



**Innowacje
w odnawialnych
źródłach energii**

INNOWACJE W ODNAWIALNYCH ŹRÓDŁACH ENERGII

Praca zbiorowa pod redakcją
Przemysława Jury
Mariana Banasia

Katowice, czerwiec 2024 r.

Recenzent

Piotr Michalak

Redakcja naukowa

Przemysław Jura, Marian Banaś

Autorzy

Tadeusz Pająk, Przemysław Jura, Krzysztof Szczotka, Jakub Szymiczek,
Szymon Pelczar, Andrzej Habryń, Przemysław Zych

Redakcja i formatowanie tekstu

Bartosz Kielichowski

ISBN 978-83-68422-01-6

DOI: 10.54264/M048

Wydawca: Akademia Śląska

Wydawnictwo Wyższej Szkoły Technicznej w Katowicach

40-555 Katowice, ul. Rolna 43;

tel.: (32) 60 72 429; 202 50 34,

e-mail: kontakt@wydawnictwo.wst.pl;

www.wydawnictwo.wst.pl; www.wst.pl

Spis treści

WASTE TO ENERGY – INNOWACJE I WYZWANIA	4
INNOWACJE W ODNAWIALNYCH ŹRÓDLACH ENERGII - W ASPEKCIE SPRĘŻARKOWYCH POMP CIEPŁA	13
TRANSFORMACJA ENERGETYCZNA A WYKORZYSTANIE PRZESTRZENI – PRODUKCJA ROLNICZA, ELEKTROWNIA FOTOWOLTAICZNA, CZY AGROFOTOWOLTAICZNA?.....	30
INNOWACJE W TECHNOLOGIACH FOTOWOLTAICZNYCH ORAZ WIATROWYCH	63
NOWOCZESNE METODY MAGAZYNOWANIA ENERGII: KLUCZ DO EFEKTYWNEGO WYKORZYSTANIA OZE	87
INNOWACJE I WYZWANIA W BRANŻY FOTOWOLTAICZNEJ.....	109
R290 CZYNNIK PRZYSZŁOŚCI DLA SPRĘŻARKOWYCH POMP CIEPŁA	117

Waste to energy – Innowacje i wyzwania

Prof. Tadeusz Pająk

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Streszczenie: Artykuł autorstwa prof. Tadeusza Pajaka z Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie omawia znaczenie i rozwój technologii odzysku energii z odpadów (WtE), zwracając uwagę na ich kluczową rolę w transformacji energetycznej i ochronie klimatu. Instalacje WtE są istotnym elementem gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ) oraz dążeniem do redukcji emisji CO₂, przekształcając odpady w energię elektryczną i ciepłą. W artykule opisano historię rozwoju WtE w Polsce, która rozpoczęła się na początku XX wieku i nabrała tempa po roku 2000. W Polsce funkcjonuje obecnie osiem dużych instalacji WtE, a planowane są dalsze inwestycje, takie jak rozbudowa istniejących zakładów i budowa nowych, które będą przetwarzać dodatkowe tony odpadów rocznie. Rozwój ten wpisuje się w krajowe i europejskie strategie, takie jak Europejski Zielony Ład.

Wstęp

Instalacje odzysku energii z odpadów (WtE) stają się kluczowym elementem w globalnej transformacji energetycznej oraz w dążeniach do ochrony klimatu. W obliczu rosnących wyzwań związanych z redukcją emisji CO₂ i realizacją założeń gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ), technologie WtE zyskują na znaczeniu jako nie tylko konieczne, ale i innowacyjne rozwiązania, które mogą odgrywać jeszcze większą rolę w przyszłości. Dzięki ich zdolności do efektywnego przekształcania odpadów w energię, WtE przyczyniają się do zmniejszenia ilości odpadów trafiających na składowiska oraz do wytwarzania energii z odnawialnych źródeł. Jednakże, aby w pełni wykorzystać potencjał tych technologii, niezbędne są dalsze innowacje oraz dostosowanie do zmieniających się regulacji prawnych, takich jak te wynikające z Europejskiego Zielonego Ładu i programu Fit for 55. W artykule omówione zostaną zarówno obecne wyzwania, jak i przyszłe kierunki rozwoju instalacji WtE, ze szczególnym uwzględnieniem ich roli w zmniejszaniu emisji CO₂ oraz w produkcji zielonej energii, w tym zielonego wodoru.

Ewolucja i stan obecny

Rozwój instalacji odzysku energii z odpadów (WtE) w Polsce ma długą historię, sięgającą początków XX wieku. Pierwsze tego typu projekty powstały w Warszawie i Poznaniu, gdzie już w latach 1912-1944 funkcjonowały pierwsze instalacje do termicznego przekształcania odpadów. Choć rozwój tej technologii został przerwany w wyniku II wojny światowej, ponownie nabrał tempa w latach 2000, kiedy to w 2001 roku uruchomiono nowoczesną spalarnię odpadów w Warszawie.

Od tego czasu nastąpił znaczący rozwój sektora WtE w Polsce. Obecnie w kraju działa osiem dużych instalacji, które łącznie przetwarzają ponad 1,1 mln ton odpadów rocznie. Te instalacje wykorzystują nowoczesne technologie, takie jak rusztowe piece do spalania odpadów, co pozwala na efektywne przekształcanie odpadów w energię elektryczną i ciepło. Przykłady funkcjonujących instalacji obejmują m.in. zakłady w Koninie, Bydgoszczy, Krakowie i Szczecinie.

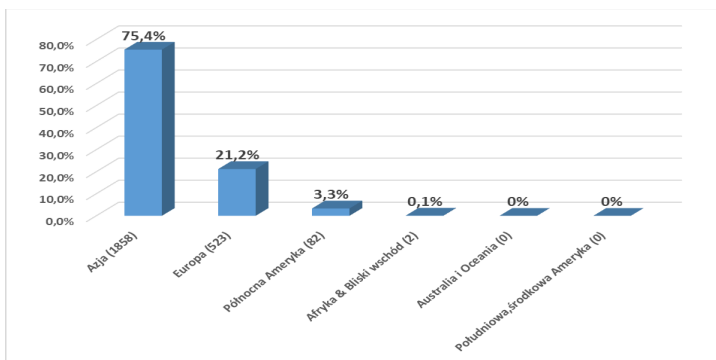
W najbliższych latach przewiduje się dalszy rozwój infrastruktury WtE w Polsce. Planowane są nowe projekty, w tym rozbudowa istniejących instalacji oraz budowa nowych zakładów w Gdańsku, Olsztynie i Warszawie. Projekt rozbudowy warszawskiej instalacji ZUSOK, który zakłada zwiększenie mocy przerobowych do 265 tys. ton rocznie, jest jednym z najważniejszych przedsięwzięć w tej dziedzinie. Dodatkowo, przewiduje się budowę nowych zakładów, które mają w przyszłości przetwarzać łącznie dodatkowe 535 tys. ton odpadów rocznie.

Rozwój tych instalacji wpisuje się w szersze europejskie i krajowe strategie, takie jak Europejski Zielony Ład i gospodarka o obiegu zamkniętym (GOZ), które kładą nacisk na efektywne zarządzanie odpadami i minimalizację emisji. W Polsce, podobnie jak w innych krajach UE, WtE jest postrzegane jako niezbędny element systemu zarządzania odpadami, który pozwala na zmniejszenie ilości odpadów trafiających na składowiska oraz produkcję energii z odpadów, które nie nadają się do recyklingu.

Instalacje WtE w Polsce stoją również przed wyzwaniami związanymi z koniecznością dalszej modernizacji i dostosowania do coraz bardziej rygorystycznych norm środowiskowych. Wzrost efektywności energetycznej, poprawa systemów wychwytu i składowania dwutlenku węgla (CCUS), a także integracja z sieciami ciepłowniczymi to tylko niektóre z obszarów, w których oczekuje się dalszych innowacji.

Instalacje WtE w Polsce przeszły długą drogę rozwoju od pierwszych projektów z początku XX wieku do nowoczesnych zakładów, które obecnie funkcjonują i mają przed sobą perspektywę dalszego rozwoju. W kontekście globalnych dążeń do dekarbonizacji i wdrażania GOZ, instalacje te odgrywają kluczową rolę w zarządzaniu odpadami i produkcji zrównoważonej energii.

Tabela 1. IOE NA ŚWIECIE – LICZBA INSTALACJI 2493 ITPOK NA ŚWIECIE



Źródło: Waste to Energy 2021/2022

WtE jako odnawialne źródło energii i element GOZ

Instalacje odzysku energii z odpadów (WtE) odgrywają kluczową rolę w zrównoważonym zarządzaniu zasobami i energią, stanowiąc integralny element gospodarki o obiegu zamkniętym (GOZ). WtE nie tylko

umożliwiają efektywne przekształcanie odpadów w energię, ale również wspierają realizację celów klimatycznych poprzez zmniejszenie ilości odpadów trafiających na składowiska i redukcję emisji gazów cieplarnianych.

Jednym z głównych atutów WtE jest możliwość uznania części energii odzyskanej z termicznego przekształcania odpadów za energię odnawialną. W szczególności dotyczy to frakcji biodegradowalnych odpadów, które w procesie spalania przyczyniają się do wytwarzania energii. Zgodnie z polskimi regulacjami prawnymi, część energii odzyskanej z odpadów zawierających frakcje biodegradowalne może być klasyfikowana jako energia odnawialna. Taka kwalifikacja ma duże znaczenie w kontekście realizacji krajowych i unijnych celów klimatycznych, które zakładają zwiększenie udziału odnawialnych źródeł energii w ogólnym bilansie energetycznym.

WtE wspiera także ideę GOZ poprzez efektywne zarządzanie odpadami, które nie nadają się do recyklingu, ale mogą być wykorzystane jako surowiec do produkcji energii. Tym samym, instalacje WtE przyczyniają się do minimalizacji odpadów, promując jednocześnie zrównoważone gospodarowanie zasobami. Proces przekształcania odpadów w energię jest zgodny z hierarchią postępowania z odpadami, gdzie odzysk energii jest preferowany nad składowaniem odpadów, które generuje większe zagrożenie dla środowiska.

W kontekście GOZ, WtE działa nie tylko jako narzędzie do zarządzania odpadami, ale również jako stabilne i niezawodne źródło energii, które może być zintegrowane z sieciami energetycznymi, dostarczając zarówno energię elektryczną, jak i ciepło. Co więcej, WtE wspierają dekarbonizację sektora energetycznego poprzez zmniejszenie zależności od paliw kopalnych i promowanie zrównoważonych źródeł energii.

Instalacje WtE odgrywają kluczową rolę w realizacji założeń gospodarki o obiegu zamkniętym i w dążeniu do osiągnięcia neutralności klimatycznej. Dzięki zdolności do przekształcania odpadów w odnawialną energię,

WtE nie tylko redukuje ilość odpadów, ale także przyczyniają się do budowy zrównoważonego systemu energetycznego, który jest zgodny z krajowymi i unijnymi celami klimatycznymi.¹

Tabela 2. Krajowe instalacje odzysku energii z odpadów stan na 2024



Źródło: Opracowanie własne

¹ Waste-to-energy nexus: A sustainable development, Surbhi Sharma a, Soumen Basu a, Nagaraj P. Shetti b, Mohammadreza Kamali c, Pavan Walvekar d, Tejraj M. Aminabhavi, Environmental Pollution, 2020 nr 257

Innowacje w sektorze WtE

Rozwój technologii w sektorze WtE (Waste-to-Energy) jest napędzany przez globalną potrzebę zwiększenia efektywności energetycznej oraz redukcji emisji CO₂, co stanowi kluczowy element w realizacji celów klimatycznych. Jednym z najważniejszych obszarów innowacji jest wychwyt i wykorzystanie dwutlenku węgla (CCUS), który pozwala na zmniejszenie śladu węglowego instalacji WtE. Technologie CCUS nie tylko umożliwiają redukcję emisji CO₂, ale także potencjalnie przekształcają dwutlenek węgla w produkty o wartości dodanej, co jest istotne dla zrównoważonego rozwoju.

Sztuczna inteligencja (AI) również odgrywa coraz większą rolę w sektorze WtE, szczególnie w optymalizacji procesów spalania. Wprowadzenie AI do systemów sterowania pozwala na bardziej precyzyjne zarządzanie procesami, co prowadzi do wyższej efektywności energetycznej oraz mniejszej emisji zanieczyszczeń. Na przykład w krakowskiej instalacji WtE wdrożono systemy oparte na sztucznej inteligencji, które monitorują i optymalizują procesy spalania w czasie rzeczywistym, co przyczyniło się do znaczącego wzrostu efektywności odzysku energii.

Jednym z najbardziej znaczących przykładów innowacji w sektorze WtE jest spalarnia w Spittelau, w Wiedniu, gdzie zastosowano nowoczesne technologie pomp ciepła. Dzięki nim możliwe było wykorzystanie ciepła skraplania spalin jako dolnego źródła ciepła do podgrzewania wody sieciowej. W efekcie, efektywność energetyczna systemu grzewczego spalarni wzrosła o 13%, co przekłada się na dodatkowe ogrzanie 16 tysięcy gospodarstw domowych. Przewiduje się, że ta technologia zostanie w pełni uruchomiona na początku 2025 roku.

Wzrost efektywności odzysku energii w instalacjach WtE, połączony z innowacjami technologicznymi, takimi jak CCUS i AI, stawia sektor WtE w roli lidera transformacji energetycznej. W miarę jak te technologie będą się rozwijać i dojrzywać, WtE będzie mogło odegrać jeszcze bardziej

znaczącą rolę w globalnych strategiach na rzecz dekarbonizacji i zrównoważonego zarządzania odpadami.²

WtE jako źródło zielonego wodoru

Instalacje odzysku energii z odpadów (WtE) mają potencjał, by odegrać kluczową rolę w produkcji zielonego wodoru, co jest zgodne z globalnymi trendami dekarbonizacji, szczególnie w sektorze transportu. Wodór, uważany za paliwo przyszłości, może być produkowany w sposób zrównoważony przy wykorzystaniu energii pochodzącej z odpadów, co dodatkowo wzmacnia jego ekologiczną wartość.

Jednym z przełomowych przykładów takiej integracji jest projekt realizowany w Wuppertalu, Niemcy. W tym innowacyjnym przedsięwzięciu zintegrowano produkcję zielonego wodoru bezpośrednio z procesami odzysku energii z odpadów. Energia uzyskana z termicznego przekształcania odpadów zasila elektrolizery, które produkują wodór poprzez proces elektrolizy wody. Tak wytworzony zielony wodór jest następnie wykorzystywany do zasilania floty pojazdów miejskich, w tym autobusów wodorowych.

Tego rodzaju projekty stanowią doskonały przykład, jak instalacje WtE mogą wspierać dekarbonizację sektora transportu, który jest jednym z głównych emitentów gazów cieplarnianych. Wodór produkowany z energii uzyskanej z odpadów nie tylko pozwala na zmniejszenie emisji CO₂, ale również przyczynia się do stworzenia zrównoważonego modelu zarządzania odpadami, w którym odpady są traktowane jako cenny surowiec energetyczny.

Produkcja zielonego wodoru w instalacjach WtE może stać się istotnym elementem miejskich strategii zrównoważonego rozwoju, zwłaszcza

² Waste to energy conversion for a sustainable future, [Ali Raza Kalair, Mehdi Seyed-mahmoudian, Alex Stojcevski, Naeem Abas, Nasrullah Khan, Heliyon, 2021 nr 74](#)

w dużych aglomeracjach, gdzie potrzeba redukcji emisji i zarządzania odpadami jest szczególnie paląca. Ponadto, rozwój takich technologii sprzyja dywersyfikacji źródeł energii oraz wzmacnia bezpieczeństwo energetyczne, poprzez wykorzystanie lokalnie dostępnych zasobów – odpadów, które w innym przypadku mogłyby trafić na składowiska.

W perspektywie długoterminowej, integracja WtE z produkcją zielonego wodoru może przyczynić się do tworzenia bardziej zrównoważonych miast, które będą mogły w większym stopniu polegać na odnawialnych źródłach energii oraz efektywnie zarządzać swoimi odpadami. Dzięki temu, wodór produkowany w takich instalacjach może odegrać kluczową rolę w globalnej transformacji energetycznej, wspierając zarówno cele klimatyczne, jak i rozwój gospodarki o obiegu zamkniętym.³

Podsumowanie

Instalacje odzysku energii z odpadów (WtE) znajdują się na kluczowym etapie rozwoju, gdzie stoją przed licznymi wyzwaniami, ale jednocześnie oferują ogromny potencjał w kontekście globalnej transformacji energetycznej. Dzięki innowacjom technologicznym, które zwiększają efektywność procesów oraz integrują WtE z gospodarką o obiegu zamkniętym (GOZ), te instalacje stają się nieodzownym narzędziem w walce z globalnym ociepleniem. WtE nie tylko przekształcają odpady w cenną energię, ale także pomagają zmniejszyć zależność od paliw kopalnych i zredukować emisje gazów cieplarnianych. Wykorzystanie WtE jako źródła zielonego wodoru dodatkowo podkreśla ich znaczenie w nowoczesnym systemie energetycznym, wspierając dekarbonizację sektora transportu i innych gałęzi przemysłu. Jednakże, aby w pełni wykorzystać potencjał WtE, konieczne są dalsze inwestycje i rozwój technologii, takich jak systemy wychwyty i składowania dwutlenku węgla (CCUS) oraz zastosowanie

³ Waste-to-energy nexus for circular economy and environmental protection: Recent trends in hydrogen energy, Surbhi Sharma, Soumen Basu, Nagaraj P. Shetti, Tejraj M. Aminabhavi, Science of The Total Environment, 2020 nr 713

sztucznej inteligencji w optymalizacji procesów. Integracja WtE z celami klimatycznymi i energetycznymi na poziomie krajowym i globalnym wymaga skoordynowanych działań zarówno ze strony rządów, jak i sektora prywatnego. W przyszłości WtE mogą stać się fundamentem zrównoważonego systemu energetycznego, łącząc cele ekologiczne z potrzebami społecznymi i ekonomicznymi. Aby to osiągnąć, konieczne jest dalsze wsparcie polityczne, rozwój innowacji oraz edukacja społeczeństwa na temat korzyści płynących z tej technologii. Tylko w ten sposób WtE mogą w pełni realizować swoje potencjalne korzyści i przyczynić się do stworzenia bardziej zrównoważonej przyszłości dla nas wszystkich.

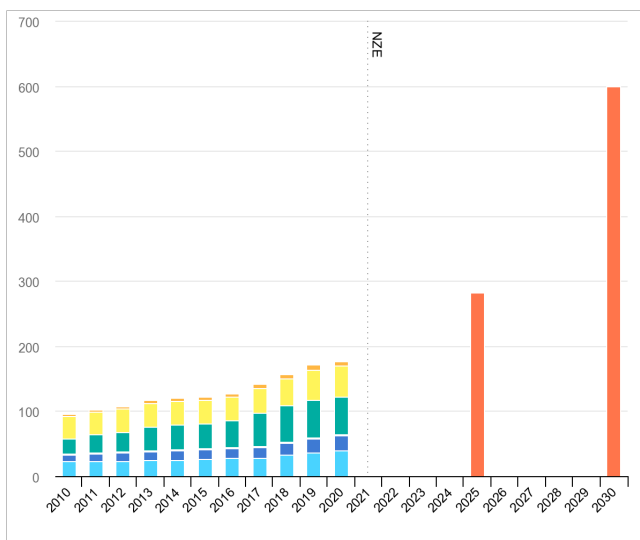
Innowacje w odnawialnych źródłach energii - w aspekcie sprężarkowych pomp ciepła

dr inż. Jakub Szymiczek

Streszczenie: Artykuł przedstawia wyniki symulacji obiegu pompy ciepła dla wybranych czynników chłodniczych dla szerokiego zakresu temperatur dolnego i górnego źródła. Pierwsza część artykułu przedstawia metodologię wyboru czterech analizowanych czynników chłodniczych: R1233zd(E), R1336mzz(Z), R1234ze(Z), R600 oraz R245fa, R134a porównawczo, jako klasyczne czynniki stosowane aktualnie komercyjnie. W kolejnym rozdziale przedstawione są założenia i sposób realizacji symulacji. Wyniki prezentują wykresy zależności COP od odpowiednich temperatur dolnego i górnego źródła użytych jako dane wejściowe dla modelu. Dodatkowo, w pracy przedstawiono również parametry termodynamiczne obiegu pompy ciepła, w szczególności temperatury, ciśnienia i przepływ objętościowy w charakterystycznych punktach obiegu. Artykuł zamyka uproszczona analiza ekonomiczna pozwalająca na porównanie potencjalnych zastosowań wysokotemperaturowej pompy ciepła z wytwarzaniem energii termicznej w kotle zasilanym gazem ziemnym.

1. WSTĘP

Zgodnie z danymi International Energy Agency (IEA), pompy ciepła dostarczają 7% energii termicznej wykorzystywanej do ogrzewnictwa na całym świecie. Ta stosunkowo niska wartość pozostawia potencjał dla dalszego rozwoju rynkowego technologii pomp ciepła. Biorąc pod uwagę dane historyczne i dalsze prognozy rozwoju [1], udział w rynku będzie nadal rósł.



Rysunek 1 Zainstalowane pompy ciepła na świecie, prognoza do roku 2030 [1]

Udział rynkowy pomp ciepła rośnie najszybciej w Chinach i Europie. Tworzone prognozy dotyczące wykorzystania energii wskazują na pompy ciepła jako efektywny sposób elektryfikacji ogrzewania. Siłą napędową wzrostu wykorzystania pomp ciepła jest długoterminowa strategia Unii Europejskiej [2], która ma na celu osiągnięcie neutralności klimatycznej w 2050 roku, natomiast w przypadku Chin jest nią plan osiągnięcia neutralności węglowej przed 2060 rokiem. Rozwój rynku pomp ciepła na całym świecie pojawia się we wszystkich prognozach, a w ciągu zaledwie 10 lat liczba zainstalowanych pomp ciepła potroi się.

Jeśli chodzi o rynek europejski, pompy ciepła stanowią 11% udziału w rynku grzewczym, czyli więcej niż globalny trend. Liczba zainstalowanych pomp ciepła potroiła się w ciągu ostatnich 10 lat. Ten wzrost udziału w rynku jest wyższy niż ówczesne prognozy.

