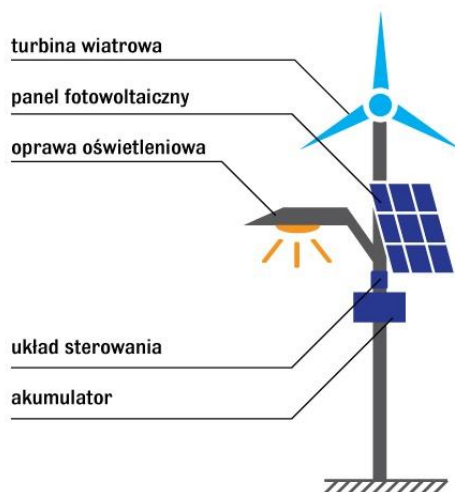
Tego typu zintegrowane systemy budowane są także w Meksyku, gdzie istnieją znaczne zasoby energii wodnej i wiatrowej. Planuje się wybudowanie tego rodzaju systemów o nominalnych wartościach mocy w zakresie 20-50 MW, m.in. w Oaxaca lub na zaporze wodnej „Presidente Benito Juarez” w Jalapa del Marques, Oaxaca. Przewiduje się budowę systemu hybrydowego, czyli hydroturbinę o mocy nominalnej 20 MW oraz zespół turbin wiatrowych o mocy nominalnej 20,4 MW. Prognozuje się, że współczynnik rocznej wydajności tego rodzaju systemu może wynosić w 49,5%. Na osiągnięcie wskaźnika wpływa wiele parametrów m.in.:

- lokalne zasoby wiatru (uwarunkowania klimatyczne, bliskość morza lub gór itp.),

- zastosowanie wiatrowych turbin energetycznych (liczba, wydajność, typ, konstrukcja),
- zasoby wodne i ich przydatność energetyczna (uwarunkowana ekonomiczne),
- charakterystyka hydrogeologiczna (dostępność zasobów wodnych oraz ich sezonowa dostępność),
- wydajność i charakterystyka generatorów hydroturbiny oraz turbiny wiatrowej.

Słońce- wiatr

Systemy energetyczne „słońce – wiatr” są rozpowszechnione w Europie, jak i zarówno w Polsce. Rozwiązania te głównie służą do pozyskiwania energii z odnawialnych źródeł energii przekształcenie jej w systemy oświetleniowe. Zintegrowane systemy wykorzystywane są do produkcji, magazynowania i zużycia energii elektrycznej. Przykładem może być wykorzystanie energii m.in. do oświetlenia ulic, chodników, parkingów oraz placów (Rys. 5).



Rysunek 5. Systemy oświetleniowe

Źródło: www.bisonenergy.pl [12]

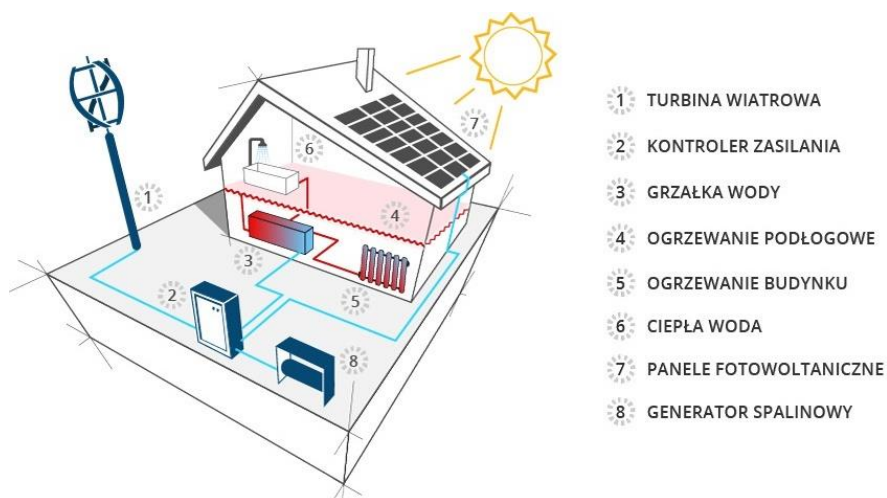
Podstawowymi elementami zestawu oświetleniowego jest:

- źródło światła (najczęściej oprawy typu LED)
- panele fotowoltaiczne (baterie słoneczne) i/lub turbina wiatrowa
- regulator ładowania (sterownik) – odpowiedzialny za zarządzanie systemem
- akumulator (bateria)
- przewody elektryczne
- stelaż.