Zgodnie z aktualnymi raportami [3,4], komercyjnie dostępne małe pompy ciepła, charakteryzują się temperaturą zasilania wynoszącą 65°C. Jest ona uważana za ekonomicznie osiągalne maksimum pod względem kosztów inwestycji i eksploatacji. Z drugiej strony autorzy potwierdzają wzrost wykorzystania systemów pomp ciepła w przemyśle, gdzie systemy kaskadowe są wykorzystywane do produkcji ciepła o temperaturze sięgającej 160°C i mocy do 50 MW. Innym wnioskiem jest wzrost sprzedaży będący dodatkowo wspierany przez dotacje i zwroty podatków w wielu krajach. Największym obszarem zastosowań pomp ciepła są małe urządzenia gospodarstwa domowego. Ich rozwój koncentruje się na zwiększeniu efektywności COP poprzez modyfikację sprężarki [5,6] lub zastosowanie nowych czynników chłodniczych [7-11].

W przypadku wielkoskalowych pomp ciepła, znalazły one swoje miejsce w przemysłowych systemach odzysku ciepła i systemach ciepłowniczych. W systemach tych źródłem ciepła są często niskotemperaturowe wody geotermalne, ciepło odpadowe z procesów przemysłowych, nieoczyszczone ścieki, a nawet duże zbiorniki wodne, takie jak jeziora lub woda morska.

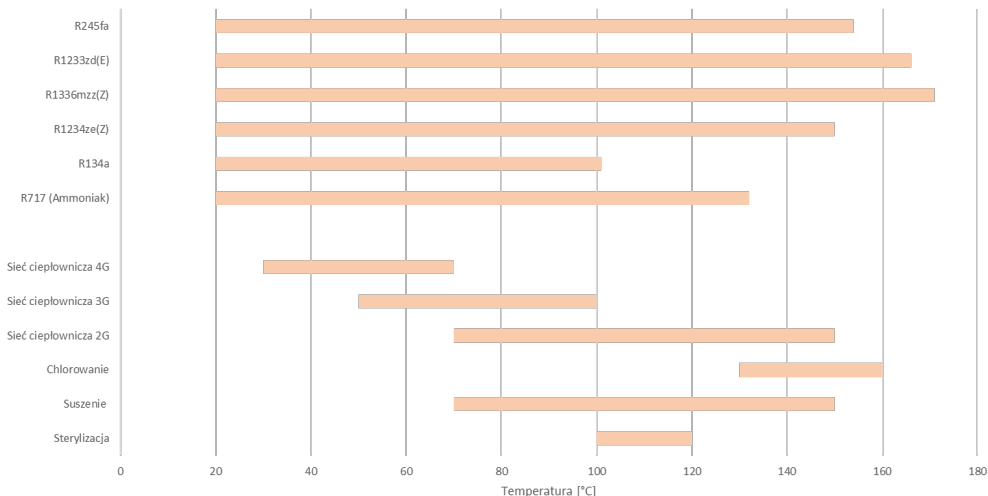
2. Luka badawcza

Tabela 1 Podsumowanie czynników chłodniczych opisanych w literaturze

Nazwa	R – numer	Publikacje	Ilość badań	GWP 100	Temp. krytyczna	Temp. maksymalna
woda H ₂ O	R718	[99–102]	4	0	374	1 727
n-butan	R600	[71,99,103,104,109,111]	6	5	152	302
n-pentan	R601	[71,99,107,109]	4	11	197	277
Opteon XL10. Solstice YF	R1234ze(Z)	[71,99,111,112]	4	10	150	167
Opteon MZ	R1336mzz(Z)	[71,72,99,100,105,107,110,113]	8	2	171	227
Genetron 245fa	R245fa	[71–73,99,100,105,106,112]	8	1030	154	167
Solstice zd	R1233zd(E)	[71–73,100,105–108,110,111]	10	1	166	277
-	R1224yd(Z)	[71,72,105,106]	4	1	156	200
-	R365mfc	[71,100]	2	890	187	227
propan	R290	[104,109]	2	4	97	377
tetrafluoroetan	R134a	[112,113]	2	1430	101	182
Solstice HFO	R1234ze(E)	[113]	1	6	109	147

Tabela 1 Analiza literatury dotyczącej czynników chłodniczych w wysokotemperaturowych pompach ciepła

Istniejące pompy ciepła i ich ciągły rozwój są nakierunkowane na główny cel – poprawę ich efektywności energetycznej. Głównym celem jest zwiększenie współczynnika COP, najczęściej poprzez modyfikacje obiegu termodynamicznego pompy ciepła. Wprowadzanie do obiegu dodatkowych wymienników (np. regeneratora lub ekonomizera) pozwala na rozszerzenie cyklu i zwiększenie jego efektywności. Inną metodą jest zmiana czynnika chłodniczego. Zastosowanie innowacyjnych czynników chłodniczych pozwala na zwiększenie efektywności, ale również na zwiększenie zakresu pracy pompy ciepła. Czynniki chłodnicze o wysokiej temperaturze krytycznej pozwalają na wytwarzanie wysokotemperaturowego ciepła i zwiększenie zakresu zastosowania dla pomp ciepła. Należy jednak zwrócić uwagę na efektywność czynnika w niższych temperaturach w przypadku pracy urządzenia w szerokim zakresie temperatur.



Rysunek 2 Zakresy temperaturowe stosowania czynników chłodniczych oraz wymaganego w procesach ciepła

Autorzy artykułu przeglądowego [5] porównują stosowane w pracach naukowych czynniki chłodnicze pozwalające na osiągnięcie temperatur przekraczających 150°C. Czynniki te to: R365mfc, R245fa, SES36, R1234ze(Z), R1233zd(E), R1336mzz(Z), R1224yd(Z), R600, R601 oraz Novec 649.

Dla wyboru najbardziej perspektywicznych czynników chłodniczych, przeprowadzono analizę literaturową badań. Tabela 1 przedstawia czynniki chłodnicze wraz z ich podstawowymi parametrami oraz częstotliwość ich pojawiania się w źródłach literaturowych. Czynniki o najlepszych parametrach są również najczęściej badane w istniejących publikacjach. Należy natomiast zauważyć, że pojawiające się publikacje najczęściej zawierają jedynie informacje o zależności COP czynnika dla zmiennej temperatury skraplania lub parowania, rzadko w literaturze pojawia się badanie nad dwoma tymi zmiennymi.

Zastosowanie czynników o wyższym zakresie temperatur pozwala na użycie pomp ciepła w produkcji ciepła dla procesów technologicznych a nawet sieci ciepłowniczych (Rysunek 2).

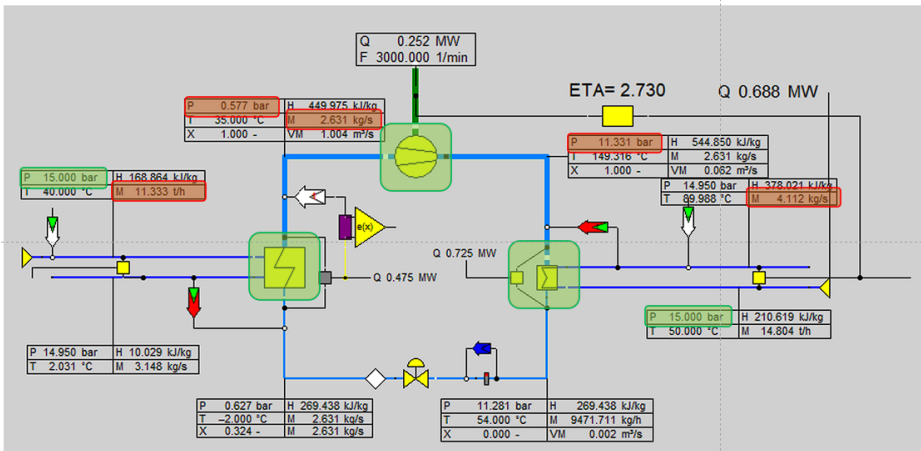
W badaniach brakuje również pełnej informacji dotyczącej zmienności parametrów termodynamicznych czynnika w danym zakresie. Informacja ta jest kluczowa dla oceny wykonalności pompy ciepła i zaplanowania jej kosztów oraz ewentualnych trudności w jej konstrukcji.

Zwiększenie efektywności energetycznej pompy ciepła ma prowadzić do uzyskania efektu ekonomicznego. Z tego względu porównano możliwe koszty paliwa z symulowanych pomp ciepła z produkcją ciepła z gazu ziemnego.

3. Symulacja pracy pompy ciepła

Dla przeprowadzenia obliczeń symulacyjnych pracy pompy ciepła został wykorzystany pakiet obliczeniowy Epsilon Professional. Oprogramowanie obliczeniowe pozwoliło na rozwiązanie modelu o założeniach utrudniających wykonanie prostych obliczeń:

- Rozważany jest stan ustalony, w modelu nie występują stany przejściowe.
- Model fizyczny, oparty na równaniach bilansowych entalpii.
- Parametry są sprzężone, zależności nieliniowe – parametry czynnika chłodniczego zmieniają się z temperaturą i ciśnieniem.
- Występowanie entalpii przemian fazowych w wymiennikach.
- Nieciągłość modelu – ograniczenie temperaturą krytyczną i maksymalną czynnika chłodniczego.



Rysunek 3 Schemat modelu obliczeniowego pompy ciepła w środowisku Epsilon

Użyte oprogramowanie pozwoliło na wykonanie obliczeń z uwzględnieniem powyższych założeń. W symulacji zostało wykorzystane sześć czynników chłodniczych: : R1336mzz(Z), R1234ze(Z), R1233ze, R245fa, R134a, R600. Zgodnie z tabelą 1, odznaczają się one perspektywicznymi parametrami i mogą pozwolić na osiągnięcie wysokich temperatur wytwarzanej przez urządzenie ciepła.

Obliczenia zostały wykonane dla następujących zakresów parametrów wejściowych:

- Temp. wejściowa dolnego źródła (DZT) = 20 – 40 °C
- Temp. schłodz. dolnego źródła (DZT_{out}) = 10 – 40 °C
- Temp. wejściowa górnego źródła (GZT) = 40 – 100 °C
- Temp. schłodz. górnego źródła (GZT_{out}) = 10 – 50 °C

Każdy z zakresów został podzielony na 5 poziomów które stanowiły punkty pomiarowe modelu. Łącznie uzyskano cztery parametry wejściowe / pięć poziomów zmienności / sześć czynników chłodniczych.

$$5^4 \cdot 6 = 3\,750$$

Ze względu na część doświadczeń fizycznie niemożliwych do realizacji, gdyż następuje w nich zamrażanie dolnego źródła ciepła, całkowita liczba punktów pomiarowych to 3 000.

Model symulacyjny uwzględnia następujące założenia modelu:

- Spadki ciśnień i straty ciepła w wymiennikach
- Graniczna różnica temperatur w wymiennikach
- Przegrzanie i przechłodzenie czynnika w wymiennikach
- Sprawność izentropowa sprężarki
- Ciśnienia dolnego i górnego źródła

Natomiast wynikami i obliczonymi parametrami wyjściowymi są:

- Przepływ masowy czynnika chłodniczego,
- Przepływ masowy dolnego źródła
- Przepływ masowy górnego źródła
- Ciśnienie czynnika chłodniczego po stronie parownika
- Ciśnienie czynnika chłodniczego po stronie skraplacza
- temperatury i ciśnienia czynnika w 4 punktach obiegu pompy ciepła
- przepływ objętościowy czynnika chłodniczego

4. Wyniki symulacji

Uzyskane w symulacji wyniki stanowiły 3 000 punktów pomiarowych. Po przeprowadzeniu symulacji, uzyskano wyniki dotyczące współczynnika COP i parametrów obiegu dla każdego z czynników.

Jedynie czynniki R1233zd oraz R1336mzz(Z) pozwoliły na uzyskanie wyników w całym badanym zakresie. Dla innych czynników najwyższe temperatury nie są dostępne ze względu na przekroczenie temperatury krytycznej w obiegu. Mimo iż wymagana temperatura górnego źródła nie przekracza wartości krytycznej, wymagane przegrzanie czynnika dla zapewnienia przepływu ciepła w wymienniku i odpowiedniej mocy obiegu nie pozwala na utworzenie obiegu w tym przypadku.

Ta zależność jest również źródłem różnic w efektywności COP dla czynników. Zobrazowane na wykresach (Rysunek 4 i 5) wyniki prezentują wartości COP dla różnych temperatur dolnego i górnego źródła dla wszystkich analizowanych czynników.

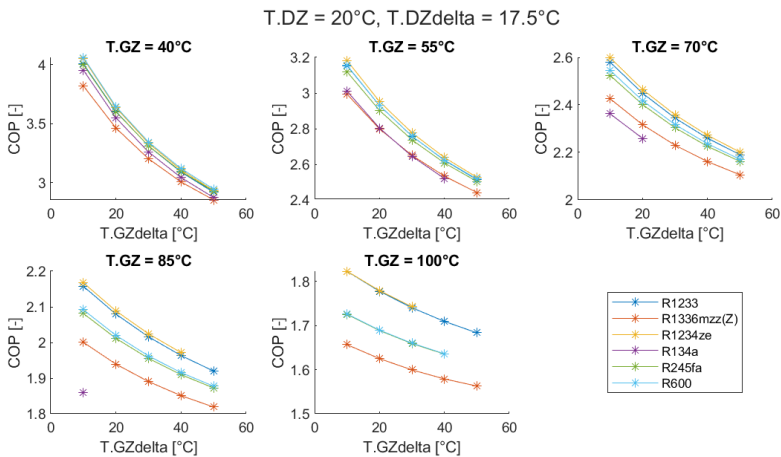
Na rysunkach przedstawiono jedynie wycinek wyników, przedstawienie wszystkich danych nie jest fizycznie możliwe, w związku z tym w artykule przedstawiono dwa reprezentatywne warianty wykorzystania wyników.

Rysunek 4 przedstawia wykresy dla najniższej temperatury dolnego źródła. W tym przypadku różnica temperatur między dolnym i górnym źródłem jest najwyższa. Taki przypadek oznacza największe obciążenie dla obiegu pompy ciepła. Pojedyncze wykresy pokazują zależność między COP i schłodzeniem dolnego źródła, a każdy z nich został przygotowany dla innej początkowej temperatury dolnego źródła.

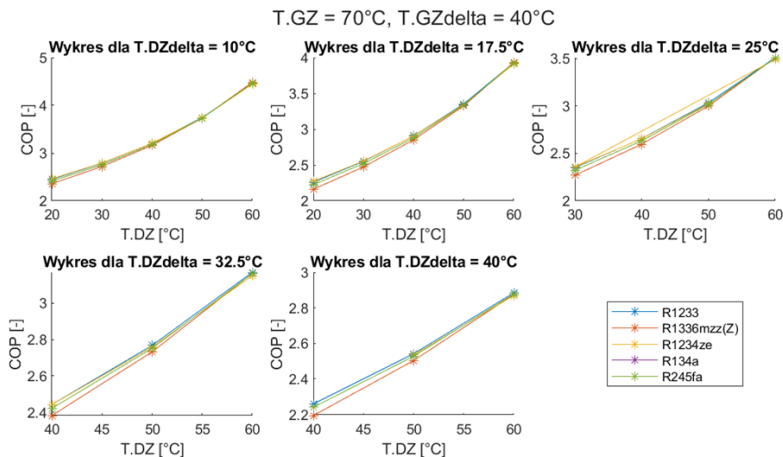
W przypadku najniższych temperatur górnego źródła różnice między wynikami dla pojedynczych czynników są nieznaczne. Wraz z wzrostem temperatury górnego źródła różnice pomiędzy czynnikami są uwypuklone. Najwyższe wartości COP osiągają czynniki R1234ze oraz R1233. Niższą wartość osiąga czynnik R600, a najniższe wartości są osiągnięte dla czynnika R1336. Jedynie te cztery czynniki pozwoliły na osiągnięcie najwyższych temperatur. Czynnik R134a nie pozwala na osiągnięcie najwyższych temperatur ze względu na jego niską temperaturę krytyczną.

Drugi z wykresów (Rysunek 5) przedstawia zależność dla stałej temperatury górnego źródła. Os pozioma prezentuje obniżenie temperatury w dolnym źródle, natomiast każdy z wykresów prezentuje początkową temperaturę dolnego źródła. W tym przypadku widać przede wszystkim mały wpływ temperatury dolnego źródła na różnice pomiędzy czynnikami chłodniczymi. Dla każdego z czynników wyniki nie wykazują znaczącej różnicy temperatury końcowej dolnego i górnego źródła.

Uzyskane wyniki pozwalają na porównanie uzyskanego współczynnika COP dla różnych czynników chłodniczych. Niestety ograniczenie jedynie do wyniku COP nie pozwala na uzyskanie pełnej informacji dotyczącej



Rysunek 5 Wykresy zależności COP od schłodzenia dolnego źródła dla określonych temperatur górnego źródła i analizowanych czynników chłodniczych



Rysunek 4 Wykresy zależności COP od podgrzewu górnego źródła dla określonych temperatur dolnego źródła i analizowanych czynników chłodniczych

pracy pompy ciepła w danym zakresie temperaturowych. Dla pełnej informacji, konieczne jest rozpoznanie parametrów termodynamicznych przy określonych warunkach pracy.

Cycle point / Refrigerant	Full cycle value			R3 (expansion valve - evaporator)			R4 (evaporator - compresor)			R1 (compresor - condenser)			R2 (condenser - expansion valve)		
	Parameter	COP	Mass flow	Compres. ratio	Pressure	Temp.	Volume flow	Pressure	Temp.	Volume flow	Pressure	Temp.	Volume flow	Pressure	Temp.
Unit	—	kg/s	—	Bar	°C	m³/s	bar	°C	m³/s	bar	°C	m³/s	Bar	°C	m³/s
R1336mzz(Z)	1,6	8,38	70,3	0,25	0,5	3,33	0,20	15	5,94	14,05	132,0	0,083	14,00	104	0,0074
R1234ze(E)	1,743	5,42	39,2	0,70	0,5	0,96	0,65	15	1,71	25,45	162,8	0,048	25,40	104	0,0055
R1233zd(Z)	1,741	5,92	45,0	0,49	0,5	1,33	0,44	15	2,41	19,80	153,9	0,060	19,75	104	0,0057
R245fa	1,659	6,79	49,8	0,54	0,5	1,45	0,49	15	2,40	24,41	146,2	0,049	24,36	104	0,0062
R134a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R600	1,66	3,59	27,3	1,05	0,5	0,91	1,00	15	1,42	27,25	143,78	0,051	27,19	104	0,0077

Cycle point / Refrigerant	Full cycle value			R3 (expansion valve - evaporator)			R4 (evaporator - compresor)			R1 (compresor - condenser)			R2 (condenser - expansion valve)		
	Parameter	COP	Mass flow	Compres. ratio	Pressure	Temp.	Volume flow	Pressure	Temp.	Volume flow	Pressure	Temp.	Volume flow	Pressure	Temp.
Unit	—	kg/s	—	Bar	°C	m³/s	bar	°C	m³/s	bar	°C	m³/s	Bar	°C	m³/s
R1336mzz(Z)	2,6	4,23	23,2	0,45	13	0,59	0,4	35	1,62	9,26	121	0,07	9,21	74	0,0034
R1234ze(E)	2,65	3,25	15,7	1,15	13	0,21	1,1	35	0,64	17,31	145,9	0,04	17,26	74	0,003
R1233zd(Z)	2,66	3,53	17,3	0,83	13	0,29	0,78	35	0,87	13,42	139,2	0,06	13,37	74	0,0031
R245fa	2,63	3,66	18,6	0,93	13	0,28	0,88	35	0,77	16,38	132,3	0,04	16,33	74	0,0031
R134a	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
R600	2,64	1,92	12,0	1,65	13	0,19	1,6	35	0,51	19,14	130,46	0,43	19,09	74	0,0037

Rysunek 6 Tabela parametrów termodynamicznych pompy ciepła pracującej przy temperaturach: $T.D\Delta = 25^{\circ}C$, oraz $T.DZ = 40^{\circ}C$, $T.G\Delta = 40^{\circ}C$, $T.GZ = 70^{\circ}C$

Na podstawie analizy uzyskanych danych można wysunąć wnioski, iż najwyższe wartości zostały osiągnięte dla czynników R1233zd oraz R1234ze(Z). Wyniki takie są zbliżone z informacjami publikowanymi w literaturze. Wysokie wartości COP zostały również uzyskane dla naturalnego czynnika R600. Parametry termodynamiczne uzyskane w obiegu pompy ciepła dla konkretnych punktów pomiarowych zostały przedstawione na rysunkach 6 i 7.

Ze względu na konieczność ograniczenia prezentowanych danych w publikacji przedstawiono dwa przypadki parametrów pompy ciepła dla pojedynczych zestawów danych wejściowych temperatury. Wybrano parametry schłodzenia dolnego źródła ciepła = 15°C (T.DZdelta = 25°C) oraz podgrzania górnego źródła 120°C (T.GZdelta = 20°C), dla dolnego źródła parametry są niezmiennie dla całej analizy. W Rysunku 6 wybrane parametry zostały podkreślone niebieską linią.

Parametry przedstawiono dla wszystkich analizowanych czynników chłodniczych. Parametry zostały przedstawione dla dwóch punktów pomiarowych. Pierwszy został opisany temperaturami: T.DZdelta = 25°C, oraz T.DZ = 40°C, T.GZdelta = 40°C, T.GZ = 70°C. Natomiast drugi z punktów obliczeniowych: T.DZdelta = 17.5°C, oraz T.DZ = 20°C, T.GZdelta = 30°C, T.GZ = 100°C. punkty te zostały wybrane jako pomiary znajdujące na przedstawionych powyżej wykresach oraz są reprezentatywnymi punktami pracy pomp ciepła. Pierwszy opisuje pracę pompy ciepła dla sieci ciepłowniczej wykorzystującą niskotemperaturowe źródło ciepła, natomiast drugi pozwala na uzyskanie maksymalnej różnicy temperatur pomiędzy dolnym i górnym źródłem. Rysunek 6 przedstawia parametry dla pierwszego z analizowanych przypadków. Wyniki przedstawione w tabeli zostały podzielone na dane opisujące cały obieg pompy ciepła oraz odpowiednie temperatury, ciśnienia oraz przepływy objętościowe w czterech częściach obiegu pompy ciepła.

Dla każdego z czynników w całym obiegu został opisany współczynnik COP oraz spręż uzyskany w obiegu. Spręż jest kluczowym parametrem opisującym wymagania dla sprężarki. Zbyt wysoka wartość oznacza trudności z konstrukcją sprężarki, a w skrajnych przypadkach konieczność podzielenia obiegu na kilka stopni co wpływa negatywnie na koszty urządzenia i jego efektywność.

Kluczowe dla pracy obiegu są przepływ objętościowy, ciśnienie i temperatura w sprężarce. Najwyższa wartość przepływu objętościowego jest osiągnięta dla czynnika R1336mzz, jest ona przeszło dwukrotnie wyższa niż w innych wariantach. Zwiększony przepływ wymaga większej średnicy rur oraz większej średnicy sprężarki. Zwiększa to koszty urządzenia

w przypadku urządzeń dużej mocy może prowadzić do problemów przy konstrukcji wirnika sprężarki. Jednocześnie należy zauważyć, że najniższe wartości sprężu i przepływu są osiągnięte dla czynnika R600, temperatura jest również w niskim zakresie. Prowadzi to do wniosku, iż w badanym zakresie temperatur, czynnik ten ma dobre własności termodynamiczne.

Najniższa temperatura jest osiągnięta dla czynnika R1336mzz, pozwala to wnioskować o potencjalnie możliwym osiągnięciu najwyższych temperatur górnego źródła dla tego czynnika.

W drugim badanym zakresie parametrów (Rysunek 2), ze względu na skrajnie wysoką różnicę temperatur dolnego i górnego źródła, uzyskany spręż i pozostałe parametry są skrajnie wysokie. W przypadku R1336, spręż przekraczający 70 jest skrajnie trudny do uzyskania w sprężarce i wymagałby wykorzystania wielostopniowego układu.

Układ pozostałych zależności jest analogiczny jak w przypadku poprzednich wyników, gdzie czynnik R600, osiąga najlepsze parametry przy najniższym sprężu i niskim przepływie objętościowym. Uzyskane w urządzeniu temperatury są najwyższe dla czynnika R1234ze(E), przy jednocześnie najwyższej wartości COP dla tego czynnika.

5. Efekt ekonomiczny

Uzyskane w tabelach parametry stanowią cenne wyniki dla potencjalnego wyboru czynnika dla projektowanego urządzenia, wyniki te mogą również posłużyć dla oceny opłacalności wykorzystania pompy ciepła nad wykorzystaniem spalania gazu ziemnego dla wytwarzania ciepła.

Przedstawione w tabelach parametry opisujące wykorzystanie pompy ciepła dla wytwarzania ciepła dla sieci ciepłowniczej (Rysunek 6) oraz opisujący skrajnie wysoką różnicę temperatur między dolnym i górnym źródłem (Rysunek 7) zostały wprowadzone jako potencjalne parametry pracy urządzenia z odpowiednimi wartościami COP. Dla oceny dodatkowych możliwych zastosowań wprowadzony w tabeli warianty:

- wykorzystanie ciepła ścieków dla zasilania sieci ciepłowniczej

-
- wykorzystanie niskotemperaturowej geotermii dla zasilania sieci ciepłowniczej
 - zasilanie sieci ciepłowniczej z niskotemperaturowego magazynu ciepła
 - zasilanie procesu technologicznego wymagające pary z magazynu energii termicznej

Uzyskane dla każdego z wariantów COP stanowiło podstawę dla obliczenia kosztu GJ ciepła wytwarzanego przy zasilaniu pompy ciepła energią elektryczną zakupioną dla gospodarstw domowych lub w cenach dla przemysłu. Wyniki zostały zestawione z ceną wytwarzania ciepła z gazu ziemnego, co pozwala na porównania wytwarzania w pompie ciepła z kosztami spalania gazu.

Pierwszym wnioskiem płynącym z przeprowadzonej analizy jest przewaga kosztów wytwarzania z pompy ciepła, nawet dla wartości COP zbliżającej się do granicy 2,0. Nawet w przypadku skrajnie niskiej efektywności wytwarzania ciepła z pompy ciepła pozwala na uzyskanie lepszego efektu ekonomicznego zasilania urządzenia niż w przypadku spalania gazu. Należy jednak zauważyć, że przedstawiona analiza jest uproszczona i nie uwzględnia kosztów utrzymania urządzenia oraz kosztów zakupu. Również w przypadku dolnego źródła o wyższej temperaturze, koszty jego otrzymania nie zostały uwzględnione co może wpływać na zmianę kosztów wytwarzania w przypadku rzeczywistej inwestycji.

6. Dyskusja oraz wnioski

Wykonana symulacja pracy pompy ciepła dla różnych czynników chłodzonych w szerokim zakresie zmienności temperatur dolnego i górnego źródła ciepła pozwoliła na ocenę czynników pod względem uzyskanego przez nie COP. W wyniku najwyższa wartość COP została uzyskana dla czynnika R1234ze oraz R1233. Oba te czynniki odznaczają się najwyższym COP w badanym zakresie.

Wariant	COP / spraw.	Temperatury dolnego źródła	Temperatury górnego źródła	Czynnik chłodniczy	koszt GJ ciepła dla gospodarstw domowych	koszt GJ ciepła dla firm	Granica opłacalności
	-	°C	°C	-	zł/GJ	zł/GJ	-
Ciepło ścieków	2,77	20/2,5	55/85	R1234ze(Z)	74,14	73,87	2,92
Geotermia	3,54	50/17	55/85	R600	58,01	57,80	3,73
Magazyn	2,8	40/30	85/115	R1233zd	73,34	73,08	2,95
Proces techn.	2,1	40/30	100/150	R1336mzz	97,79	97,44	2,21
Gaz ziemny	0,95	-	-	-	104,39	90,50	

Tabela 1 Analiza ekonomiczna wariantów reprezentacyjnych wybranych wyników symulacji

Wykonana w dalszej części analiza parametrów termodynamicznych wskazała na inne wyniki. W przypadku czynnika R600 udało się uzyskać najniższe wartości sprężu i przepływu objętościowego. Czynnik 1336mzz odznacza się najgorszymi parametrami, a jego zastosowanie w układzie o dużej różnicy temperatur między dolnym i górnym źródłem ciepła może wymagać dodatkowych modyfikacji sprężarki i układu pompy ciepła.

Uproszczona analiza ekonomiczna wskazuje, iż pompa ciepłą pozwala na uzyskanie niższych kosztów wytwarzania ciepła w każdym analizowanym przypadku. Należy jednak zauważyć, że analiza ta nie brała pod uwagę kosztów inwestycyjnych i kosztów pozyskania ciepła w dolnym źródle. Koszty te są zależne od konkretnych przypadków i mogą prowadzić do zgoła odmiennych wniosków.

LITERATURA

1. IEA (2021), *Heat Pumps, IEA, Paris* [https://www.Iea.Org/Reports/Heat-Pumps](https://www.iea.org/reports/heat-pumps); Paris, 2021;
2. EUROPEAN COMMISSION *A Clean Planet for All - A European Strategic Long-Term Vision for a Prosperous, Modern, Competitive and Climate Neutral Economy*; Brussels, 2018;
3. European Heat Pump Association *The European Heat Pump Market and Statistics Report 2021*; Europe, 2021;
4. Nowak, T. European Heat Pump Market. *The REHVA European HVAC Journal* **2021**, 58, 40–44.
5. Arpagaus, C.; Bless, F.; Uhlmann, M.; Schiffmann, J.; Bertsch, S.S. High Temperature Heat Pumps: Market Overview, State of the Art, Research Status, Refrigerants, and Application Potentials. *Energy* **2018**, 152, 985–1010, doi: 10.1016/J.ENERGY.2018.03.166.

Innovations in renewables – in terms of compressor heat pumps

Key words: high-temperature heat pumps, refrigerant, Renewable energy sources, Epsilon, COP efficiency

Summary: The article presents the results of heat pump cycle simulations for selected refrigerants and a wide range of heat sink and source temperatures. The first part of the article presents the selection of four refrigerants: R1233zd(E), R1336mzz(Z), R1234ze(Z), R600 and R245fa, R134a currently applied alternatives. In the next section, the assumptions and method of implementation of the simulation are presented. The results present graphs of the COP dependence on the respective lower and upper source temperatures used as input data for the model. In addition, the thermodynamic parameters of the heat pump circuit are also presented, in particular

temperatures, pressures and volume flow. The article concludes with a simplified economic analysis to compare the potential applications of a high-temperature heat pump with thermal power generation in a natural gas-fired boiler.

dr inż. Jakub Szymiczek, asystent Akademii Górniczo-Hutniczej, Wydziału Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Systemów Energetycznych i Urządzeń Ochrony Środowiska. W pracy naukowej zajmuje się zagadnieniami transferu ciepła oraz maszyn i urządzeń energetycznych – ze szczególnym uwzględnieniem pomp ciepła, które stanowią tematykę pracy doktorskiej. Wśród rozwijanych zagadnień znajduje się również efektywność energetyczna budynków oraz produkcja energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii. **szymiczek@agh.edu.pl**

TRANSFORMACJA ENERGETYCZNA A WYKORZYSTANIE PRZESTRZENI – PRODUKCJA ROLNICZA, ELEKTROWNIA FOTOWOLTAICZNA, CZY AGROFOTO- WOLTAICZNA?

Szymon Pelczar
AGH w Krakowie

Streszczenie. Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wpływu trzech odmiennych działalności gospodarczych na wykorzystanie przestrzeni. Działalnościami tymi są: a) prowadzenie działalności rolniczej; b) wytwarzanie energii elektrycznej przy użyciu elektrowni fotowoltaicznej; c) jednoczesna działalność rolnicza z połączeniem wytwarzania energii elektrycznej przy użyciu elektrowni agrofotowoltaicznej. Oddziaływanie na przestrzeń zbadano z perspektywy ekonomicznej: jako przewidywany wynik ekonomiczny prowadzonej aktywności gospodarczej, aby odpowiedzieć na pytanie, jaka z możliwych form zagospodarowania jest najbardziej odpowiednia pod względem finansowym. Zwrócono uwagę zarówno na wynik inwestora, jak i właściciela nieruchomości gruntowej. Ponadto wskazano możliwy wpływ na krajobraz. Dodatkowo opisana została efektywność wykorzystania przestrzeni - szczególnie w kontekście systemu agrofotowoltaicznego (APV). Wskazane zostały możliwe wady rozwiązania polegającego na realizacji APV, sugerując rozwiązania alternatywne.

1. WSTĘP

Zasoby paliw kopalnych dostępnych dla zaspokojenia przyszłych potrzeb energetycznych ludzkości są ograniczone [Abas, N., Kalair, A., Khan, N., 2015], a ich spalanie wywiera niekorzystny wpływ na środowisko, w tym na człowieka i jego zdrowie – w szczególności poprzez emisję szkodliwych związków do atmosfery [Armaroli, N., Vincenzo, B., 2011]. Ograniczenie

negatywnego oddziaływania energetyki opartej o paliwa kopalne na poszczególne komponenty środowiska może być realizowane poprzez wprowadzenie do systemu elektroenergetycznego instalacji wykorzystujących odnawialne źródła energii (OZE). Jedną z rodzajów tych instalacji są wielkoskalowe elektrownie fotowoltaiczne. Jednak te instalacje również oddziałują na środowisko. Namacalnym elementem środowiska, na który istotnie wpływają systemy fotowoltaiczne, jest przestrzeń. Może ona być rozpatrywana w kategoriach zasobu [Wańkiewicz, W., Lipińska, H., Kępkowicz, A., 2016]. Elektrownie fotowoltaiczne wymagają jednak do realizacji znaczącej ilości przestrzeni. W związku z tym, że są one najczęściej realizowane na obszarach wiejskich, przyczyniają się do wypierania rolniczego wykorzystania gruntów. Zmieniają przy tym krajobraz i mogą wpływać na zachowanie ładu przestrzennego. Odpowiedzią na ten problem mogą być systemy agrofotowoltaiczne, które pozwalają na jednoczesną produkcję energii elektrycznej z instalacji OZE oraz prowadzenie działalności rolniczej na tym samym terenie.

Celem niniejszego artykułu jest przedstawienie wpływu na przestrzeń trzech różnych działalności: prowadzenia działalności rolniczej, realizacji elektrowni fotowoltaicznej (EPV) oraz agrofotowoltaicznej (APV). Wpływ na przestrzeń została zbadana w ujęciu ekonomicznym poprzez ocenę efektywności ekonomicznej poszczególnych typów działalności. Oddziaływanie na przestrzeń przeanalizowano także w kontekście krajobrazowym.

2. METODY

Analiza za cel stawiała zdefiniowanie wpływu prowadzenia określonych działalności gospodarczych na wykorzystanie przestrzeni. Przeanalizowane działalności to: a) prowadzenie działalności rolniczej; b) wytwarzanie energii elektrycznej przy zastosowaniu tradycyjnej elektrowni fotowoltaicznej (EPV); c) jednoczesna uprawa polowa roślin w połączeniu z wytwarzaniem energii elektrycznej przy zastosowaniu elektrowni agrofotowoltaicznej (APV).

Wpływ wymienionych aktywności na wykorzystanie przestrzeni zbadano na płaszczyźnie ekonomicznej (przez porównanie wskaźników ekonomicznych), badając oddziaływanie na przestrzeń (szczególnie w kontekście krajobrazowym) oraz określając efektywność wykorzystania przestrzeni.

Wynik ekonomiczny zbadano dla wszystkich trzech rodzajów aktywności. Dla działalności z zakresu wytwarzania energii elektrycznej (EPV i APV) zastosowano metodę FCFF obliczając wskaźnik NPV. Dla tych aktywności gospodarczych obliczono również IRR, okres zwrotu oraz jednostkowy koszt wytwarzania energii (LCOE).

Przepływy pieniężne (FCFF) dla EPV i APV zostały zdyskontowane stosując stopę dyskontową określoną przez wartość WACC (średni ważony koszt kapitału). Równanie na współczynnik dyskontowy (d_t) przyjmie więc postać:

$$d_t = \frac{1}{(1 + WACC)^t} \quad (1)$$

gdzie:

- t — rok analizy;
- d_t — współczynnik dyskontujący dla roku t ;
- $WACC$ — średni ważony koszt kapitału.

Wartość NPV dla działalności polegającej na produkcji energii elektrycznej (zarówno EPV, jak i APV) będzie z kolei określona zgodnie z następującym równaniem [Gnap, M., Pietra, R., 2023]:

$$NPV = -CAPEX_0 + \sum_{t=0}^n \frac{FCFF_t}{(1 + WACC)^t} \quad (2)$$

gdzie:

- $CAPEX_0$ — nakłady inwestycyjne;
- $FCFF_t$ — wartość FCFF w roku t .

Do obliczenia wartości FCFF wzięto pod uwagę przychody ze sprzedaży energii elektrycznej, stawkę podatku dochodowego od osób prawnych (19%) oraz amortyzację.

Natomiast do obliczenia efektywności ekonomicznej działalności rolniczej za pomocą wskaźnika NPV posłużono się przedstawionym niżej równaniem [Mikołajczyk, J., 2012]:

$$NPV = \sum_{t=0}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} \quad (3)$$

gdzie:

- CF_t — przepływy pieniężne dla roku t ;
- r — stopa dyskontowa.

Jak więc wynika z równania (3) współczynnik dyskontowy (d_t) w roku t przyjmuje dla prowadzenia działalności rolniczej wartość zgodną z równaniem:

$$d_t = \frac{1}{(1+r)^t} \quad (4)$$

Za stopę dyskontową r dla działalności rolniczej przyjęto poziom średniego rocznego oprocentowania lokat terminowych [Minut-Kaszyńska, M., 2018] wynoszący 5,97%.

Przepływy pieniężne zostały oparte o przychody z działalności rolniczej oraz pojawiające się rokrocznie koszty (m.in. na zasiewy, koszty paliwa), a także przysługujące osobie prowadzącej działalność rolniczą dopłaty.

Wewnętrzna stopa zwrotu (IRR) obliczona dla działalności z zakresu EPV i APV to wartość stopy dyskontowej, przy której wartość NPV wynosi 0 [Dyka, E., Mróz-Radłowska, I., 2014], co można przedstawić jako:

$$NPV = 0 \rightarrow WACC = IRR \quad (5)$$

Okres zwrotu (PP), czyli czas, który jest potrzebny do odzyskania zainwestowanego kapitału [Michalski, M., 2009] ustalić można z równania:

$$CAPEX \leq \sum_{t=1}^{PP} CF_t \quad (6)$$

gdzie:

- $CAPEX$ — nakłady inwestycyjne;
- CF_t — przepływ pieniężny w roku t .

Okres zwrotu ustalono jedynie dla inwestycji z zakresu elektrowni fotowoltaicznych (EPV i APV).

Jednostkowy koszt wytwarzania energii (LCOE) to stosunek kosztów eksploatacji elektrowni w całym cyklu życia do wytworzonej energii elektrycznej, czyli [Darling, S. i in., 2011]:

$$LCOE = \frac{\text{Koszty eksploatacji w cyklu życia}}{\text{Ilość wytworzonej energii w cyklu życia}} \quad (7)$$

3. WYNIKI ANALIZY

3.1. Teren objęty analizą

Teren poddany analizie objęty jest granicami nieruchomości gruntowej, która tworzy działkę ewidencyjną nr 766/2, położoną w obrębie Młódów, Gminie Lubaczów, powiecie lubaczowskim (województwo podkarpackie). Powierzchnia przedmiotowej nieruchomości wynosi 77,27 ha, a w jej granicach występują grunty orne tworzące użytki rolne o klasach bonitacyjnych: RIIIb (7,05% powierzchni nieruchomości), RIVa (58,01%), RIVb (29,29%), RV (5,17%) oraz pastwiska — PsIII, PsIV, PsVI — obejmujące łącznie 0,48% powierzchni nieruchomości. Są to grunty pochodzenia mineralnego.

Nieruchomość poddana analizie posiada bezpośredni dostęp do drogi wojewódzkiej od południa. Sąsiadują z nią głównie tereny uprawne, choć częściowo od wschodu graniczy z zabudową mieszkaniową. Na mapie (Mapa 1) przedstawiono teren objęty analizą.



Mapa 1 Teren poddany analizie wraz z oznaczeniem klas bonitacyjnych występujących na działce ewidencyjnej. Źródło: Opracowanie własne.

3.2. Prowadzenie produkcji rolniczej

Analizowany obszar wykorzystywany jest obecnie do prowadzenia działalności rolniczej. Połowa produkcji roślin uprawnych skupia się na uprawie następujących roślin: rzepak ozimy (*Brassica napus L.*), pszenica zwyczajna ozima (*Triticum aestivum L. subsp. aestivum*), soja (*Glycine max (L.) Merrill*), trawa nasienna i facelia (*Phacelia tanacetifolia Benth.*).

Zmianowanie odbywa się na czterech polach w sposób przedstawiony w tabeli (Tab. 1). Rozkład poszczególnych pól zaprezentowano na mapie (Mapa 2).

Tab. 1 Sposób prowadzenia zmianowania na gruntach ornych. Źródło: Opracowanie własne

Rok	Pole	Powierzchnia pola [ha]	Roślina uprawna
Rok 1	A	12,92	Rzepak ozimy
	B	6,39	Pszenica ozima
	C	6,33	Soja
	D	32,73	Trawa nasienna
Rok 2	A	12,92	Trawa nasienna
	B	6,39	Facelia
	C	6,33	Facelia
	D	32,73	Soja



Mapa 2 Pola wyznaczone do zmianowania. Źródło: Opracowanie własne

Zgodnie z informacjami uzyskanymi od właściciela nieruchomości prowadzącego działalność rolniczą, średnie plony z hektara dla rzepaku, pszenicy, soi, facelii i nasion trawy wynoszą odpowiednio: 4,5 Mg/ha, 5,5 Mg/ha, 3 Mg/ha, 0,3 Mg/ha i 1,5 Mg/ha.

Obecny sposób korzystania z nieruchomości wpływa na kształtowanie bezpieczeństwa żywnościowego. Jest również pierwszym, fundamentalnym ogniwem w ogrodnictwie, ponieważ pozwala na przyszłą produkcję traw.

Dzięki produkcji rolniczej możliwy jest zbiór znaczącej ilości plodów rolnych, co związane jest z dużym arealem przeznaczonym pod uprawę. W roku 1 zmianowania możliwe jest uzyskanie średnio 72 Mg nasion rzepaku, 60,5 Mg pszenicy, 33 Mg soi oraz niemal 59 Mg trawy nasiennej. Natomiast w roku 2 średnio wyprodukować można 117,75 Mg soi, 19,8 Mg facelii oraz 24 Mg trawy nasiennej.

Koszty w prowadzeniu polowej uprawy roślin związane są z zakupem nasion na zasiew, zużyciem surowców (głównie oleju napędowego), energii elektrycznej (w celu suszenia nasion), stosowaniem środków ochrony roślin oraz nawozów, a także opłatą ubezpieczenia zdrowotnego. Po stronie kosztów w prowadzeniu przedmiotowego gospodarstwa stoi także obowiązek podatkowy związany z koniecznością uiszczenia odpowiedniej kwoty podatku rolnego.

Gospodarstwo rolne czerpie przychody ze sprzedaży wyprodukowanych plonów. Nie bez znaczenia jest także dopłata obszarowa oraz zwrot akcyzy za paliwo rolnicze.

Kolejna tabela (

Tab. 2) przedstawia przychody i koszty w opisywanym gospodarstwie rolnym. Przychody obliczono na podstawie średnich plonów oraz zgodnie z aktualną wartością dopłaty obszarowej i zwrotu akcyzy za paliwo rolnicze. W kosztach uwzględniono zakup materiału siewnego, zużycie paliwa i energii elektrycznej, a także obecną wartość podatku rolnego (przyjęto stawkę podatku rolnego na rok 2024, zgodnie z obowiązującymi przepisami w tym zakresie [Ustawa o podatku rolnym; rozporządzenie w sprawie zaliczenia gmin oraz miast do jednego z czterech okręgów podatkowych; komunikat prezesa GUS w sprawie cen skupu żyta (...)]). Przychody i koszty znacząco różnią się w zależności od określonego roku, co wynika z prowadzonego zmianowania.