Ze względu na swoją konstrukcję oraz z uwagi na pozyskiwanie energii (promieniowanie słoneczne oraz energia wiatru), systemy te zasilane mogą być całkowicie z odnawialnych źródeł energii. Programowalny regulator umożliwia automatyczne sterowanie oświetleniem, optymalne parametry pracy oraz ładowanie baterii (akumulatory – odporne na warunki otoczenia). Dobrze zaprojektowany oraz skonstruowany system pozwoli na zachowanie ciągłości pracy nawet w sytuacji, gdy przez kilka dni będzie panowała pochmurna i bezwietrzna pogoda. Rozwiązanie to wykorzystane może być oprócz oświetlenia ulic, czy chodników do oświetlenia reklam (np. billboardy, szyldów), prywatnych posesji (np. oświetlenie domów, altan, wiat), placów zabaw, boiska szkolne, przystanki autobusowych, oznakowani drogowych (np. przejścia dla pieszych, łuki czy zakręty) itp.

Dwa niezależne źródła energii (słońce - wiatr) mogą być łączone w celu zwiększenia niezawodności dostaw energii, zmniejszenia wysokości rachunków lub do utrzymania dostaw energii poza siecią. Montowane mogą być na domach mieszkalnych zasilając sieć domową (Rys. 6). Systemy te również mogą być zintegrowane z większością budynków i są często powiązane z systemem magazynowania energii

w zestawach akumulatorów, rozwiązanie to zapewnia bezpieczeństwo w przypadku kryzysu energetycznego lub braków w zasileniach.



Rysunek 6. Wykorzystywanie energii wiatru oraz słońca na cele grzewcze - praca wyspowa

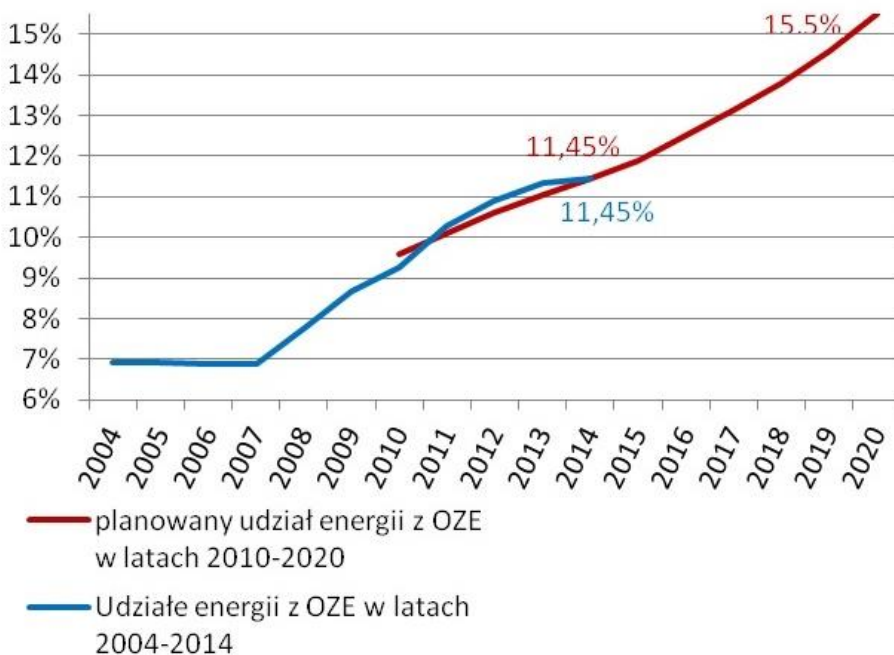
Źródło: www.elektrownie-wiatrowe.pl [13]

Budowa hybrydowych systemów wytwórczych wykorzystujących odnawialne zasoby energii pierwotnej, które są zlokalizowane blisko odbiorców, pozwoli uniknąć części kosztów przesyła i dystrybucji energii. Tego typu instalacje mają znaczenie dla ochrony środowiska, gdyż źródła te nie emitują zanieczyszczeń.