Tab. 2 Przychody, koszty i dochody w gospodarstwie rolnym. Źródło: Opracowanie własne

	Rok 1	Rok 2
Koszty [PLN]		
Koszt materiału siewnego	24 326,29 zł	33 572,41 zł

Koszt nawozów	238 465,80 zł	238 465,80 zł
Koszt oleju napędowego	44 000,00 zł	44 000,00 zł
Koszt zużycia energii elektrycznej	4 000,00 zł	4 000,00 zł
Koszt ubezpieczenia zdrowotnego	8 000,00 zł	8 000,00 zł
Koszt środków ochrony roślin	1 200,00 zł	1 200,00 zł
Podatek rolny	13 869,01 zł	13 869,01 zł
Suma kosztów:	333 861,10 zł	343 107,22 zł
Przychody [PLN]		
Przychody ze sprzedaży plonów	521 275,00 zł	386 175,00 zł
Dopłata obszarowa	40 016,27 zł	40 016,27 zł
Zwrot akcyzy za paliwo rolnicze	11 680,00 zł	11 680,00 zł
Całkowite przychody	572 971,27 zł	437 871,27 zł
Przepływy pieniężne	239 110,17 zł	94 764,05 zł

Obliczony wskaźnik NPV — rozumiany w analizie ekonomicznej dla działalności rolniczej jako suma zdyskontowanych przepływów pieniężnych w okresie 26 lat — wynosi 2 204 360,31 zł.

Pod względem ekonomicznym więc, traktując wykorzystywaną przestrzeń jako rodzaj zasobu, działalność rolnicza będzie charakteryzowała się stosunkowo niską wartością wskaźnika NPV. Jednakże produkcja polowa roślin uprawnych wpływać będzie na pewne wskaźniki niematerialne, które stosunkowo trudno przeliczyć na widoczne korzyści. To przede wszystkim możliwość zaspokojenia potrzeb żywnościowych społeczeństwa. Wkład w rynek ogrodniczy (poprzez produkcję nasion traw) również nie pozostaje bez znaczenia. Ponadto uprawa facelii, będącej rośliną miododajną, jest korzystna dla zapylaczy. Pszczoły są w stanie wyprodukować 300-400 kg

miodu z jednego hektara uprawianej facelii. Ta roślina dobrze sprawdza się również jako pasza dla zwierząt (ze względu na tempo wzrostu, dużą ilość biomasy i wartości odżywcze) [Burbliś, J., 2019; Tworowski, J., Szczukowski, S., Kwiatkowski, J., 1999].

Działalność rolnicza w znaczący sposób determinuje postrzeganą przez ludzi przestrzeń. Dominacja krajobrazów pól uprawnych w Polsce wynika z faktu, że większa część powierzchni kraju wykorzystywana jest rolniczo. Rozpatrując mapę krajobrazową Polski należy stwierdzić, że teren rozpatrywanej nieruchomości wpisuje się charakterem w krajobrazy pól uprawnych. W jego najbliższym sąsiedztwie, poza wskazanym typem krajobrazu, występują także krajobrazy upraw trwałych oraz lasów iglastych. Pola uprawne są charakterystyczną cechą rozpatrywanego krajobrazu, przez co prowadzenie działalności rolniczej odpowiednio kształtuje przestrzeń poprzez wytworzenie znacznych przedpól widokowych i charakterystycznej *linii nieba*.

Prowadzenie rozpatrywanej działalności cechuje się stosowaniem nawozów oraz środków ochrony roślin, które mogą negatywnie wpływać na poszczególne elementy środowiska, w szczególności na glebę, wody gruntowe i powierzchniowe, organizmy lądowe, w tym zapylacze [Pelczar, S., 2023]. Dlatego w przypadku środków ochrony roślin istotne jest, aby stosować je zgodnie z zaleceniami zawartymi na etykiecie oraz stosując zasady zawarte w rozporządzeniu w sprawie warunków stosowania środków ochrony roślin.

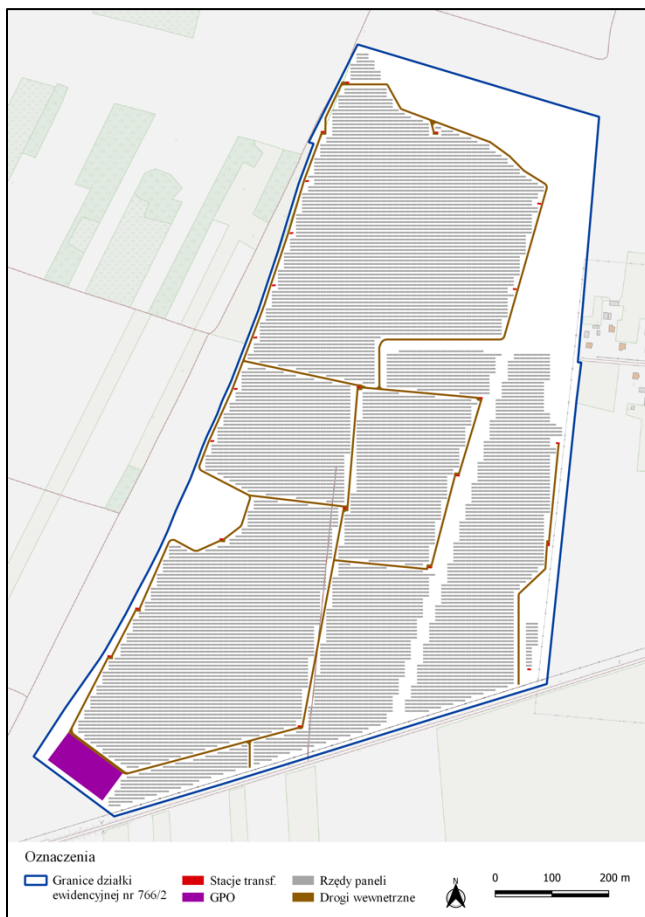
3.3. Realizacja elektrowni fotowoltaicznej

Elektrownia fotowoltaiczna potencjalnie realizowana na rozpatrywanym terenie cechowałaby się mocą zainstalowaną na poziomie 63,24 MW. Powierzchnia zabudowy wynosiłaby 55,04 ha.

Na potrzeby analizy przyjęto, że wykorzystane zostaną panele fotowoltaiczne Longi Solar LR5-66HH-500M Black Frame charakteryzujące się mocą 500 W (126 480 szt.). Zastosowanie znajdzie konstrukcja wsporcza FWD 1 HDM o rozkładzie modułów 3x5 (15 modułów na jedną konstrukcję). W skład urządzeń infrastruktury technicznej wejdą również m.in. transformatory olejowe EG 2500kVA 21/0,42kV AL/AL. (23 szt.), inwertery Sungrow SG250HX-V11 (253 szt.), Główny Punkt Odbioru (GPO),

kable AC niskiego i średniego napięcia, kable solarne oraz kable wysokiego napięcia (służące wyprowadzaniu energii do oddalonego o ok. 5 km GPZ). Zastosowanie znajdzie także ogrodzenie modułowe. Wybudowane zostaną odpowiednie drogi wewnętrzne. Odstęp pomiędzy rzędami paneli wyniesie 3,1m. Kąt nachylenia paneli fotowoltaicznych wyniesie 25°.

Założono, że przedsięwzięcie realizowane będzie na podstawie decyzji o warunkach zabudowy. Jego obszar nie obejmie więc gleb ornych średnio dobrych (klasa bonitacyjna RIIIb), które wymagałyby wyłączenia z produkcji rolniczej zgodnie z ustawą o ochronie gruntów rolnych i leśnych. Zachowany został także odstęp od linii średniego napięcia przebiegającej przez działkę ewidencyjną oraz istniejącego gazociągu. Przyjęto odstęp pomiędzy linią SN a obiektami budowlanymi składającymi się na elektrownię wynoszący 5 m, natomiast od gazociągu bufor wynoszący 6 m. Obiekty budowlane będą również usytuowane w odpowiedniej odległości od drogi wojewódzkiej (20 m zgodnie z ustawą o drogach publicznych). Mapa 3 przedstawia zaprojektowaną na potrzeby analizy elektrownię fotowoltaiczną.



Mapa 3 Elektrownia fotowoltaiczna na nieruchomości. Źródło: Opracowanie własne.

Roczna produkcja energii elektrycznej została oszacowana przy wykorzystaniu ogólnodostępnej bazy PVGIS. Baza ta udostępnia narzędzia oraz dane klimatyczne służące do oceny produkcji energii elektrycznej z instalacji fotowoltaicznych [Súri, M. i in., 2008]. Choć dane wyjściowe uzyskane dzięki obliczeniom z bazy PVGIS mogą różnić się w zależności od wybranej, wewnętrznej bazy danych nasłonecznienia, a także cechują się pewnym odchyleniem od rzeczywistych uzysków instalacji [González-

Peña, D. i in., 2021], to że stosunkowo dobrą dokładnością zastosowana baza PVGIS aproksymuje wyniki w regionie Europy [Psomopoulos, C. i in., 2015], w tym i na terenie Polski.

Do oszacowania rocznej produkcji energii elektrycznej z rozpatrywanej instalacji OZE przyjęto założenia widoczne w kolejnej tabeli, w której zamieszczono również najistotniejsze informacje o elektrowni (Tab. 3).

Tab. 3 Przyjęte dane wejściowe do szacowania produkcji energii elektrycznej z rozpatrywanej elektrowni fotowoltaicznej

Baza danych o nasłonecznieniu	PVGIS-ERA5
Moc zainstalowana [MW]	63,24 MW
Straty systemu [%]	14%
Kąt nachylenia paneli [°]	25°
Współczynnik degradacji paneli [%]	0,55%

Obliczenia bazy PVGIS wykazały, że roczna produkcja energii elektrycznej wyniesie 68,873 GWh. Przy współczynniku degradacji paneli wynoszącym 0,55% oraz 25-letnim okresie eksploatacji, rozpatrywana instalacja wyprodukuje w całym cyklu użytkowania 1,6128 TWh energii elektrycznej.

Nakłady inwestycyjne (CAPEX) oraz koszty utrzymania instalacji (OPEX) przedstawia kolejna tabela (Tab. 4).

Tab. 4 CAPEX i OPEX dla rozpatrywanej elektrowni fotowoltaicznej. Źródło: Opracowanie własne

CAPEX	
Moduły fotowoltaiczne	79 185 333,60 zł
Konstrukcja wsporcza	48 309 794,88 zł
Transformator	6 350 759,08 zł
GPO	12 000 000,00 zł
Inwertery	11 358 435,00 zł
Koszty developmentu projektu	200 000,00 zł
Kable DC	1 821 312,00 zł

Kable AC SN	1 284 154,16 zł
Przylącze WN	1 279 200,00 zł
Kable AC nn	2 038 320,00 zł
Zaliczka na warunki przyłączenia	1 897 200,00 zł
Ogrodzenie	375 878,00 zł
Roboty budowlane	25 296 000,00 zł
Drogi wewnętrzne	1 813 100,00 zł
CAPEX PLN	193 209 486,72 zł
CAPEX PLN/MW	3 055 178,47 zł
OPEX	
O&M	885 360,00 zł
Zakładane koszty napraw	63 240,00 zł
Podatek od nieruchomości	583 424,00 zł
Podatek od budowli	973 713,46 zł
Podatek od budynków	219 192,48 zł
Czynsz dzierżawny	1 100 800,00 zł
OPEX [PLN]	3 825 729,94 zł
OPEX [PLN/MW]	60 495,41 zł

Przyjmując, że stopa dyskontowa dana jest wskaźnikiem WACC i wynosi 6%, to dyskontując przepływy pieniężne przez okres 25 lat, poszczególne wskaźniki ekonomiczne przyjmą wartości widoczne w kolejnej tabeli (Tab. 5). Jako cenę sprzedaży energii elektrycznej przyjęto wartość 389,00 zł/MWh.

Tab. 5 Efektywność ekonomiczna przedsięwzięcia (EPV) oraz LCOE

NPV	107 995 458,90 zł
-----	-------------------

IRR	13,00%
Okres zwrotu	8,36 lat
LCOE	182,36 zł

Natomiast po stronie właściciela nieruchomości (wyzierzawiającego swoją działkę ewidencyjną) wartość NPV wyniesie 10 676 463,79 zł (przy stopie dyskontowej równej 5,97%). Należy jednak dodać, że właściciel nieruchomości w rozpatrywanym scenariuszu będzie płatnikiem podatku VAT, ponieważ dzierżawa gruntów na cele nierolnicze traktowana jest jako usługa na gruncie ustawy o podatku od towarów i usług. Zaistnieje również obowiązek podatkowy z tytułu podatku dochodowego (z którego zwolniona jest działalność rolnicza). Dodatkowo założono, że dzierżawca będzie zwracał wartość podatku od nieruchomości na rzecz wydzierżawiającego. Przepływy pieniężne po stronie właściciela nieruchomości przedstawiono w kolejnej tabeli (Tab. 6).

Tab. 6 Przepływy pieniężne właściciela nieruchomości. Źródło: Opracowanie własne.

Czynsz dzierżawny (po opodatkowaniu podatkiem VAT)	1 100 800,00 zł
Podatek dochodowy 12%	14400
Podatek dochodowy 32%	313 856,00 zł
CF	772 544,00 zł

Rozpatrując obliczony wynik finansowy inwestycji oraz traktując przestrzeń w kategorii zasobu można stwierdzić, że nieruchomość poddana analizie posiada znaczną wartość ze względu na potencjał zagospodarowania pod elektrownię fotowoltaiczną.

Pod względem finansowym dzierżawa gruntu przez właściciela nieruchomości również jest korzystniejsza w porównaniu do prowadzenia działalności rolniczej, ponieważ przepływy pieniężne charakteryzują się znacznie wyższym poziomem.

Zagospodarowanie tak rozległego arealu pod elektrownię fotowoltaiczną będzie jednak wiązało się z uprzemysłowieniem przestrzeni wiejskiej. Lokalna przestrzeń nie będzie posiadała już typowego charakteru krajobrazu

rolniczego. Grunty staną się obszarem przemysłowym. Wykształci się szczególnie rodzaj krajobrazu stanowiący połączenie krajobrazu pól uprawnych oraz infrastruktury przemysłowej.

Ograniczona zostanie ponadto rolnicza przestrzeń produkcyjna — będąca podstawą zapewnienia bezpieczeństwa żywnościowego państwa — na rzecz zabudowy przemysłowej.

Widoczna będzie więc transformacja przestrzeni — z typowej przestrzeni rolniczej w kierunku terenu produkcyjnego. Jednak oddziaływanie takiej instalacji na krajobraz może być obserwowane jedynie w jej najbliższych okolicach, co związane jest ze stosunkowo płaskim nachyleniem terenu. Wpływ ten może być dodatkowo minimalizowany przez odpowiednie rozwiązania architektoniczne.

Zabudowa elektrowni fotowoltaicznej może powodować zmiany w składzie gatunkowym fauny, dla której habitat tworzył dotychczas grunt orny. Niezbędne są jednak badania nad bioróżnorodnością na terenach elektrowni fotowoltaicznych w warunkach polskich, ponieważ istnieje znacząca luka badawcza w tym zakresie.

Realizacja przedmiotowego przedsięwzięcia pozwoli na produkcję energii elektrycznej pochodzącej z instalacji OZE, wnosząc znaczący wkład do polskiego miks energetycznego.

3.4. Realizacja elektrowni agrofotowoltaicznej

Elektrownia agrofotowoltaiczna stanowi typ instalacji fotowoltaicznej, która pozwala na jednoczesne prowadzenie działalności rolniczej oraz wytwarzanie energii elektrycznej. Koncepcja instalacji agrofotowoltaicznych została zaproponowana już w 1982 r., jednak na większą skalę znalazła zastosowanie dopiero po 30 latach – jako projekty pilotażowe i jednostki wytwórcze [Weselek, A. i in., 2019].

Klasyfikacja elektrowni agrofotowoltaicznych bierze pod uwagę [Willcox, B. i in., 2020]:

- typ działalności rolniczej (produkcja roślin lub hodowla zwierząt);
- rodzaj produkcji roślinnej (sadownictwo bądź uprawa polowa roślin);

-
- typ stosowanego systemu (zamknięty — stosowany m.in. na szklarniach, bądź otwarty — instalacja na otwartej przestrzeni);
 - typ konstrukcji wsporczej (panele usytuowane na specjalnych, podwyższonych konstrukcjach bądź jako klasyczne systemy z zastosowaniem większego odstępu pomiędzy rzędami paneli);
 - możliwość zmiany położenia paneli w czasie (zastosowanie systemu stacjonarnego lub nadążnego).

Na cele przeprowadzonej analizy wybrano instalację agrofotowoltaiczną służącą uprawie roślin (tych samych gatunków, co w przypadku opisanej działalności rolniczej). Zakładana instalacja będzie systemem klasycznym o zwiększonym odstępie pomiędzy rzędami paneli fotowoltaicznych z wykorzystaniem systemu stacjonarnego.

Do odpowiedniego zaprojektowania instalacji wzięto pod uwagę maszyny rolnicze stosowane w gospodarstwie rolnym. Instalacja powinna być bowiem odpowiednio dopasowana do użytkowania rolniczego. Musi ona pozwalać na swobodny zasiew oraz zbieranie plonów. Elektrownię agrofotowoltaiczną dostosowano w szczególności do: kombajnu zbożowego NH TC 5070 (szerokość pojazdu to 4,9 m), agregatu siewnego KUHN Sitera 3000, ciągników rolniczych, brony chwastownik AS 600 M1 (firmy APV), a także kultywatora AUH500, mulczera MAMUT 280, kosiarki dyskowej, pługu obrotowego (pług 5 skibowy Unia). Określono odpowiedni odstęp pomiędzy rzędami paneli fotowoltaicznych wynoszący 20 m.

Analizowana elektrownia agrofotowoltaiczna cechuje się znacznie niższą mocą zainstalowaną, wynoszącą 17,61 MW. Pod względem rozwiązań technicznych zastosowano identyczne urządzenia, jak dla elektrowni fotowoltaicznej. Ich ilość jest jednak znacząco mniejsza. Elektrownia składać się będzie z 35 220 paneli fotowoltaicznych, 6 transformatorów, 71 inwerterów, GPO i pozostałej infrastruktury przesyłowej energii elektrycznej (kable AC, DC i linii WN do wyprowadzania energii do sieci elektroenergetycznej). Za punkt przyłączenia, podobnie jak dla EPV, założono pobliski GPZ (oddalony o ok. 5 km od obszaru przedsięwzięcia).

Realizacja elektrowni fotowoltaicznej spowoduje, że zmniejszy się powierzchnia poszczególnych pól uprawnych przewidzianych do prowadzenia upraw. To istotnie wpłynie na zdolności produkcyjne. W wyniku tego zmniejszona zostanie ilość pozyskiwanych plodów rolnych. Możliwy będzie zbiór ok. 58,14 Mg nasion rzepaku, 35,145 Mg pszenicy, między

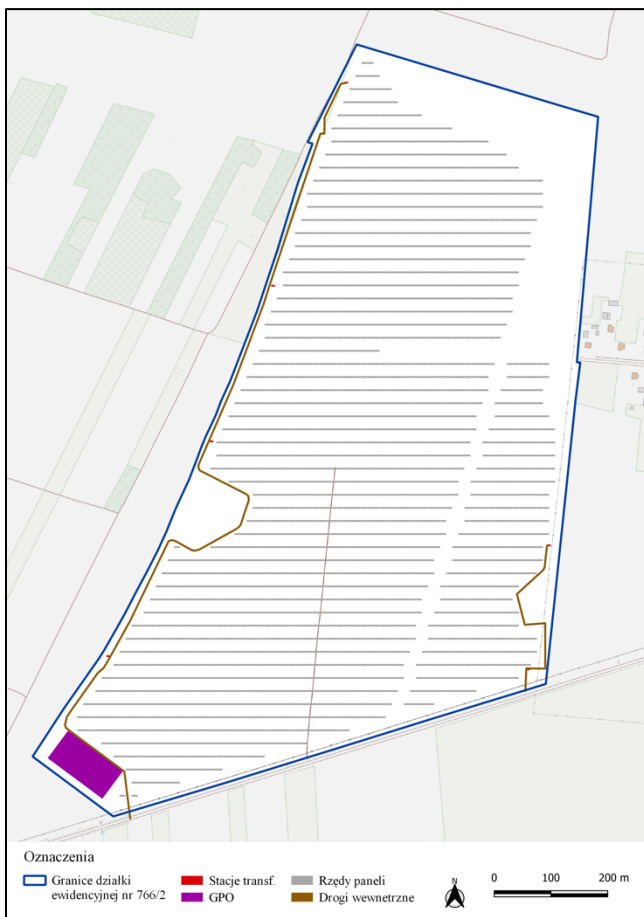
18,99 – 98,19 Mg soi (w zależności od roku wynikającego z założonego zmianowania), między 19,38 a 49,095 Mg nasion trawy, 3,816 Mg facelii. Przewiduje się, że największe zmniejszenie plonów będzie widoczne w przypadku pszenicy w roku 1 zmianowania (kiedy to obsiewane jest pole C). Istotnie ograniczone zostaną także zbiory facelii (uprawianej w 2 roku zmianowania na polach B i C). Przewidywane zmiany w ilości plonów przedstawiono w kolejnej tabeli (

Tab. 7).

Tab. 7 Szacowane zmniejszenie plonów przy wykorzystaniu nieruchomości do budowy instalacji agrofotowoltaicznej. Źródło: Opracowanie własne.

Roślina uprawna	Przewidywane zmniejszenie ilości plonów	
	Rok 1	Rok 2
Rzepak ozimy	-19,25%	
Pszenica ozima	-41,91%	
Soja	-42,45%	-16,61%
Trawa nasienna	-19,25%	-16,61%
Facelia		-42,18%

Zgodnie z opisaną wcześniej metodą wyznaczono średnią roczną produkcję energii elektrycznej z elektrowni agrofotowoltaicznej. Wyniesie ona 19,1755 GWh. Przez okres użytkowania elektrownia wyprodukuje 449,1289 GWh energii elektrycznej. Mapa 4 przedstawia schemat elektrowni agrofotowoltaicznej.