5. Rozwój OZE w Polsce

Z roku na rok w Polsce zwiększa się udział energii z odnawialnych źródeł (OZE). W 2014 roku udział "zielonej" energii w Polsce wyniósł 11,45%, w stosunku do indykatywnego celu w wysokości 9,5%, zaś w 2015 roku udział energii elektrycznej wyniósł ok. 13,6%, a więc był o 0,6 pp. większy, niż planował rząd. Udział

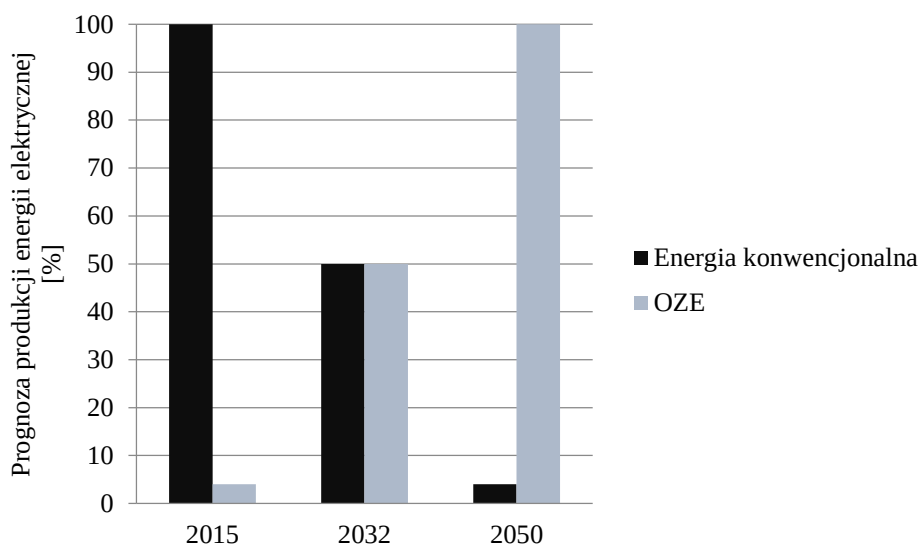
energii ze źródeł odnawialny w Polsce (rzeczywisty i planowany) ukazuje rysunek 7.



Rysunek 7. Udział energii ze źródeł odnawialny w Polsce rzeczywisty i planowany przez rząd

Źródło: www.pyportal.pl [14]

Według prognoz bilans energii w Polsce w która oparta jest na elektrowniach konwencjonalnych, w 2030 r. zmaleje on do 56,2%, a udział OZE wzrośnie poprzez same farmy wiatrowe do 15,3%.



Rysunek 8. Prognoza produkcji energii elektrycznej w latach 2032-2050

Źródło: Opracowanie własne

Kończące się zasoby węgla kamiennego, których wydobycie zostanie zakończone maksymalnie w 2050 r. eliminuje w sposób naturalny rozważanie wariantu nad rozwojem, restrukturyzacją, modernizacją tego sektora. Rysunek pokazuje produkcję energii elektrycznej w latach 2032-2050. Wynika z niego, że instalacje OZE wzrosną do aktualnego poziomu na jakim znajduje się teraz energia konwencjonalna w naszym kraju [15].

Finansowanie przedsięwzięć w zakresie OZE

Ocena efektywności, prężności i udziału w alternatywnych źródłach energii w naszym kraju wymaga uwzględnienia finansowych pobudek, spojrzenia na problem z innego punktu widzenia jakim jest świadomy oraz maksymalny dobrobyt społecznego, ale także wpływ źródeł konwencjonalnych na nasze środowisko [16]. Tradycyjny rachunek ekonomiczny, w którym porównujemy przyszłe korzyści finansowe do wartości obecnej, nie spełnia oczekiwań inwestorów,