Mapa 4 Elektrownia agrofotowoltaiczna. Źródło: Opracowanie własne

W ramach analizy efektywności ekonomicznej rozważono dwa scenariusze ze względu na możliwe interpretacje ustawy o podatkach i opłatach lokalnych oraz ustawy o podatku rolnym. W pierwszym z nich przyjęto, że cała powierzchnia przeznaczona pod budowę elektrowni agrofotowoltaicznej stanowi podstawę opodatkowania podatkiem od nieruchomości. Natomiast w drugim scenariuszu założono, że jedynie przestrzeń pod konstrukcją wsporczą, stacjami transformatorowymi i drogami wewnętrznymi jest

podstawą opodatkowania tym podatkiem. Pozostała część działki ewidencyjnej jest natomiast podstawą opodatkowania podatkiem od nieruchomości.

Problematyka ustalenia odpowiedniego podatku wynika z faktu, że z jednej strony cały obszar inwestycji służy prowadzeniu działalności gospodarczej (na gruncie ustawy o podatkach i opłatach lokalnych bez znaczenia jest wykorzystywanie tego samego obszaru na cele odmiennie niż działalność gospodarcza inna niż działalność rolnicza). System agrofotowoltaiczny składa się ponadto z urządzeń połączonych ze sobą przez odpowiednią instalację przesyłową energii. Jest zaprojektowany w ten sposób, aby co prawda umożliwić prowadzenie działalności rolniczej w zakresie produkcji roślinnej, jednak wynika to z typu zrealizowanej instalacji. Natomiast pogląd przeciwny można wyrazić w ten sposób, że choć faktycznie część nieruchomości jest użytkowana na cele gospodarcze (wytwarzanie energii elektrycznej), to jednak stosunkowo duży areał służy do produkcji rolnej jako grunty orne.

W pierwszym scenariuszu inwestor prowadzący działalność wytwórczą z zakresu wytwarzania energii zobowiązany jest uiścić podatek od nieruchomości w odpowiedniej wysokości (przyjęto stawkę podatku za rok 2024 zgodnie z uchwałą nr LXV/611/2023 Rady Gminy Lubaczów). W takiej sytuacji właściciel nieruchomości nie uiszcza podatku rolnego ze względu na fakt opodatkowania gruntu podatkiem od nieruchomości.

Natomiast w drugim scenariuszu część, opisana wcześniej, stanowi podstawę opodatkowania podatkiem od nieruchomości. W takim wypadku właściciel nieruchomości gruntowej zobowiązany jest do uiszczenia podatku rolnego (dla którego podstawą opodatkowania jest pozostały obszar wchodzący w skład instalacji agrofotowoltaicznej).

Kolejna tabela (

Tab. 8) prezentuje CAPEX oraz OPEX dla inwestycji w elektrownię fotowoltaiczną dla pierwszego scenariusza. W drugim

scenariuszu OPEX będzie różnił się jedynie o wartość podatku od nieruchomości.

Tab. 8 CAPEX i OPEX dla elektrowni agrofotowoltaicznej. Źródło: Opracowanie własne

CAPEX	
Koszty [brutto]	Całkowity
Moduł	22 050 185,40 zł
Konstrukcja wsporcza (na 15 paneli)	13 452 490,32 zł
Transformator	1 656 719,76 zł
GPO	1 000 000,00 zł
Inwertery	3 187 545,00 zł
Koszty developmentu projektu	200 000,00 zł
Kable DC	507 168,00 zł
Kable AC	233 579,04 zł
Przyłącze WN	1 279 200,00 zł
Kable AC nn	57 216,00 zł
Zaliczka na warunki przyłączenia	528 300,00 zł
Ogrodzenie	375 878,00 zł
Roboty budowlane	7 044 000,00 zł
Drogi wewnętrzne	693 400,00 zł
CAPEX PLN	52 265 681,52 zł
CAPEX PLN/MW	2 967 954,66 zł
OPEX	
O&M	246 540,00 zł
Zakładane koszty napraw	35 220,00 zł

Podatek od nieruchomości**	583 424,00 zł
Podatek od budowli	276 567,37 zł
Podatek od budynków	57 139,92 zł
Czynsz dzierżawny [PLN]	352 200,00 zł
OPEX PLN	1 551 091,29 zł
OPEX PLN/MW	24 527,06 zł

** — w scenariuszu II wartość podatku od nieruchomości wynosi 95 172,10 zł rocznie

Na przychody właściciela nieruchomości w obu scenariuszach składają się zyski z działalności rolniczej, a także czynsz dzierżawny. W wariantcie EPV przyjęto jednak, że czynsz dzierżawny przeliczany jest w stosunku do mocy zainstalowanej elektrowni agrofotowoltaicznej i wynosi on 20 000 zł netto za każdy MW mocy zainstalowanej. Dodatkowo rolnik może otrzymać dopłaty bezpośrednie i zwrot akcyzy za paliwo rolnicze.

W kolejnej tabeli (

Tab. 9) zamieszczono przedstawiono koszty i przychody dla właściciela nieruchomości dla dwóch scenariuszy. Różnią się one w poszczególnych latach z uwagi na przyjęte rozwiązania w zakresie zmianowania roślin uprawnych.

Tab. 9 Przewidywane przychody i koszty dla właściciela nieruchomości podczas dzierżawy pod elektrownię agrofotowoltaiczną

Scenariusz 1	Rok 1	Rok 2
Koszty na działalność rolniczą	314 294 zł	329 238 zł
Podatek rolny	0 zł	0 zł
Zwrot akcyzy za paliwo rolnicze	11 680 zł	11 680 zł
Czynsz dzierżawny	352 200 zł	352 200 zł

Dopłata obszarowa	30 236 zł	30 236 zł
Przychód z działalności rolniczej	404 712 zł	386 175 zł
CF	395 830 zł	362 349 zł
Scenariusz 2	Rok 1	Rok 2
Koszty na działalność rolniczą	314 294 zł	329 238 zł
Podatek rolny	11 013 zł	11 013 zł
Zwrot akcyzy za paliwo rolnicze	11 680 zł	11 680 zł
Czynsz dzierżawny	352 200 zł	352 200 zł
Dopłata obszarowa	30 236 zł	30 236 zł
Przychód z działalności rolniczej	404 712 zł	386 175 zł
CF	384 817 zł	351 336 zł
Podatek dochodowy od dzierżawy na cele nierolnicze (dla obu scenariuszy)		
Podatek dochodowy 12%	14 400 zł	14 400 zł
Podatek dochodowy 32%	74 304 zł	74 304 zł

Wskaźnik NPV dla prowadzenia działalności rolniczej podczas jednoczesnej dzierżawy gruntu wyniesie dla scenariusza I 5 245 678,84 zł, natomiast dla scenariusza II przyjmie wartość 5 093 477,76 zł. Wartość stopy dyskontowej przyjęto, jak dla przypadku dzierżawy pod tradycyjną elektrownię fotowoltaiczną (5,97%). Widać na tym przykładzie, że właściciel nieruchomości skorzystałby na opodatkowaniu podatkiem od nieruchomości przedmiotowej nieruchomości, ponieważ wówczas osiągnąłby lepszy wynik ekonomiczny.

Wynik analizy wskaźników ekonomicznych dla inwestora, który prowadzi działalność wytwórczą energii elektrycznej z elektrowni agrofotowoltaicznej przedstawia następująca tabela (Tab. 10).

Tab. 10 Efektywność ekonomiczna elektrowni fotowoltaicznej dla badanych scenariuszy.
Źródło: Opracowanie własne.

Wskaźnik	Scenariusz 1	Scenariusz 2
NPV	25 010 997,95 zł	29 974 464,03 zł
IRR	11,999%	13,021%
Okres zwrotu	9 lat	8,44 lat
LCOE	192,20 zł	181,15 zł

Analizując wpływ na krajobraz analizowanej wersji instalacji fotowoltaicznej można stwierdzić, że na lokalnych odbiorców krajobrazu (znajdujących się w pobliżu APV) będzie ona oddziaływała podobnie jak tradycyjna EPV. Związane jest to z faktem, że przyjęto podobne rozwiązania techniczne, a jedyną różnicą jest większy odstęp pomiędzy rzędami paneli fotowoltaicznych usytuowanych na konstrukcji wsporczej. Analizowany obszar również charakteryzowałby się przemysłowym charakterem, co byłoby skutkiem wprowadzenia urządzeń infrastruktury technicznej do krajobrazu. Należałoby więc wprowadzić odpowiednie rozwiązania projektowe i architektoniczne, aby ograniczyć oddziaływanie instalacji na użytkowników przestrzeni. W szczególności dotyczy to wprowadzenia barier krajobrazowych na wschodniej części terenu przedsięwzięcia, która sąsiaduje z zabudową mieszkaniową.

Przedstawiona koncepcja budowy elektrowni agrofotowoltaicznej pozwalałaby na zachowanie rolniczej przestrzeni produkcyjnej. Jednoczesne zagospodarowanie przestrzeni poprzez realizację APV wpływałoby pozytywnie nie tylko na bezpieczeństwo żywnościowe, ale również na bezpieczeństwo energetyczne.

Aby wyznaczyć efektywność wykorzystania przestrzeni dla prowadzenia dwóch działalności w obrębie jednej lokalizacji, posłużono się wskaźnikiem LER (ang. *Land Equivalent Ratio*). Wskaźnik ten pozwala na porównanie produktywności dwóch dowolnych rodzajów prowadzonej działalności w odniesieniu do tej samej jednostki powierzchni [Dupraz, C. i in., 2011]. Dla elektrowni agrofotowoltaicznej jest on dany równaniem:

$$LER = \frac{P_{R+APV}}{P_R} + \frac{P_{APV+R}}{P_{EPV}} \quad (8)$$

gdzie:

- P_{R+APV} — wynik produkcji rolniczej przy zastosowaniu APV;
- P_R — wynik produkcji rolniczej (bez APV);
- P_{APV+R} — wynik produkcji energii elektrycznej w połączeniu z produkcją rolniczą (ilość energii wyprodukowanej z APV);
- P_{EPV} — wynik produkcji energii elektrycznej z tradycyjnej elektrowni fotowoltaicznej (EPV).

Dla przeprowadzanej analizy wskaźnik LER przyjmie wartość:

$$LER = 1,04 \quad (8)$$

Wskaźnik ten oznacza, że na obszarze o powierzchni 100 ha istnieje możliwość wyprodukowania takiej samej ilości energii elektrycznej i płodów rolnych, co na 104 ha przy prowadzeniu obu działalności osobno.

W analizowanym przypadku oznaczałoby to, że przy osobnej produkcji energii elektrycznej oraz produkcji rolnej elektrownia fotowoltaiczna (o tej samej mocy zainstalowanej, co rozpatrywana APV), zajęłaby powierzchnię 15,33 ha. Produkcja rolnicza obejmowałaby z kolei 41,91 ha (aby wyprodukować taką samą ilość roślin uprawnych, co w przypadku APV). Suma tych powierzchni wynosi 57,24 ha, podczas gdy takie same efekty daje użytkowanie elektrowni APV na powierzchni zabudowy wynoszącej 55,04 ha.

Uzyskany wynik nie wydaje się być zadowalający. Dlatego też, przy projektowaniu instalacji agrofotowoltaicznych należy odpowiednio dobrać rodzaj systemu. Pozwoli to na zwiększenie efektywności wykorzystania przestrzeni. Równocześnie można zasugerować, że mając wybór pomiędzy budową systemu fotowoltaicznego (EPV) na powierzchni ok. 15 ha a realizacją APV na powierzchni ok. 55 ha, bardziej racjonalnym rozwiązaniem wydaje się budowa tradycyjnej instalacji, w szczególności, gdy istnieje możliwość lokalizacji takiej infrastruktury na terenach innych niż rolne. Dzięki takiej alternatywie rolnicza przestrzeń produkcyjna nie zostałaby w jakikolwiek sposób zaburzona, a zagospodarowanie przez elektrownię fotowoltaiczną odmiennego terenu (np. przemysłowego, produkcyjnego) bardziej odpowiadałoby wypełnieniu idei zachowania ładu przestrzennego.

W przedstawionej sytuacji należałoby rozważyć zmianę systemu (np. instalacji o wyższej konstrukcji wsporczej), a jednocześnie zmianę uprawianych roślin (np. na cieniulubne, które mogłyby rozwijać się pod konstrukcją wsporczą), czy też pozostawienie zaproponowanego systemu, lecz ze zmniejszonym odstępem pomiędzy rzędami paneli. Dwa z ostatnich wymienionych rozwiązań mogą jednak nie być uzasadnione ekonomicznie. Wymuszałyby bowiem zmianę stosowanego sprzętu rolniczego, co prowadziłoby do zwiększenia nakładów na prowadzoną działalność. Wówczas finalny wynik ekonomiczny produkcji rolniczej byłby znacząco niższy.

System agrofotowoltaiczny wydaje się być jednak w tym wypadku pewnym kompromisem pomiędzy prowadzeniem produkcji rolniczej a wytwarzaniem energii elektrycznej. Wynik ekonomiczny dla przedsięwzięcia z zakresu instalacji OZE jest bowiem niższy dla APV, niż dla tradycyjnej elektrowni fotowoltaicznej. Wydaje się on być dobrym rozwiązaniem dla inwestorów w przypadku braku akceptacji społecznej realizacji EPV. Ponadto niższe koszty wynikające z wielkości instalacji mogą być odpowiedzią dla przedsiębiorców posiadających niższy kapitał.

WNIOSKI

Wykorzystanie tej samej przestrzeni na różne cele przynosi odmienne korzyści ekonomiczne. Dotyczy to różnorodnych działalności gospodarczych, w tym – jak wskazano w niniejszym artykule – również form wytwarzania energii elektrycznej z instalacji OZE i prowadzenia działalności rolniczej. W kolejnej tabeli (Tab. 11) porównano wskaźniki ekonomiczne dotyczące prowadzenia na nieruchomości poddanej analizie trzech różnych aktywności gospodarczych: realizacji EPV, APV oraz prowadzenia działalności rolniczej z perspektywy inwestora oraz właściciela nieruchomości.

Tab. 11 Wyniki analizy efektywności ekonomicznej. Źródło: Opracowanie własne

Wskaźnik	Inwestor	Właściciel nieruchomości
Elektrownia fotowoltaiczna		
NPV	107 995 458,90 zł	10 676 463,79 zł
IRR	6,61%	

Okres zwrotu	8,36 lat	
LCOE	182,36 zł	
Prowadzenie działalności rolniczej		
NPV		2 204 360,31 zł
Elektrownia agrofotowoltaiczna (opodatkowanie podatkiem od nieruchomości w całości) - scenariusz I		
NPV	25 010 997,95 zł	5 245 678,84 zł
IRR	11,9987%	
Okres zwrotu	9 lat	
LCOE	192,20 zł	
Elektrownia agrofotowoltaiczna (opodatkowanie podatkiem od nieruchomości w części) - scenariusz II		
NPV	29 974 464,03 zł	5 093 477,76 zł
IRR	13,02%	
Okres zwrotu	8,14 lat	
LCOE	181,15 zł	

Analiza wykazała, że przy przyjętych założeniach wejściowych (stopie dyskontowej równej WACC wynoszącemu 6%, obliczonym CAPEX i OPEX) najbardziej opłacalna dla inwestora jest realizacja tradycyjnej elektrowni fotowoltaicznej. Alternatywą jest wytwarzanie energii przy zastosowaniu systemu agrofotowoltaicznego. W tym wypadku wyniki analizy opłacalności inwestycji wskazują, że korzystniejsze jest przyjęcie interpretacji podatkowej, w ramach której jedynie część obszaru przedsięwzięcia stanowi podstawę do naliczenia podatku od nieruchomości.

Z kolei dla właściciela nieruchomości, przy przyjętych danych wejściowych do obliczeń (stopie dyskontowej wynoszącej 5,97% i zdefiniowanych przepływach finansowych przy uśrednionych plonach) najkorzystniejsze jest oddanie nieruchomości w dzierżawę pod EPV (przy przyjętym czynszu dzierżawnym wynoszącym 20 000 zł/ha i założeniu, że wartość podatku od

nieruchomości zwracana jest właścicielowi). Istotne jest jednak, aby rozważyć również pozafinansowe aspekty dzierżawy gruntu.

Realizacja EPV przyczyniałaby się jednak do industrializacji przestrzeni wiejskiej i wpływała na krajobraz. Dotyczy to również systemu APV, który może oddziaływać na odbiór przestrzeni w podobny sposób. Wskazano jednak, że odpowiednie zaprojektowanie EPV i APV (w szczególności stworzenie barier krajobrazowych) może zmniejszyć wpływ na odczuwanie przestrzeni przez jej użytkowników.

Zabudowa tradycyjnym systemem fotowoltaicznym wpływałaby na bezpieczeństwo żywnościowe. Ten typ zabudowy przemysłowej wyparłby rolnicze wykorzystanie gruntu ograniczając znacząco rolniczą przestrzeń produkcyjną. Szczególnie widoczny wpływ na ograniczenie produkcji rolnej miałyby miejsce w przypadku skumulowanego oddziaływania elektrowni fotowoltaicznych.

Stosując wskaźnik LER wykazano, że efektywność wykorzystania przestrzeni w kontekście elektrowni agrofotowoltaicznej zależy w dużej mierze od odpowiedniego doboru systemu EPV. W przypadku niskich wartości tego wskaźnika zasadne jest rozważenie rozdzielenia działalności z zakresu wytwórczej energii elektrycznej oraz działalności rolniczej i prowadzenie ich osobno, a nie jako EPV. W szczególności warto jest zastosować wskazany podział, jeśli inwestor dysponuje alternatywą w postaci odmiennej lokalizacji.

Podziękowania

Rzetelna analiza w zakresie działalności rolniczej nie byłaby możliwa bez odpowiednich danych. Chciałbym wyrazić wdzięczność Panu Antoniemu Puk – właścicielowi analizowanej nieruchomości. Dzięki udostępnionym danym do obliczeń z zakresu prowadzenia działalności rolniczej mogłem dokonać odpowiedniej analizy wykorzystania przestrzeni w wariantach prowadzenia działalności rolniczej. Miały one również istotną wartość przy szacowaniu produkcji rolniczej w ramach elektrowni agrofotowoltaicznej.

LITERATURA

- [1] Abas N., Kalair A., Khan N.: Review of fossil fuels and future energy technologies. *Futures* 2015, nr 69, str. 31-49
- [2] Armaroli N., Vincenzo B.: The Legacy of Fossil Fuels. *Chemistry. An Asian Journal* 2011, nr 6, str. 768-784
- [3] Burblis J.: Od facelii po nawłóć. *Twój Doradca. Rolniczy Rynek. Dolnośląski Ośrodek Doradztwa Rolniczego* 2019, nr 7, str. 43-46
- [4] Darling S. i in.: Assumptions and the levelized cost of energy for photovoltaics. *Energy & Environmental Science* 2011, nr 4, str.3133-3139
- [5] Dupraz C. i in.: Combining solar photovoltaic panels and food crops for optimising land use: Towards new agrivoltaic schemes. *Renewable Energy* 2011, nr 36, str. 2725-2732
- [6] Dyka E., Mróz-Radłowska I.: *Ekonomia w energetyce. Wybrane zagadnienia*. Politechnika Łódzka, Łódź, 2014
- [7] Gnap M., Pietra R.: The Relevance of using cash flows and economic profit-based methods in capital budgeting: A focus on techniques - FCFF, FCFE and EVA. *Scientific Papers of Silesian University of Technology – Organization and Management Series* 2023, nr 172, str. 219-238
- [8] González-Peña D. i in.: Photovoltaic Prediction Software: Evaluation with Real Data from Northern Spain. *Applied Sciences* 2021, nr 11
- [9] Komunikat Prezesa Głównego Urzędu Statystycznego z dnia 19 października 2023 r. w sprawie średniej ceny skupu żyta za okres 11 kwartałów będącej podstawą do ustalenia podatku rolnego na rok podatkowy 2024 (M.P. 2023 poz. 1129)
- [10] Michalski M.: Okresy i stopy zwrotu nakładów inwestycyjnych w ocenie efektywności inwestycji rzeczowych. *Ekonomia Menedżerska* 2009, nr 5, str. 45-62

-
- [11] Mikołajczyk J.: Zastosowanie miar oceny efektywności ekonomicznej do planowania oraz oceny działań dywestycyjnych w gospodarstwach rolniczych. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej* 2012, nr 3, str. 131-141
- [12] Minut-Kaszyńska M.: Metody wyceny produkcji roślinnej w toku. Kujawsko-Pomorski Ośrodek Doradztwa Rolniczego w Minikowie, Minikowo, 2018
- [13] Pelczar S.: Skażenie środowiska wynikające ze stosowania środków ochrony roślin: praca przeglądowa. W: *Koła naukowe kuźnią talentów zarządzania*. Wydawnictwa AGH, Kraków, 2023
- [14] Photovoltaic Geographical Information System (PVGIS), https://joint-research-centre.ec.europa.eu/photovoltaic-geographical-information-system-pvgis_en, dostęp: 05.06.2024
- [15] Psoomopoulos C. i in.: A Comparative Evaluation of Photovoltaic Electricity Production Assessment Software (PVGIS, PVWatts and RETScreen). *Environmental Processes* 2015, nr 2, str. 175-189
- [16] Rozporządzenie Ministra Finansów z dnia 10 grudnia 2001 r. w sprawie zaliczenia gmin oraz miast do jednego z czterech okręgów podatkowych (Dz.U. nr 143 poz. 1614)
- [17] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 26 kwietnia 2013 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać sieci gazowe i ich usytuowanie (Dz.U. poz. 640)
- [18] Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 31 marca 2014 r. w sprawie warunków stosowania środków ochrony roślin (Dz.U. poz. 516)
- [19] Sári M. i in.: Geographic Aspects of Photovoltaics in Europe: Contribution of the PVGIS Website. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 2008, nr 1, str. 34-41
- [20] Tworowski J., Szczukowski S., Kwiatkowski J.: Plon i wartość siewna lucerny błękitnej (*Phacelia tanacetifolia*)

-
- Beneth.) w zależności od wybranych czynników agrotechnicznych. Zeszyty Problemowe Postępu Nauk Rolniczych 1999, nr 468, str. 241-247
- [21] Uchwała nr LXV/611/2023 Rady Gminy Lubaczów z dnia 1 grudnia 2023 r. w sprawie określenia wysokości stawek podatku od nieruchomości (Dz. Urz. Woj. Podkarpackiego poz. 5551)
- [22] Ustawa z dnia 11 marca 2004 r. o podatku od towarów i usług (t.j. Dz.U. 2024 poz. 361)
- [23] Ustawa z dnia 12 stycznia 1991 r. o podatkach i opłatach lokalnych (t.j. Dz.U. 2023 poz. 70 ze zm.)
- [24] Ustawa z dnia 15 listopada 1984 r. o podatku rolnym (t.j. Dz.U. 2020 poz. 333 ze zm.)
- [25] Ustawa z dnia 21 marca 1985 r. o drogach publicznych (t.j. Dz.U. 2024 poz. 320)
- [26] Ustawa z dnia 26 lipca 1991 r. o podatku dochodowym od osób fizycznych (t.j. Dz.U. 2024 poz. 226 ze zm.)
- [27] Ustawa z dnia 3 lutego 1995 r. o ochronie gruntów rolnych i leśnych (t.j. Dz.U. 2024 poz. 82)
- [28] Wańkowicz W., Lipińska H., Kępkowicz A.: Gospodarowanie przestrzenią. Poszukiwanie modelu decyzyjnego. Zarządzanie Publiczne 2016, nr 3 (37), str. 52-61
- [29] Weselek A. i in.: Agrophotovoltaic systems: applications, challenges, and opportunities. A review. Agronomy for Sustainable Development 2019, 39:35
- [30] Willcock B. i in.: A standardized classification and performance indicators of agrivoltaic systems. Conference Paper, 37th European Photovoltaic Solar Energy Conference and Exhibition 2020, Lizbona

ENERGY TRANSITION AND LAND USE — AGRICULTURAL ACTIVITY, PHOTOVOLTAIC POWER PLANT OR AGROPHOTOVOLTAIC POWER PLANT?

Key words: use of the space; photovoltaic power plant; agrophotovoltaic; impact on the space; project effectiveness assessment

Summary. The aim of this study is to determine the impact of three different economic activities on space use. These activities are as follows: a) agricultural activity; b) production of electric energy by a photovoltaic power plant; c) simultaneous agricultural activity combined with energy production by an agrophotovoltaic power plant. The impact on the space was investigated from an economic perspective: as expected result of the economic activity carried out for answering the question of which available form of development is the most appropriate one from the financial point of view (for both parties: investor and the property owner). In addition, a potential impact on the landscape was indicated. Additionally, the effectiveness of space use was described, especially in the context of the agrophotovoltaic (APV) system. The potential disadvantages of this system were indicated, suggesting alternative solutions.

Szymon Pelczar: Doktorant na Wydziale Inżynierii Lądowej i Gospodarki Zasobami Akademii Górniczo-Hutniczej. W swojej pracy badawczej skupia się obecnie na ocenie oddziaływanie elektrowni fotowoltaicznych na środowisko oraz możliwościach rozwoju instalacji agrofotowoltaicznych w Polsce. Zainteresowania to przede wszystkim zagadnienia związane z planowaniem przestrzennym, oddziaływaniem przedsięwzięć na środowisko i analizą przestrzenną. Adres e-mail: pelczar@agh.edu.pl.

Innowacje w technologiach fotowoltaicznych oraz wiatrowych

Dr Przemysław Jura

Instytut Nauk Ekonomicznych i Społecznych

Streszczenie: Artykuł omawia postępy w dziedzinie technologii odnawialnych źródeł energii, koncentrując się na fotowoltaice i energetyce wiatrowej. Połączenie różnych materiałów półprzewodnikowych w ogniwach tandemowych pozwala na lepsze wykorzystanie spektrum słonecznego. Przykłady to ogniwa krzemowo-perowskitowe oraz III-V. Technologie tandemowe mają potencjał do zwiększenia wydajności powyżej 30%, ale stoją przed wyzwaniami dotyczącymi trwałości, produkcji i recyklingu. Artykuł podkreśla, że innowacje technologiczne w obszarze OZE są kluczowe dla zrównoważonego rozwoju energetycznego, ale wiążą się również z wyzwaniami technologicznymi i środowiskowymi, które muszą zostać rozwiązane, aby w pełni wykorzystać potencjał tych technologii.

Wstęp

W obliczu rosnących wyzwań związanych z globalnymi zmianami klimatycznymi oraz ciągle rosnącym globalnym zapotrzebowaniem na energię, rozwój odnawialnych źródeł energii (OZE) stał się nieodzownym elementem polityki energetycznej na całym świecie. Dążenie do zwiększenia udziału OZE w miksie energetycznym jest wspierane przez ciągłe innowacje technologiczne, które nie tylko podnoszą efektywność i dostępność tych technologii, ale również zmniejszają ich koszty operacyjne i inwestycyjne. Niniejszy artykuł ma na celu zbadanie najnowszych postępów w technologiach fotowoltaicznych, wiatrowych oraz w magazynowaniu energii, które stanowią kluczowe obszary innowacji umożliwiających przejście do zrównoważonego systemu energetycznego.

Energia fotowoltaiczna, będąca jednym z najszybciej rozwijających się sektorów OZE, doświadcza dynamicznych zmian dzięki wprowadzaniu nowych materiałów półprzewodnikowych i technologii produkcyjnych, które zwiększają wydajność ogniw słonecznych przy jednoczesnym obniżeniu kosztów produkcji. Ostatnie innowacje w tej dziedzinie, w tym rozwój ogniw perowskitowych i technologii tandemowych, otwierają nowe możliwości dla zastosowań zarówno w dużych, jak i małych skalach.

Równolegle, technologia turbin wiatrowych kontynuuje swój rozwój w kierunku zwiększania mocy i efektywności turbin, jak również ich adaptacji do różnorodnych warunków środowiskowych i geograficznych. Innowacje takie jak turbiny wiatrowe pływające oraz rozwój turbin o pionowej osi obiecują dostęp do nowych lokalizacji i optymalizację wykorzystania dostępnych zasobów wiatrowych.

1. Podstawy i przełomy w technologiach fotowoltaicznych

1.1. Nowoczesne materiały w fotowoltaice

Fotowoltaika jest jedną z najbardziej dynamicznie rozwijających się dziedzin technologii odnawialnych źródeł energii. Kluczowym elementem tego postępu są innowacje w materiałach wykorzystywanych do produkcji ogniw słonecznych. Tradycyjne ogniwa krzemowe, choć szeroko stosowane, mają swoje ograniczenia, dlatego naukowcy i inżynierowie poszukują nowych materiałów półprzewodnikowych, które mogą zaoferować wyższą wydajność, niższe koszty produkcji oraz większą elastyczność w zastosowaniach.

Perowskity są jednymi z najbardziej obiecujących nowych materiałów w fotowoltaice. Charakteryzują się strukturą krystaliczną typu ABX_3 , gdzie A i B to kationy, a X to anion. Perowskity mają unikalne właściwości optoelektroniczne, które sprawiają, że są wyjątkowo efektywne w absorpcji światła i konwersji energii słonecznej na energię elektryczną. Ogniwa perowskitowe osiągnęły znaczne postępy w wydajności konwersji energii, przekraczając 25% w laboratoriach, co jest porównywalne z najlepszymi ogniwami krzemowymi. Perowskity mają wysoką absorpcję światła, co pozwala na tworzenie cienkowarstwowych ogniw, które są lżejsze i mogą być elastyczne⁴.

Proces produkcji ogniw perowskitowych jest potencjalnie tańszy niż produkcja ogniw krzemowych, ponieważ wymaga niższych temperatur i mniej energochłonnych procesów. Perowskity można osadzać na różnych podłożach, co otwiera możliwości integracji z różnymi powierzchniami, od okien po elastyczne folie.

Ogniwa z Tellurku Kadmu (CdTe) są kolejnym, a przy tym jednym z najstarszych rodzajów cienkowarstwowych ogniw słonecznych, które nadal mają duże znaczenie w przemyśle fotowoltaicznym. Wydajność ogniw CdTe przekracza 22%, co czyni je jednymi z najbardziej efektywnych cienkowarstwowych ogniw słonecznych. Mają one doskonałą absorpcję światła, co pozwala na tworzenie cienkich warstw aktywnych. Technologia CdTe jest dobrze rozwinięta i dojrzała, z niskimi kosztami produkcji w porównaniu do krzemu krystalicznego. Proces produkcji jest mniej energochłonny i wymaga mniejszych ilości

⁴ Perovskite in solar cells application, Agata Horwacik, Contemporary Problems of Power Engineering and Environmental Protection 2019

surowców. Kadm jest toksycznym metalem ciężkim, co stawia wyzwania w zakresie bezpiecznej produkcji, recyklingu i utylizacji ogniw CdTe. Konieczne są odpowiednie środki ostrożności i regulacje, aby zminimalizować wpływ na środowisko i zdrowie ludzkie.

Z kolej **ogniwa z Arsenku Galu (GaAs)** są znane ze swojej wysokiej wydajności i wyjątkowych właściwości optoelektronicznych. Są szeroko stosowane w zastosowaniach specjalistycznych, takich jak satelity i urządzenia mobilne. Ogniwa GaAs mogą osiągać wydajność powyżej 29%, co czyni je jednymi z najbardziej wydajnych ogniw słonecznych. Mają one szeroki zakres absorpcji widma słonecznego i bardzo niskie straty energii wewnętrznej. Produkcja ogniw GaAs jest kosztowna ze względu na drogie materiały i skomplikowane procesy produkcyjne. Dlatego też, ogniwa te są głównie wykorzystywane w aplikacjach, gdzie wydajność jest ważniejsza niż koszt, takich jak technologie kosmiczne. Ze względu na ich wyjątkowe właściwości, ogniwa GaAs są stosowane w miejscach, gdzie wymagane są wysokie osiągi w trudnych warunkach, takich jak satelity, samoloty i pojazdy elektryczne.

Każdy z wymienionych nowych materiałów fotowoltaicznych wiąże się z własnymi **wyzwaniami technologicznymi i środowiskowymi**.

Perowskity: Chociaż perowskity oferują wysoką wydajność i niskie koszty produkcji, ich stabilność w długim okresie jest nadal przedmiotem intensywnych badań. Problemy z degradacją materiału pod wpływem wilgoci i promieniowania UV muszą zostać rozwiązane, aby zapewnić długotrwałą wydajność.

Ogniwa CdTe: Pomimo wysokiej wydajności i niskich kosztów produkcji, wyzwania związane z toksycznością kadmu

wymagają odpowiednich regulacji i technologii recyklingu, aby zminimalizować ryzyko dla środowiska i zdrowia ludzkiego.

Ogniwa GaAs: Koszty produkcji i dostępność surowców stanowią główne wyzwania dla szerokiego zastosowania ogniw GaAs. Ponadto, skomplikowane procesy produkcyjne wymagają zaawansowanego sprzętu i technologii, co ogranicza ich zastosowanie do niszowych rynków.

Nowoczesne materiały wykorzystywane w fotowoltaice, takie jak perowskity, tellurek kadmu i arsenek galu, oferują znaczące korzyści w zakresie wydajności i elastyczności zastosowań. Każdy z tych materiałów ma swoje unikalne właściwości, które przyczyniają się do zwiększenia absorpcji światła i efektywności konwersji energii słonecznej. Niemniej jednak, ich produkcja i utylizacja wiążą się z istotnymi wyzwaniami technologicznymi i środowiskowymi, które muszą zostać rozwiązane, aby fotowoltaika mogła w pełni wykorzystać swój potencjał jako jedno z głównych źródeł energii odnawialnej w przyszłości.

1.2. Technologie tandemowe i wielowarstwowe

Poprzez łączenie różnych materiałów półprzewodnikowych w jednym ogniwie, te technologie pozwalają na lepsze wykorzystanie szerokiego spektrum światła słonecznego, co przekłada się na wyższą wydajność energetyczną. Warto zaprezentować rozwój technologii tandemowych, przykłady badań oraz komercyjnych zastosowań, podkreślając ich potencjał w dalszym zwiększaniu efektywności konwersji energii.

Technologie tandemowe wykorzystują wiele warstw półprzewodnikowych o różnych właściwościach optycznych i elektrycznych, które są ułożone jedna na drugiej. Każda warstwa jest zoptymalizowana do absorpcji określonej części

widma słonecznego. Dzięki temu możliwe jest bardziej efektywne przechwytywanie i konwersja energii słonecznej w porównaniu z tradycyjnymi ogniwami jednowarstwowymi.

Ogniwa Tandemowe na Bazie Krzemu i Perowskitów: Jednym z najczęściej badanych systemów tandemowych jest połączenie ogniwa krzemowego z perowskitowym. Krzem absorbuje głównie podczerwień, podczas gdy perowskity są efektywne w widzialnym zakresie spektrum. Łącząc te dwa materiały, można osiągnąć wydajność powyżej 30%.

Ogniwa Tandemowe III-V***: Ogniwa tandemowe złożone z materiałów III-V, takich jak arsenek galu (GaAs) i fosforek indu (InP), wykazują bardzo wysoką wydajność, często przekraczającą 35%. Te materiały są jednak droższe, co ogranicza ich zastosowanie głównie do technologii kosmicznych i specjalistycznych.

Wiele ośrodków badawczych na całym świecie prowadzi **intensywne badania nad rozwojem technologii tandemowych**. Przykłady takich badań obejmują:

- Badania nad Ogniwami Krzemowo-Perowskitowymi: Laboratoria na całym świecie, w tym NREL (National Renewable Energy Laboratory) w USA, prowadzą zaawansowane badania nad optymalizacją struktury i procesów produkcyjnych ogniw tandemowych krzemowo-perowskitowych. W 2020 roku, badacze z NREL osiągnęli rekordową wydajność 31,25% dla tandemowego ogniwa krzemowo-perowskitowego.

- Projekt TandemPV: W ramach europejskiego projektu TandemPV, badacze skupiają się na komercjalizacji ogniw tandemowych opartych na krzemie i perowskitach. Projekt ten ma na celu nie tylko zwiększenie wydajności, ale także obniżenie

kosztów produkcji poprzez rozwój skalowalnych metod wytwarzania.

Komercjalizacja technologii tandemowych jest już w toku, a kilka firm zaczyna oferować produkty wykorzystujące te innowacje:

- Oxford PV: Firma ta jest jednym z liderów w rozwoju ogniw tandemowych krzemowo-perowskitowych. Oxford PV ogłosiła plany rozpoczęcia masowej produkcji swoich wysokowydajnych ogniw w najbliższych latach, z oczekiwaniami osiągnięcia wydajności przekraczającej 30%.

- First Solar: Choć tradycyjnie znana z ogniw CdTe, First Solar również bada technologie tandemowe, łącząc różne materiały, aby zwiększyć wydajność swoich produktów.

Technologie tandemowe mają ogromny potencjał w dalszym zwiększaniu efektywności konwersji energii słonecznej. Dzięki możliwości wykorzystania szerszego zakresu widma słonecznego, ogniwa tandemowe mogą osiągać znacznie wyższą wydajność niż tradycyjne ogniwa jednowarstwowe. W miarę rozwoju materiałów i technologii produkcji, spodziewamy się dalszych przełomów, które uczynią te technologie bardziej ekonomicznymi i szeroko dostępnymi. Zwiększenie wydajności ogniw fotowoltaicznych prowadzi do zmniejszenia kosztów energii słonecznej, czyniąc ją bardziej konkurencyjną w stosunku do tradycyjnych źródeł energii. Wprowadzenie ogniw tandemowych do masowej produkcji może przyspieszyć ten proces. Dzięki swojej wysokiej wydajności, ogniwa tandemowe znajdują zastosowanie w miejscach, gdzie przestrzeń jest ograniczona, a wydajność jest kluczowa, takich jak instalacje na dachach budynków, pojazdy elektryczne oraz technologie kosmiczne.

Mimo ogromnego potencjału, technologie tandemowe stoją przed szeregiem **wyzwań technologicznych i środowiskowych**:

- **Stabilność i Trwałość**: Perowskity, choć bardzo wydajne, mają problemy ze stabilnością długoterminową. Badania nad poprawą trwałości tych materiałów są kluczowe dla ich komercyjnego sukcesu.

- **Produkcja i Skalowalność**: Wdrożenie nowych materiałów i technologii do masowej produkcji wymaga znacznych inwestycji i rozwoju procesów produkcyjnych. Skalowanie produkcji ogniw tandemowych do poziomu przemysłowego jest jednym z głównych wyzwań.

- **Recykling i Utylizacja**: Nowe materiały w technologii fotowoltaicznej muszą być bezpieczne dla środowiska. Konieczne jest rozwijanie technologii recyklingu, aby zminimalizować wpływ na środowisko po zakończeniu cyklu życia ogniw.

Technologie tandemowe i wielowarstwowe w fotowoltaice reprezentują przyszłość energii słonecznej. Dzięki zdolności do efektywnego wykorzystania szerokiego spektrum światła słonecznego, te innowacje mają potencjał znacząco zwiększyć wydajność konwersji energii i obniżyć koszty. Pomimo wyzwań związanych z trwałością, produkcją i utylizacją, postępy w badaniach i komercjalizacji tych technologii wskazują na ich kluczową rolę w przyszłym rozwoju sektora energetyki odnawialnej⁵.

⁵ Trends and innovations in photovoltaic operations and maintenance, [G Oviedo Hernandez](#), [D M Godinho Ariolli](#), [P S Enriquez Paez](#), [P V Chiantore](#), *Progress in Energy*, 2022 nr 4

1.3. Przyszłość fotowoltaiki: elastyczność i zastosowania

Jednym z najbardziej obiecujących kierunków jest rozwój elastycznych ogniw słonecznych, które można integrować z różnorodnymi powierzchniami i materiałami, co pozwala na tworzenie innowacyjnych rozwiązań w architekturze, transporcie oraz w urządzeniach mobilnych. W tym rozdziale omówimy przyszłe kierunki rozwoju fotowoltaiki, koncentrując się na elastycznych ogniwach słonecznych i ich potencjalnych zastosowaniach.

Elastyczne ogniwa słoneczne, w przeciwieństwie do tradycyjnych, sztywnych ogniw krzemowych, są zbudowane z materiałów, które pozwalają na ich zginanie i montaż na nierównych powierzchniach.

- **Materiały:** Najczęściej stosowane materiały do produkcji elastycznych ogniw słonecznych to organiczne półprzewodniki, perowskity oraz cienkowarstwowe półprzewodniki na bazie krzemu amorficznego, tellurku kadmu (CdTe) i selenku miedziowo-indowo-galowego (CIGS).

- **Wydajność:** Chociaż elastyczne ogniwa słoneczne mają zazwyczaj niższą wydajność niż tradycyjne ogniwa krzemowe, postępy w materiałach i technologiach produkcji prowadzą do stałego zwiększania ich efektywności. Obecnie niektóre elastyczne ogniwa osiągają wydajność powyżej 15%, a dalsze badania mogą jeszcze bardziej zwiększyć ten parametr.

Elastyczne ogniwa słoneczne otwierają **nowe możliwości zastosowań**, które byłyby niemożliwe do zrealizowania przy użyciu tradycyjnych, sztywnych paneli słonecznych:

- **Ubrania i Tekstyliia:** Integracja elastycznych ogniw słonecznych w odzieży i tekstyliach umożliwia zasilanie urządzeń

przenośnych, takich jak smartfony, tablety i inne urządzenia elektroniczne, bez konieczności używania baterii lub kabli. Przykłady obejmują plecaki, kurtki i namioty, które mogą generować energię podczas codziennego użytkowania.

- Architektura i Budownictwo: Fotowoltaika zintegrowana z budynkiem (BIPV) to szybko rozwijający się obszar, w którym elastyczne ogniwa mogą być stosowane na fasadach budynków, dachach, a nawet oknach. Tego typu integracja nie tylko generuje energię, ale także poprawia estetykę i funkcjonalność budynków.

- Transport: Elastyczne ogniwa słoneczne mogą być montowane na pojazdach, takich jak samochody, autobusy, a nawet samoloty i drony, w celu zasilania systemów pokładowych lub wspomagania napędu. Pozwala to na zmniejszenie zużycia paliwa i emisji, przyczyniając się do bardziej zrównoważonego transportu.

Integracja systemów fotowoltaicznych z architekturą miejską to kluczowy trend przyszłości, który łączy estetykę z funkcjonalnością:

- Fasady i Dachy: Nowoczesne projekty budynków coraz częściej wykorzystują fotowoltaiczne panele jako integralne elementy fasad i dachów. Tego typu rozwiązania nie tylko produkują energię, ale także poprawiają izolację termiczną budynków, zmniejszając zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia.

- Okna Fotowoltaiczne: Transparentne ogniwa słoneczne mogą być zintegrowane z oknami, umożliwiając generowanie energii przy jednoczesnym zachowaniu przejrzystości. Takie okna mogą być stosowane zarówno w budynkach komercyjnych, jak

i mieszkalnych, oferując dodatkowe korzyści w postaci redukcji emisji CO₂.

- Elementy Małej Architektury: Fotowoltaika może być również zintegrowana z elementami małej architektury miejskiej, takimi jak ławki, przystanki autobusowe, latarnie uliczne czy stacje ładowania pojazdów elektrycznych. To nie tylko poprawia estetykę przestrzeni miejskich, ale także wspiera rozwój inteligentnych miast (smart cities).

Fotowoltaika znajduje coraz szersze **zastosowanie w różnych aspektach transportu i mobilnych aplikacjach:**

- Pojazdy Elektryczne: Fotowoltaiczne dachy samochodów elektrycznych mogą wspomagać ładowanie baterii, wydłużając zasięg pojazdów i zmniejszając częstotliwość ładowania z sieci. Przykłady obejmują samochody osobowe, autobusy i kampery.

- Drony i UAV: Bezzałogowe statki powietrzne (UAV) wyposażone w elastyczne ogniwa słoneczne mogą wykonywać dłuższe misje bez potrzeby częstego ładowania, co jest szczególnie istotne w zastosowaniach wojskowych, ratowniczych i monitoringu środowiskowego.

- Urządzenia Mobilne: Elastyczne ogniwa słoneczne zintegrowane z urządzeniami mobilnymi, takimi jak smartfony, laptopy i wearables, mogą dostarczać energię w sposób ciągły, eliminując potrzebę tradycyjnego ładowania i zwiększając wygodę użytkownika.

Mimo licznych korzyści, rozwój elastycznych ogniw słonecznych i ich integracja z różnorodnymi powierzchniami napotykają na pewne **wyzwania rozwojowe:**

- Trwałość i Wydajność: Jednym z głównych wyzwań jest zapewnienie trwałości i stabilności wydajności elastycznych

ogniów słonecznych w różnych warunkach użytkowania, w tym pod wpływem czynników atmosferycznych, mechanicznych i termicznych.