ponieważ podnoszące się z roku na rok koszty inwestycji są przeciwstawiane bardzo z zamierzonymi. Korzyści te są jednak dużą niewiadomą ponieważ prognozy rozwoju nie zawsze mogą przewidzieć zachowania rynku energetycznego. Biorąc pod uwagę kryterium efektywności ekonomicznej można powiedzieć, iż obligatoryjnym narzędziem oceny projektów publicznych jest powszechna analiza kosztów i korzyści tzw.–Cost-Benefit Analysis-CBA. Większość wykorzystuje tą metodę, ponieważ jest uznawana za bardzo skuteczne narzędzie wspierające proces podejmowania decyzji alokacyjnych w sektorze publicznym [17]. Podczas dokonywania analizy kosztów i korzyści inwestycji w OZE należy rozróżnić klasyczną ocenę opłacalności inwestycji od analizy wszystkich kosztów i wszystkich korzyści, jakie są wytwarzane przed podjęcie takiego przedsięwzięcia. Klasyczna analiza efektywności przedsięwzięcia inwestycyjnego polega na analizie wydatków i wpływów związanych z inwestycją które występują w trakcie lub w krótkim okresie po jego realizacji. Kategorie brane pod uwagę podczas analizy opłacalności inwestycji nie mogą być ponownie liczone w analizie kosztów i korzyści społecznych, by nie zakłócić właściwej oceny. Wiadomym jest fakt iż inwestorowi zależy na potwierdzeniu, że projekt inwestycji generuje przyływy pieniężne. Cała analiza opłacalności obejmuje szacowanie, analizę i wycenę niezbędnych nakładów inwestycji, wytwarzanych produktów oraz przyszłych korzyści netto wyrażonych w kategoriach finansowych [17]. Analiza kosztów i korzyści społecznych jest to element etapu analizowania danego projektu pod kątem społeczności lokalnej, natomiast analiza opłacalności skierowana jest zdecydowanie na spojrzenie ze strony inwestora na daną inwestycję, który ocenia możliwości

finansowe i ewentualne zyski lub straty poniesione z wkładu własnego inwestora w dany projekt.

Do analizy kosztów i korzyści możemy zaliczyć:

- społeczną wycenę efektów
- analizę wrażliwości i podejmowanego ryzyka
- zdefiniowanie innych scenariuszy realizacji inwestycji
- określenie kosztów i korzyści.

Inwestorzy, którzy próbują wdrażać na rynek alternatywne źródła energii muszą brać pod uwagę szereg aspektów społecznych jak i zarówno finansowych, aby zbadać czy inwestycja przyniesie zysk. Poważnym problemem jednak jest fakt iż nawet przy dobrych rokowaniach analiz opłacalności oraz analiz kosztów i korzyści społecznych dochód, który przyniesie projekt jest znacznie oddalony od etapu inwestycji [18]. W Polsce środki finansowe przeznaczane na ochronę środowiska głównie pochodzą ze źródeł krajowych. Fundusze Europejskie przyznane Polsce na lata 2014-2020 są ogromną szansą na rozwój małych oraz średnich przedsiębiorstw. W ramach tego budżetu Polska jest w stanie dostać ponad 100 mld euro. Fundusze Europejskie przewidziane są również na działania w zakresie obniżenia emisji zanieczyszczeń oraz działania, które przyczynią się do wzrostu udziału energii wytwarzanej z odnawialnych źródeł energii.

Szczególną wagę w zakresie wspierania odnawialnych źródeł energii ma mieć program „Prosument”, wdrażany przez Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej. Program ma na celu zmniejszenie lub rozłożenie w czasie kosztów ponoszonych przez osoby które wytwarzają energię. Beneficjentami programu są osoby fizyczne, a także spółdzielnie mieszkaniowe i wspólnoty mieszkaniowe posiadające

prawo do dysponowania nieruchomością. Osoba zainteresowana uzyskaniem wsparcia ma prawo wyboru dofinansowania pożyczką lub kredytem, które obejmuje do 100% kosztów. Uzyskanie wsparcia w ramach programu „Prosument” jest możliwe jedynie dla tych, którzy chcą wytwarzać energię z mikro lub małej instalacji [19].