- Koszty Produkcji: Choć koszty elastycznych ogniów słonecznych maleją, wciąż pozostają one wyższe niż tradycyjnych ogniów krzemowych. Rozwój bardziej efektywnych i tanich procesów produkcji jest kluczowy dla ich szerokiej komercjalizacji.

- Integracja Systemów: Integracja elastycznych ogniów słonecznych z różnymi materiałami i strukturami wymaga zaawansowanych technologii montażu i połączeń elektrycznych, które zapewnią niezawodność i wydajność systemów fotowoltaicznych.

Przyszłość fotowoltaiki leży w elastyczności i różnorodności zastosowań. Rozwój elastycznych ogniów słonecznych i ich integracja z architekturą miejską, transportem oraz urządzeniami mobilnymi otwiera nowe możliwości dla zrównoważonego rozwoju energetycznego. Mimo wyzwań, postępy technologiczne i rosnące zainteresowanie komercyjne wskazują na ogromny potencjał tych innowacji w tworzeniu bardziej efektywnego i ekologicznego świata⁶.

2. Przełomy w technologiach wiatrowych: od lądowych do morskich turbin

2.1. Nowe projekty turbin wiatrowych

Nowoczesne projekty turbin wiatrowych koncentrują się na zwiększaniu efektywności i minimalizacji negatywnego

⁶ Sustainability perspectives- a review for solar photovoltaic trends and growth opportunities, Piyush Choudhary, Rakesh Kumar Srivastava, Journal of Cleaner Production, 2019 nr 227

wpływu na środowisko. Innowacje w projektowaniu turbin, szczególnie w zakresie technologii łopat, systemów redukcji hałasu oraz technik zmniejszających ryzyko kolizji z ptakami, odgrywają kluczową rolę w osiągnięciu tych celów.

Łopaty turbin wiatrowych są jednym z najważniejszych komponentów, wpływającym bezpośrednio na wydajność i efektywność produkcji energii. **Nowoczesne technologie łopat** koncentrują się na kilku kluczowych aspektach:

- **Materiały Kompozytowe:** Innowacje w materiałach kompozytowych, takich jak włókna węglowe i szklane, pozwalają na tworzenie lżejszych, ale jednocześnie wytrzymalszych łopat. Lżejsze łopaty mogą zwiększyć wydajność turbin przy mniejszych prędkościach wiatru, co jest szczególnie istotne w regionach o umiarkowanych warunkach wietrznych.

- **Aerodynamika:** Zaawansowane projekty łopat wykorzystują optymalizację aerodynamiczną, aby maksymalizować efektywność konwersji energii wiatru na energię mechaniczną. Techniki takie jak skrzydła adaptacyjne (adaptive blades), które mogą zmieniać swój kształt w zależności od warunków wiatrowych, pozwalają na utrzymanie optymalnej wydajności w szerokim zakresie prędkości wiatru.

- **Powłoki Antyerozyjne:** Nowe powłoki i materiały ochronne na łopaty są rozwijane w celu zmniejszenia erozji spowodowanej przez cząstki powietrza, takie jak piasek i krople deszczu. Te innowacje wydłużają żywotność łopat i zmniejszają koszty konserwacji.

Hałas generowany przez turbiny wiatrowe jest jednym z głównych problemów środowiskowych i społecznych, szczególnie w pobliżu zamieszkanym obszarów. **Innowacje w redukcji hałasu** obejmują:

- Konstrukcja Łopat: Zaawansowane projekty łopat z serrated trailing edges (ząbkowanymi krawędziami wylotowymi) oraz bioinspirowane wzory, takie jak struktury przypominające pióra sowy, mogą znacznie zmniejszyć hałas generowany przez wirnik.

- Technologie Akustyczne: Aktywne systemy redukcji hałasu, które wykorzystują przeciwfale dźwiękowe do neutralizacji hałasu generowanego przez turbiny, są w fazie badań i testów. Te technologie mogą znacznie poprawić komfort życia w pobliżu farm wiatrowych.

Kolizje ptaków z turbinami wiatrowymi są istotnym problemem ekologicznym, dlatego rozwiązania technologiczne nakierowane są na **minimalizację ryzyka kolizji z ptactwem**. Różne technologie i strategie są rozwijane w celu zmniejszenia tego ryzyka:

- Detektory i Systemy Ostrzegawcze: Zaawansowane systemy detekcji wykorzystujące radar i technologię wizyjną mogą monitorować obecność ptaków w pobliżu turbin. Systemy te mogą automatycznie zatrzymać turbiny lub zmniejszyć prędkość wirnika, gdy ptaki zbliżają się do strefy ryzyka.

- Malowanie Łopat: Badania wykazały, że malowanie jednej z łopat turbiny na czarno może zmniejszyć ryzyko kolizji z ptakami poprzez zwiększenie ich widoczności. Ta prosta, ale efektywna technika jest testowana i wdrażana na niektórych farmach wiatrowych.

- Technologie Ultrasoniczne: Emitowanie ultradźwięków, które są niesłyszalne dla ludzi, ale odczuwalne przez ptaki, może skutecznie odstraszać ptaki od turbin wiatrowych. Te technologie są obecnie testowane w różnych środowiskach.

Nowe projekty turbin wiatrowych przynoszą znaczące innowacje, które maksymalizują efektywność produkcji energii oraz minimalizują negatywne skutki dla środowiska. Zaawansowane technologie łopat, systemy redukcji hałasu, techniki minimalizujące ryzyko kolizji z ptakami oraz inteligentne systemy sterowania stanowią fundament przyszłości energetyki wiatrowej. W miarę jak technologia wiatrowa nadal się rozwija, możemy spodziewać się dalszych usprawnień, które przyczynią się do bardziej zrównoważonej i efektywnej produkcji energii odnawialnej.⁷

2.2. Turbiny pływające – kierunek rozwoju energetyki morskiej

Energetyka wiatrowa na morzu staje się jednym z kluczowych obszarów rozwoju odnawialnych źródeł energii, a turbiny pływające odgrywają coraz bardziej znaczącą rolę w tym segmencie. W miarę jak poszukiwania nowych lokalizacji dla farm wiatrowych na lądzie stają się coraz trudniejsze, energetyka morska oferuje ogromny potencjał, zwłaszcza na głębokich wodach, gdzie tradycyjne turbiny wiatrowe o stałych fundamentach nie mogą być instalowane.

Turbiny pływające można podzielić na kilka głównych typów w zależności od konstrukcji ich fundamentów:

- Platformy półzanurzalne: Te konstrukcje są częściowo zanurzone w wodzie, co zapewnia im stabilność. Są one utrzymywane na miejscu za pomocą systemu kotwic i lin.

⁷ Materials, Innovations and Future Research Opportunities on Wind Turbine Blades—Insight Review, N. Karthikeyan, R.B. Anand, T. Suthakar, Shubham Barhate, Environmental Progress & Sustainable Energy, 2019 nr 38

- Platformy z układem napiętych lin (TLP): Ten typ fundamentu wykorzystuje napięte liny kotwiczące, które zapewniają stabilność poprzez wywieranie ciągłego nacisku na platformę.

- Spar Buoys: Są to długie cylindryczne struktury, które sięgają głęboko pod powierzchnię wody, zapewniając stabilność poprzez dużą masę i nisko położony środek ciężkości.

Turbiny pływające znajdują zastosowanie głównie na głębokich wodach, gdzie instalacja tradycyjnych turbin o stałych fundamentach jest ekonomicznie lub technicznie niewykonalna. Typowe zastosowania obejmują:

- Farmy wiatrowe na otwartym morzu: Turbiny pływające mogą być instalowane na głębokościach sięgających nawet kilkuset metrów, co umożliwia wykorzystanie silniejszych i bardziej stabilnych wiatrów z dala od wybrzeży.

- Eksploracja nowych rynków: Kraje o ograniczonych płytkich wodach przybrzeżnych mogą rozwijać swoje zasoby energetyczne poprzez instalację turbin pływających na głębokich wodach.

- Demonstracyjne projekty pilotażowe: Turbiny pływające są często wykorzystywane w projektach pilotażowych, które mają na celu ocenę ich wydajności i wpływu na środowisko przed pełnym wdrożeniem na dużą skalę.

Turbiny pływające oferują szereg korzyści, które mogą przyczynić się do rozwoju energetyki morskiej:

- Dostęp do lepszych zasobów wiatrowych: Na otwartym morzu wiatry są zazwyczaj silniejsze i bardziej stabilne niż na lądzie czy blisko wybrzeża, co zwiększa wydajność turbin.

- Zmniejszony wpływ wizualny: Turbiny pływające mogą być umieszczane dalej od brzegu, co minimalizuje ich wpływ na krajobraz i zmniejsza obawy społeczności lokalnych związane z widocznością turbin.

- Elastyczność lokalizacji: Brak ograniczeń związanych z głębokością wody pozwala na większą elastyczność w wyborze lokalizacji, co może prowadzić do bardziej optymalnych rozwiązań pod względem wietrzności i dostępności przestrzeni.

Mimo licznych korzyści, **turbiny pływające napotykają na szereg wyzwań**, które muszą zostać rozwiązane, aby mogły być wdrażane na szeroką skalę:

- Stabilność i kotwiczenie: Zapewnienie stabilności turbin na otwartym morzu, zwłaszcza w warunkach ekstremalnych, takich jak burze i wysokie fale, jest kluczowym wyzwaniem. Systemy kotwiczenia muszą być wyjątkowo wytrzymałe i niezawodne.

- Koszty instalacji i utrzymania: Choć turbiny pływające eliminują potrzebę drogich fundamentów, koszty związane z budową, transportem i instalacją pływających platform są nadal wysokie. Konserwacja na otwartym morzu również wiąże się z dodatkowymi wyzwaniami logistycznymi i kosztami.

- Wpływ na ekosystemy morskie: Instalacja turbin pływających może wpływać na lokalne ekosystemy morskie, zarówno podczas budowy, jak i eksploatacji. Konieczne są szczegółowe badania i oceny oddziaływania na środowisko, aby zminimalizować negatywne skutki.

- Integracja z siecią energetyczną: Transport energii z turbin pływających do lądowych sieci energetycznych wymaga

zaawansowanych rozwiązań w zakresie kabli podmorskich i technologii przesyłowych.

Przyszłość turbin pływających wydaje się obiecująca, zwłaszcza w kontekście globalnych dążeń do zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii. Dalsze badania i innowacje technologiczne mogą przyczynić się do obniżenia kosztów i zwiększenia efektywności tych systemów. Rozwój standardów i regulacji może również wspierać ich szersze wdrożenie i zapewnić zrównoważony rozwój energetyki morskiej.

Turbiny pływające stanowią kluczowy element przyszłości energetyki wiatrowej na morzu, oferując dostęp do ogromnych zasobów wiatrowych na głębokich wodach. Pomimo wyzwań technicznych i środowiskowych, ich potencjalne korzyści są znaczące i mogą przyczynić się do globalnej transformacji energetycznej w kierunku bardziej zrównoważonego i efektywnego wykorzystania zasobów naturalnych.⁸

2.3. Innowacje w zarządzaniu i utrzymaniu farm wiatrowych

Rozwój zaawansowanych systemów zarządzania farmami wiatrowymi, które wykorzystują sztuczną inteligencję (AI) i analizę dużych zbiorów danych (big data), otwiera nowe możliwości optymalizacji produkcji energii oraz przewidywania i planowania konserwacji. W niniejszym rozdziale omówimy najnowsze innowacje w tej dziedzinie, które znacząco wpływają na efektywność i niezawodność farm wiatrowych.

⁸ A Review of Recent Advancements in Offshore Wind Turbine Technology, Taimoor Asim, Sheikh Zahidul Islam, Arman Hemmati, Muhammad Saif Ullah Khalid, *Energies*, 2022 nr 15

Zaawansowane systemy zarządzania farmami wiatrowymi korzystają z AI do analizy ogromnych ilości danych zbieranych z różnych czujników zamontowanych na turbinach. Te czujniki monitorują parametry takie jak prędkość wiatru, wibracje, temperaturę, a także wydajność produkcji energii. AI analizuje te dane w czasie rzeczywistym, co pozwala na szybkie wykrywanie anomalii i potencjalnych problemów zanim staną się one poważnymi awariami.

Jednym z najważniejszych zastosowań AI w zarządzaniu farmami wiatrowymi jest **predykcyjne utrzymanie ruchu**. Dzięki analizie historycznych danych operacyjnych oraz obecnych parametrów pracy, algorytmy AI mogą przewidywać, które komponenty turbin mogą ulec awarii i kiedy należy przeprowadzić konserwację. Pozwala to na planowanie przestoju w najbardziej dogodnych momentach, minimalizując straty produkcji i koszty napraw.

Systemy **monitorowania stanu technicznego (CMS) turbin wiatrowych** wykorzystują zaawansowane techniki analizy wibracji, akustyki i innych parametrów mechanicznych. AI integruje dane z CMS z danymi pogodowymi i operacyjnymi, aby dokładniej ocenić stan techniczny turbin. Dzięki temu możliwe jest wykrywanie niewielkich uszkodzeń lub zużycia komponentów, które mogłyby prowadzić do większych problemów, zanim staną się one krytyczne.

Automatyzacja odgrywa kluczową rolę w poprawie efektywności operacyjnej farm wiatrowych. Wykorzystanie robotów do inspekcji i konserwacji turbin wiatrowych jest jednym z przykładów, jak automatyzacja może zmniejszyć koszty i zwiększyć bezpieczeństwo pracy. Drony wyposażone w kamery i czujniki mogą przeprowadzać inspekcje wizualne turbin, identyfikując

uszkodzenia łopat czy korozję, co znacznie przyspiesza proces diagnostyki i napraw.

AI i big data są również wykorzystywane do optymalizacji produkcji energii. Zaawansowane algorytmy mogą analizować warunki wiatrowe i operacyjne w czasie rzeczywistym, dostosowując ustawienia turbin, aby maksymalizować wydajność produkcji energii. Optymalizacja ta obejmuje nie tylko indywidualne turbiny, ale również całą farmę wiatrową, zapewniając, że wszystkie jednostki pracują w najbardziej efektywny sposób.

Kolejną innowacją jest integracja farm wiatrowych z **inteligentnymi sieciami energetycznymi (smart grids)**. Dzięki temu możliwe jest lepsze zarządzanie przepływem energii, redukcja strat przesyłowych oraz zwiększenie stabilności sieci. AI wspomaga także balansowanie obciążenia w czasie rzeczywistym, co jest kluczowe dla utrzymania stabilności sieci energetycznych przy wysokim udziale OZE.

Przyszłość zarządzania i utrzymania farm wiatrowych leży w dalszym **rozwój AI i technologii big data**. Prace nad coraz bardziej zaawansowanymi algorytmami analitycznymi oraz ich integracją z systemami zarządzania energią będą kluczowe dla dalszego zwiększania efektywności i niezawodności farm wiatrowych. Ponadto, rozwój autonomicznych robotów i dronów do inspekcji i napraw będzie kontynuowany, aby jeszcze bardziej zwiększyć bezpieczeństwo i efektywność operacyjną.

Innowacje w zarządzaniu i utrzymaniu farm wiatrowych przyczyniają się do znacznego zwiększenia ich efektywności, niezawodności i opłacalności. Wykorzystanie AI, analizy danych oraz automatyzacji procesów operacyjnych to kluczowe elementy przyszłości energetyki wiatrowej, które pozwalają na pełne wykorzystanie potencjału odnawialnych źródeł energii.

2.4. Kierunki rozwoju i przyszłość energetyki wiatrowej

Energetyka wiatrowa jako jeden z najbardziej dynamicznie rozwijających się sektorów odnawialnych źródeł energii, stoi przed szeregiem innowacyjnych perspektyw mających na celu dalsze zwiększanie wydajności i obniżanie kosztów. Prezentując przyszłe kierunki rozwoju technologii wiatrowych, w tym potencjalnych innowacji w materiałach i metodach produkcji, warto zwrócić uwagę, iż są one związane z dążeniem do uzyskania jeszcze większej wydajności i zmniejszenia kosztów.

Rozwój nowych materiałów jest kluczowy dla zwiększenia wydajności i trwałości turbin wiatrowych. W ostatnich latach badania skupiły się na opracowaniu lekkich, ale wytrzymałych materiałów kompozytowych, które mogą wytrzymać ekstremalne warunki atmosferyczne i mechaniczne obciążenia charakterystyczne dla dużych wysokości i morskich instalacji. Zaawansowane kompozyty, w tym te wzmocnione włóknami węglowymi i szklanymi, oferują nie tylko lepszą wydajność, ale również zwiększoną odporność na zmęczenie i korozję.

Dodatkowo, trwają badania nad samooczyszczającymi się i antyadhezyjnymi powłokami, które mogą zminimalizować potrzebę konserwacji łopat turbin, co jest szczególnie ważne w przypadku turbin morskich, gdzie dostępność i koszty serwisu są znacznie wyższe.

Jednocześnie, **innowacje w metodach produkcji turbin wiatrowych** mają ogromny potencjał w obniżaniu kosztów i skracaniu czasu potrzebnego na instalację. Technologie takie jak druk 3D coraz częściej znajdują zastosowanie w produkcji skomplikowanych komponentów turbin, umożliwiając precyzyjne wykonanie elementów przy jednoczesnym zmniejszeniu

odpadów produkcyjnych. Dodatkowo, automatyzacja i robotyzacja linii montażowych nie tylko przyspieszają produkcję, ale również zwiększają jej powtarzalność i jakość.

Przyszłość energetyki wiatrowej zależeć będzie również od **optymalizacji projektów turbin**. W miarę rosnącego zapotrzebowania na większą moc z pojedynczej instalacji, rozwijane są projekty turbin o coraz większych średnicach wirników i większej mocy znamionowej. Inżynierowie poszukują również sposobów na zwiększenie efektywności operacyjnej turbin poprzez zaawansowane systemy sterowania i adaptacyjne algorytmy zarządzania pracą turbin, które mogą w czasie rzeczywistym dostosowywać parametry pracy do zmieniających się warunków wiatrowych.

Ostatnie, ale nie mniej ważne, jest **dążenie do zrównoważonego rozwoju**. Przemysł turbin wiatrowych koncentruje się nie tylko na efektywności technicznej, ale także na minimalizacji wpływu na środowisko naturalne i społeczności lokalne. Badania koncentrują się na zmniejszeniu hałasu, wpływu na ptaki i krajobraz, a także na poprawie możliwości recyklingu komponentów turbin po zakończeniu ich życia operacyjnego⁹.

Zakończenie

W miarę zbliżania się do końca naszej eksploracji innowacji w odnawialnych źródłach energii, staje się jasne, że technologie fotowoltaiczne, wiatrowe oraz nowoczesne metody magazynowania energii mają kluczowe znaczenie dla przyszłości globalnej energetyki. Wyzwania, które stoją przed nami w kontekście

⁹ Linking scientific knowledge and technological change: Lessons from wind turbine evolution and innovation, [Juliana Subtil Lacerda](#), Energy Research & Social Science, 2019 nr 50

zmian klimatycznych oraz rosnącego zapotrzebowania na energię, wymagają odważnych i innowacyjnych rozwiązań. Artykuł ten podkreślił, jak technologiczne przełomy w tych obszarach mogą przyczynić się do stworzenia bardziej zrównoważonego i efektywnego systemu energetycznego, który będzie w stanie sprostać współczesnym i przyszłym wyzwaniom.

Innowacje w technologiach fotowoltaicznych, takie jak rozwój ogniw perowskitowych czy technologii tandemowych, nie tylko zwiększają efektywność przetwarzania energii słonecznej, ale również otwierają nowe możliwości jej wykorzystania w różnorodnych aplikacjach, od małych instalacji domowych po wielkoskalowe farmy słoneczne. Z kolei postępy w technologii turbin wiatrowych, zarówno lądowych, jak i morskich, zwiastują era większej dostępności i efektywności energetyki wiatrowej, co może znacząco przyczynić się do zwiększenia udziału tej formy energii w globalnym miksie energetycznym.

Jednakże, aby w pełni wykorzystać potencjał generowany przez te technologie, kluczowe okazuje się rozwijanie i implementacja zaawansowanych systemów magazynowania energii. Rozwiązania takie jak nowoczesne baterie, technologie magazynowania ciepła czy innowacje w zakresie magazynowania mechanicznego i hydroelektrycznego, są niezbędne dla zapewnienia ciągłości dostaw energii oraz stabilności i bezpieczeństwa sieci energetycznych.

Podsumowując, wskazano wiele możliwości, jakie otwierają przed nami innowacje w OZE, ale również na wyzwania, które musimy jeszcze pokonać. Współpraca międzynarodowa, inwestycje w badania i rozwój, a także wsparcie polityczne i społeczne będą decydujące dla przyspieszenia transformacji energetycznej. Nie ma wątpliwości, że przyszłość energetyki leży w odnawialnych źródłach energii, a innowacje, które

omówiliśmy, odgrywają w tej transformacji centralną rolę. Dążenie do zrównoważonego rozwoju wymaga nieustannego zaangażowania w poszukiwanie nowych technologii, które nie tylko minimalizują negatywny wpływ na środowisko, ale także oferują niezawodne i ekonomiczne źródła energii dla przyszłych pokoleń.

Nowoczesne metody magazynowania energii: klucz do efektywnego wykorzystania OZE

Andrzej Habryń
Air Storage

Streszczenie: Nowoczesne metody magazynowania energii, takie jak baterie litowo-jonowe, magazynowanie ciepłne, magazynowanie energii mechanicznej i magazynowanie w sprężonym powietrzu, odgrywają kluczową rolę w integrowaniu odnawialnych źródeł energii z istniejącymi sieciami energetycznymi. Postępy w tych technologiach umożliwiają efektywne zarządzanie niestabilną produkcją energii z OZE i zwiększają niezawodność systemów energetycznych. Dalszy rozwój i integracja tych systemów są kluczowe dla transformacji globalnego sektora energetycznego w kierunku zrównoważonej energetyki. Przykłady udanych projektów na całym świecie, takie jak Hornsdale Power Reserve w Australii czy inicjatywa Energiewende w Niemczech, pokazują, że nowoczesne metody magazynowania energii mogą skutecznie wspierać zwiększenie udziału OZE, redukcję emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego. Dalsze inwestycje w badania, rozwój technologiczny, modernizację sieci energetycznych oraz wsparcie polityczne są kluczowe dla dalszego rozwoju i wdrożenia tych technologii na szeroką skalę.