6. Podsumowanie

Coraz większa popularność oraz możliwość dofinansowania w odnawialne źródła energii powoduje, że społeczeństwo coraz chętniej i częściej inwestuje w tego typu rozwiązania. Obecnie można albo korzystać z jednego źródła energii, albo stworzyć system produkcji energii oparty na szeregu osiągalnych zasobów energetycznych. Zintegrowane systemy na ten moment są rozwiązaniem nowoczesnym w Polsce. Coraz częściej duże przedsiębiorstwa wykorzystują tego typu rozwiązania w celu ograniczenia zużycia energii konwencjonalnej do oświetlania parkingów czy terenów przyzakładowych. Zastosowanie zintegrowanych systemów odnawialnych źródeł energii wiąże się ograniczeniem importu surowców energetycznych, co się wiąże z większym wykorzystaniem krajowego potencjału środowiskowego oraz rozwoju lokalnego. Rozwój OZE jest jednym z priorytetów wymienionych w dokumencie Polityka Energetyczna Polski do 2030 roku, dla tego każdy z nas może korzystać i zainwestować w odnawialne źródła energii.

Literatura:

1. Węglarz A., Pietraczyk P., Wielomska M., *Inteligentne systemy zarządzania użytkowaniem energii (IEM)*, Fundacja Instytut Na Rzecz Ekorozwoju, Warszawa, 2011.
2. Kudełko M. (2008), *Internalizacja kosztów zewnętrznych powodowanych przez krajowy sektor energetyczny – analiza kosztów i korzyści*, „Polityka Energetyczna”, t. 11, zeszyt 1, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków.
3. Mielczarski W., *Odnawialne źródła energii*. Wag the Dog. '07, Energy Newsletters nr 8, Łódź, 2015.
4. Battistelli C., Conejo A., *Optimal management of the automatic generation control service in smart user grids including electric vehicles and distributed resources*, Electric Power Systems Research, 111 (2014), n.6, str. 22-31.
5. Dec B, Krupa J.: *Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii w aspekcie ochrony środowiska*, www.wsiz.rzeszow.pl [dostęp 16.01.2016]
6. Graczyk M, Kaźmierczak-Piwko L.: *Ekoinnowacje na rynku wytwarzania energii – w stronę poprawy efektywności i pełnego zatrudnienia*, www.przeglاد.wsb.net.pl [dostęp: 16.02.2016].
7. Agencja Rynku Energii: *Aktualizacja Prognozy zapotrzebowania na paliwa i energię do roku 2030*, Warszawa, 2011.
8. www.gramwzielone.pl [dostęp: 16.02.2016].
9. Ministerstwo Gospodarki: *PEP 2030 – Prognoza zapotrzebowania na paliwa i energię do 2030 roku*. Załącznik 2 do „Polityki energetycznej Polski do 2030 roku”, Warszawa, 2009.
10. www.ekologicznaelektrownia.pl [dostęp: 16.02.2016].

11. www.uzp.gov.pl [dostęp: 16.02.2016].
12. www.bisonenergy.pl [dostęp: 16.02.2016].
13. www.elektrownie-wiatrowe.pl [dostęp: 16.02.2016].
14. www.pvportal.pl [dostęp: 16.02.2016].
15. Departament Analiz Strategicznych Kancelarii Prezesa Rady Ministrów: *Model optymalnego miksu energetycznego dla Polski do roku 2060 – model DAS*, Warszawa, 2013.
16. Kudełko M., Suwała W., Kamiński J. Krzyński P.: *Modelowanie rynków energii dla różnych systemów dystrybucji uprawnień do emisji dwutlenku węgla*, „Studia, Rozprawy, Monografie”, nr 173, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Kraków, 2011.
17. Krystosiak P. *Koszty i korzyści inwestycji w obiektach wytwarzających energię ze źródeł odnawialnych*, pod red. Niedziółka D., wyd. CeDeWu Warszawa 2012, str. 117.
18. Kudełko M., Wejer M.: *Selected implications of negative externalities – on the example of the Polish energy sector*, „Managerial Economics”, Vol. 15, No. 2, Wydawnictwa AGH, Kraków, 2014.
19. Popczyk J., *Prosumenctwo – innowacja przełomowa*, Energetyka ciepłna i zawodowa, nr 2. 2014, www.paiz.gov.pl [dostęp: 16.02.2016].