Wstęp

Integracja odnawialnych źródeł energii (OZE) z tradycyjnymi sieciami energetycznymi stanowi jedno z najważniejszych wyzwań współczesnej energetyki. Charakteryzująca się zmiennością produkcja energii ze źródeł takich jak słońce i wiatr wymaga zaawansowanych rozwiązań, które umożliwią jej stabilne

dostarczanie do konsumentów. Kluczową rolę w tym procesie odgrywają nowoczesne metody magazynowania energii, które mogą skutecznie zarządzać niestabilną produkcją i zwiększać niezawodność sieci energetycznych.

W ciągu ostatnich kilku dekad, technologie magazynowania energii przeszły znaczną ewolucję, otwierając nowe możliwości dla efektywnego wykorzystania OZE. Postępy w dziedzinie baterii litowo-jonowych i przepływowych, a także innowacyjne podejścia do magazynowania cieplnego, mechanicznego oraz opartego na sprężonym powietrzu, stają się kluczowymi elementami nowoczesnych systemów energetycznych.

Baterie litowo-jonowe stały się standardem w magazynowaniu energii, ze względu na ich wysoką gęstość energetyczną, długą żywotność i szybkość ładowania. Zastosowanie tych baterii w skali przemysłowej pozwala na skuteczne zarządzanie nadwyżkami energii produkowanej przez instalacje fotowoltaiczne i wiatrowe. **Baterie przepływowe**, takie jak baterie wanadowe, oferują unikalne możliwości skalowania i są szczególnie przydatne w dużych systemach magazynowania energii, gdzie elastyczność i długotrwała stabilność są kluczowe.

Innowacje w **magazynowaniu cieplnym** wykorzystują nadmiar energii do przechowywania ciepła, które może być później używane do produkcji energii elektrycznej lub ogrzewania. Techniki takie jak magazynowanie w soli topnej czy zaawansowane systemy termochemiczne otwierają nowe perspektywy w zarządzaniu energią. **Magazynowanie mechaniczne**, obejmujące metody takie jak koła zamachowe (flywheels) czy magazynowanie energii w sprężonym powietrzu (CAES), oferują dodatkowe możliwości, zwłaszcza w kontekście krótkoterminowego bilansowania mocy.

Rozwój tych technologii jest nie tylko odpowiedzią na techniczne wyzwania związane z integracją OZE, ale także otwiera nowe możliwości ekonomiczne i ekologiczne. Efektywne magazynowanie energii pozwala na lepsze wykorzystanie zasobów odnawialnych, redukcję emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększenie elastyczności i bezpieczeństwa dostaw energii.

W niniejszym artykule zostaną omówione najnowsze osiągnięcia w dziedzinie magazynowania energii, ze szczególnym uwzględnieniem technologii baterii litowo-jonowych i przepływowych, magazynowania cieplnego oraz mechanicznego. Przedstawione zostaną także perspektywy dalszego rozwoju tych technologii oraz ich potencjalny wpływ na przyszłość zrównoważonej energetyki.

1. Rozwój Technologii Baterii

Rozwój zaawansowanych technologii baterii odgrywa kluczową rolę w nowoczesnych systemach magazynowania energii, umożliwiając efektywne wykorzystanie odnawialnych źródeł energii i stabilizację sieci energetycznych. W tym rozdziale omówimy postępy w technologii baterii litowo-jonowych, ich zalety i ograniczenia, a także najnowsze innowacje w bateriach opartych na nowych chemiach, takich jak litowo-siarkowe i sodowo-jonowe. Szczególną uwagę poświęcimy również bateriom przepływowym, które oferują unikalne możliwości dla długotrwałego magazynowania energii na dużą skalę.

Baterie litowo-jonowe (Li-ion) stały się standardem w wielu zastosowaniach, od elektroniki konsumenckiej po systemy magazynowania energii odnawialnej. Ich popularność wynika z kilku kluczowych zalet, takich jak wysoka gęstość energetyczna, długa żywotność, niski efekt pamięci i szybkość

ładowania. Baterie litowo-jonowe pozwalają na magazynowanie dużej ilości energii w małej objętości, co jest kluczowe dla przenośnych urządzeń i pojazdów elektrycznych. Ponadto, mogą wytrzymać wiele cykli ładowania i rozładowywania bez znacznej utraty pojemności, a ich niski efekt pamięci oznacza, że mogą być ładowane i rozładowywane w dowolnym momencie bez wpływu na ich pojemność. Minimalne samorozładowanie podczas przechowywania dodatkowo zwiększa ich efektywność.

Jednak baterie litowo-jonowe mają również swoje ograniczenia. Wysokie koszty produkcji, zwłaszcza związane z materiałami katodowymi, takimi jak kobalt, stanowią wyzwanie ekonomiczne. Bezpieczeństwo jest kolejnym istotnym problemem, ponieważ istnieje ryzyko przegrzania i wybuchu w przypadku uszkodzenia lub niewłaściwego użytkowania. Problemy związane z recyklingiem i utylizacją toksycznych materiałów także wymagają uwagi. Pomimo tych wyzwań, najnowsze innowacje w technologii litowo-jonowej koncentrują się na nowych materiałach katodowych i anodowych, takich jak tlenki niklu, manganu i kobaltu (NMC), które oferują wyższą gęstość energetyczną i lepszą stabilność. Dodatkowo, prace nad stałymi elektrolitami mają na celu zwiększenie bezpieczeństwa baterii, eliminując ryzyko wycieku elektrolitu oraz redukując ryzyko przegrzania. Innowacje w procesach produkcji, takie jak powlekanie cienkowarstwowe i zaawansowane techniki montażu, mogą obniżyć koszty i zwiększyć wydajność produkcji baterii Li-ion.

Baterie litowo-siarkowe (Li-S) stanowią obiecującą alternatywę dla tradycyjnych baterii litowo-jonowych dzięki wyższej teoretycznej pojemności i niższym kosztom materiałów. Siarka ma wyższą pojemność niż tradycyjne materiały katodowe, co pozwala na magazynowanie większej ilości energii. Ponadto,

siarka jest tańsza i bardziej obfita niż kobalt i inne metale stosowane w bateriach Li-ion. Jednak baterie litowo-siarkowe mają krótszy cykl życia ze względu na problemy z stabilnością i efektywnością cykliczną, a także z rozpuszczaniem się polisulfidów w elektrolicie, co prowadzi do strat materiału aktywnego. Innowacje w tej dziedzinie obejmują nowe metody stabilizacji katod siarkowych, takie jak powlekanie nanomateriałami oraz rozwój elektrolitów, które mogą zminimalizować efekt polysulfidowy i poprawić stabilność cykliczną.

Baterie sodowo-jonowe (Na-ion) są rozwijane jako alternatywa dla baterii litowo-jonowych, ze względu na większą obfitość i niższy koszt sodu w porównaniu z litem. Sód jest znacznie bardziej powszechny i tańszy niż lit, co czyni baterie sodowo-jonowe bardziej ekonomiczną opcją. Ponadto, mogą być bezpieczniejsze, z mniejszym ryzykiem przegrzania. Jednak baterie sodowo-jonowe mają niższą gęstość energetyczną w porównaniu do baterii litowo-jonowych, a ich żywotność i wydajność wymagają dalszej optymalizacji. Badania koncentrują się na nowych materiałach elektrodowych, takich jak tlenki metali i fosforany, oraz na elektrolitach o wyższej stabilności chemicznej i elektrochemicznej.

Baterie przepływowe różnią się od tradycyjnych baterii tym, że ich energia jest magazynowana w postaci elektrolitu, który przepływa przez komórki elektrochemiczne. Najbardziej znane są baterie przepływowe wanadowe (VRFB). Baterie przepływowe oferują łatwość skalowania systemów do dużych rozmiarów, co czyni je idealnymi do magazynowania energii na dużą skalę. Mają długi czas życia, z minimalną degradacją po wielu cyklach ładowania i rozładowywania, oraz możliwość niezależnej skalowalności mocy i pojemności, co pozwala na dostosowanie do specyficznych potrzeb systemów energetycznych. Jednak wysokie koszty początkowe związane z materiałami

i infrastrukturą oraz niższa gęstość energetyczna w porównaniu do baterii litowo-jonowych stanowią wyzwania.

Postępy i innowacje w bateriach przepływowymi obejmują badania nad alternatywnymi elektrolitami, które mogą zwiększyć gęstość energetyczną i obniżyć koszty, takie jak elektrolity na bazie bromu i cynku. Innowacje w membranach, które separują elektrolity, mogą poprawić wydajność i żywotność tych baterii. Ponadto, rozwój systemów hybrydowych, które integrują baterie przepływowe z innymi technologiami magazynowania energii, może zwiększyć elastyczność i efektywność systemów energetycznych.

Podsumowując, zaawansowane technologie baterii są kluczowym elementem nowoczesnych systemów magazynowania energii. Baterie litowo-jonowe, pomimo swoich zalet, mają swoje ograniczenia, które nowe chemie, takie jak litowo-siarkowe i sodowo-jonowe, mogą potencjalnie przezwyciężyć. Baterie przepływowe oferują unikalne możliwości dla długotrwałego magazynowania energii na dużą skalę, choć nadal istnieją wyzwania związane z kosztami i gęstością energetyczną. Ciągły rozwój tych technologii będzie niezbędny do pełnego wykorzystania potencjału odnawialnych źródeł energii i zapewnienia stabilności i niezawodności przyszłych systemów energetycznych.¹⁰

¹⁰ A Comprehensive Review of the Integration of Battery Energy Storage Systems into Distribution Networks, Marco Stecca; Laura Ramirez Elizondo, Thiago Batista Soeiro; Pavol Bauer; Peter Palensky, IEEE Open Journal of the Industrial Electronics Society, 2020 nr 1

2. Alternatywne metody magazynowania energii

Magazynowanie energii jest kluczowym elementem umożliwiającym integrację odnawialnych źródeł energii (OZE) z tradycyjnymi sieciami energetycznymi. Oprócz baterii, istnieje wiele alternatywnych metod magazynowania energii, które mogą oferować znaczące korzyści w specyficznych zastosowaniach lub środowiskach. W tym rozdziale przyjrzymy się technologiom takim jak magazynowanie energii mechanicznej, magazynowanie ciepłe oraz innowacyjnym rozwiązaniom, takim jak magazynowanie energii w sprężonym powietrzu (CAES) i magazynowanie hydroelektryczne (pumped hydro storage).

Magazynowanie energii mechanicznej polega na przechowywaniu energii w postaci energii kinetycznej lub potencjalnej, która może być później przekształcona w energię elektryczną.

Flywheels, czyli koła zamachowe, są jedną z najbardziej zaawansowanych form magazynowania energii mechanicznej. Energia jest magazynowana w postaci energii kinetycznej poprzez obracające się masy. Koło zamachowe jest przyspieszane do bardzo wysokich prędkości przez silnik elektryczny, który działa jako generator podczas rozładowywania.

Koła zamachowe charakteryzują się wysoką gęstością mocy, szybkim czasem odpowiedzi i długą żywotnością. Są szczególnie użyteczne w aplikacjach wymagających krótkoterminowego magazynowania energii, takich jak stabilizacja sieci energetycznych oraz zasilanie awaryjne. Ich głównym ograniczeniem jest relatywnie niska gęstość energetyczna, co sprawia, że nie są idealne do długoterminowego magazynowania energii.

Magazynowanie ciepłe polega na przechowywaniu energii w postaci ciepła, które może być później przekształcone w energię elektryczną lub wykorzystane bezpośrednio do celów grzewczych.

Jedną z najbardziej efektywnych metod magazynowania ciepłego jest wykorzystanie **solii topnych**. Sól jest podgrzewana do wysokich temperatur i przechowywana w zbiornikach izolacyjnych. Gdy potrzebna jest energia, ciepło z soli topnych jest wykorzystywane do produkcji pary, która napędza turbinę generującą energię elektryczną.

Sole topne mają wysoką pojemność cieplną i mogą magazynować energię przez długi czas z minimalnymi stratami. Są one szczególnie użyteczne w połączeniu z elektrowniami słonecznymi koncentrującymi energię (CSP), gdzie nadmiar ciepła z dnia może być wykorzystany do produkcji energii w nocy.

Kamienie mogą być również wykorzystywane jako medium do magazynowania ciepłego. Energia jest przechowywana poprzez podgrzewanie kamieni za pomocą nadmiaru energii elektrycznej, która jest później wykorzystywana do produkcji ciepła lub energii elektrycznej.

Systemy magazynowania ciepłego za pomocą kamieni są stosunkowo proste i tanie, jednak ich efektywność jest niższa w porównaniu do soli topnych. Są one często stosowane w małych instalacjach oraz w systemach grzewczych.

Magazynowanie energii w sprężonym powietrzu (Compressed Air Energy Storage, CAES) polega na przechowywaniu energii poprzez sprężanie powietrza, które jest magazynowane w podziemnych kavernach, zbiornikach lub rurach. Gdy energia jest potrzebna, sprężone powietrze jest uwalniane i rozprężane w turbinie, generując energię elektryczną.

CAES charakteryzuje się dużą pojemnością magazynowania i długim czasem przechowywania energii, co czyni go odpowiednim do długoterminowego magazynowania energii. Jest również stosunkowo efektywny i może być używany do balansowania obciążenia sieci oraz magazynowania nadmiaru energii z OZE. Głównymi wyzwaniami są koszty budowy infrastruktury oraz potrzeba odpowiednich warunków geologicznych do przechowywania sprężonego powietrza.

Magazynowanie hydroelektryczne (Pumped Hydro Storage) jest jedną z najstarszych i najbardziej rozpowszechnionych metod magazynowania energii. Polega na pompowaniu wody z niższego zbiornika do wyższego zbiornika przy użyciu nadmiaru energii elektrycznej. Gdy energia jest potrzebna, woda jest spuszczana z powrotem do niższego zbiornika przez turbiny, generując energię elektryczną.

Magazynowanie hydroelektryczne ma bardzo wysoką sprawność (około 70-85%) i dużą pojemność magazynowania, co czyni je idealnym do długoterminowego magazynowania energii i stabilizacji sieci energetycznych. Wymaga jednak odpowiednich warunków topograficznych oraz dużych inwestycji infrastrukturalnych, co ogranicza możliwości jego zastosowania.

Alternatywne metody magazynowania energii oferują różnorodne korzyści w zależności od specyficznych zastosowań i środowisk. Magazynowanie energii mechanicznej, cieplnej oraz w sprężonym powietrzu i wodzie zapewnia różne sposoby na zarządzanie niestabilną produkcją energii z OZE oraz zwiększanie niezawodności sieci energetycznych. Każda z tych technologii ma swoje unikalne zalety i wyzwania, które muszą być uwzględnione przy projektowaniu systemów magazynowania energii dostosowanych do konkretnych potrzeb i warunków.

Rozwój i optymalizacja tych technologii będą kluczowe dla przyszłości zrównoważonej energetyki.¹¹

3. Najnowsze wyniki prac badawczo-rozwojowych w zakresie alternatywnych metod magazynowania energii

Rozwój technologii magazynowania energii jest kluczowy dla zrównoważonego wykorzystania odnawialnych źródeł energii (OZE). Ostatnie badania w tej dziedzinie koncentrują się na różnych metodach magazynowania energii, w tym magazynowaniu mechanicznym, cieplnym oraz sprężonym powietrzu. Poniżej przedstawiam najnowsze osiągnięcia i innowacje w tych technologiach.

Magazynowanie Energii Mechanicznej - Koła Zamachowe (Flywheels): Nowoczesne koła zamachowe charakteryzują się wysoką gęstością mocy i szybkim czasem odpowiedzi, co czyni je idealnymi do krótkoterminowego magazynowania energii i stabilizacji sieci energetycznych. Najnowsze badania skupiają się na poprawie trwałości i wydajności tych systemów poprzez zastosowanie zaawansowanych materiałów kompozytowych oraz technologii magnetycznego lewitowania, które minimalizują straty energii.

Magazynowanie Ciepłe

Sole Topne: Magazynowanie energii za pomocą soli topnych jest szeroko stosowane w elektrowniach słonecznych koncentrujących energię (CSP). Nowe badania koncentrują się na zwiększeniu wydajności poprzez optymalizację składu soli oraz rozwój bardziej efektywnych wymienników ciepła. Technologia ta pozwala na długotrwałe magazynowanie energii cieplej

¹¹ Critical review of energy storage systems, A.G. Olabi, C. Onumaegbu, Tabbi Wilberforce b, Mohamad Ramadan, Mohammad Ali Abdelkareem, Abdul Hai Al – Alami, Energy, 2021 nr 214

z minimalnymi stratami, co jest kluczowe dla zapewnienia ciągłości dostaw energii w nocy lub w okresach niskiego nasłonecznienia.

Kamienie: Prostsze systemy magazynowania ciepłego z wykorzystaniem podgrzewanych kamieni są również rozwijane, głównie w kontekście lokalnych systemów grzewczych. Innowacje w tej dziedzinie obejmują zastosowanie nowych materiałów o wyższej pojemności cieplnej oraz rozwój bardziej efektywnych systemów izolacji termicznej.

Magazynowanie energii w sprężonym powietrzu (CAES)

Sprężone powietrze (Compressed Air Energy Storage, CAES) zyskuje na popularności jako metoda magazynowania energii na dużą skalę. Najnowsze badania koncentrują się na poprawie wydajności termicznej i integracji z innymi systemami magazynowania energii.

Adiabatyczne CAES: Adiabatyczne systemy CAES przechowują ciepło generowane podczas sprężania powietrza i wykorzystują je podczas jego rozprężania, co znacznie zwiększa wydajność systemu. Innowacje w tej dziedzinie obejmują rozwój zaawansowanych wymienników ciepła oraz integrację z systemami magazynowania ciepłego, co pozwala na bardziej efektywne zarządzanie energią.

Integracja z Systemami Chłodzenia i Ogrzewania: Nowe badania wykazują, że integracja systemów CAES z systemami ogrzewania i chłodzenia może znacząco poprawić ich efektywność i funkcjonalność. Systemy te mogą jednocześnie

magazynować energię elektryczną oraz dostarczać ciepło lub chłód, co jest szczególnie korzystne w zastosowaniach przemysłowych¹².

Magazynowanie Hydroelektryczne (Pumped Hydro Storage)

Magazynowanie hydroelektryczne pozostaje jedną z najbardziej efektywnych metod magazynowania energii na dużą skalę. Najnowsze badania koncentrują się na optymalizacji istniejących systemów oraz rozwoju nowych, bardziej elastycznych rozwiązań.

Magazynowanie w Kaskadach: Technologia ta polega na wykorzystaniu wielu poziomów zbiorników wodnych do zwiększenia pojemności magazynowania oraz poprawy wydajności systemu. Innowacje w tej dziedzinie obejmują rozwój zaawansowanych systemów zarządzania wodą oraz integrację z systemami sterowania siecią energetyczną.³

Alternatywne metody magazynowania energii oferują różnorodne korzyści w zależności od specyficznych zastosowań i warunków środowiskowych. Badania i rozwój w zakresie magazynowania mechanicznego, cieplnego oraz sprężonego powietrza są kluczowe dla przyszłości zrównoważonej energetyki, umożliwiając bardziej efektywne zarządzanie niestabilną produkcją energii z OZE oraz zwiększenie niezawodności sieci energetycznych.

¹² Compressed Air Energy Storage—An Overview of Research Trends and Gaps through a Bibliometric Analysis, Emiliano Borri, Alessio Tafone, Gabriele Comodi, Alessandro Romagnoli, Luisa F. Cabeza, *Energies*, 2022 nr 15

4. Integracja systemów magazynowania z siecią energetyczną

Integracja systemów magazynowania energii z istniejącymi sieciami energetycznymi jest kluczowym aspektem współczesnej transformacji energetycznej. W miarę wzrostu udziału odnawialnych źródeł energii (OZE) w miksie energetycznym, zarządzanie niestabilnością ich produkcji staje się coraz większym wyzwaniem. W tym rozdziale omówimy wyzwania i możliwości integracji systemów magazynowania energii z sieciami energetycznymi oraz przedstawimy zaawansowane strategie i technologie, takie jak inteligentne sieci energetyczne (smart grids) oraz systemy zarządzania energią (energy management systems).

Integracja systemów magazynowania energii z sieciami energetycznymi wiąże się z wieloma wyzwaniami technicznymi, ekonomicznymi i regulacyjnymi.

Jednym z głównych technicznych wyzwań jest zarządzanie niestabilnością produkcji energii z OZE, takich jak energia słoneczna i wiatrowa. Produkcja energii z tych źródeł jest zależna od warunków pogodowych, co prowadzi do dużych wahań w dostarczanej mocy. Systemy magazynowania energii muszą być zdolne do szybkiego reagowania na zmiany w produkcji energii oraz jej zapotrzebowaniu.

Innym wyzwaniem jest integracja różnych technologii magazynowania energii w spójnym systemie. Różne technologie magazynowania, takie jak baterie, magazynowanie cieplne, sprężone powietrze i hydroelektryczne magazynowanie energii, mają różne charakterystyki operacyjne i wymagania techniczne. Koordynacja tych systemów w celu optymalizacji ich działania jest

skomplikowana i wymaga zaawansowanych systemów zarządzania.

Koszt wdrożenia systemów magazynowania energii jest kolejnym znaczącym wyzwaniem. Wysokie koszty inwestycji początkowych, związane z budową infrastruktury oraz zakupem i instalacją technologii magazynowania, mogą stanowić barierę dla ich szerokiego zastosowania. Dodatkowo, istnieją koszty operacyjne i konserwacyjne, które muszą być uwzględnione w analizach ekonomicznych.

Ramy regulacyjne i polityczne również odgrywają kluczową rolę w integracji systemów magazynowania energii. Przepisy dotyczące magazynowania energii, taryf energetycznych, a także regulacje dotyczące integracji z siecią energetyczną muszą być dostosowane do nowych technologii i potrzeb rynku. Brak odpowiednich regulacji może hamować rozwój i wdrażanie innowacyjnych systemów magazynowania energii.

Mimo licznych wyzwań, istnieje wiele **możliwości i strategii, które mogą wspierać efektywną integrację systemów magazynowania energii z sieciami energetycznymi.**

Inteligentne sieci energetyczne (Smart Grids) są kluczową technologią umożliwiającą efektywną integrację systemów magazynowania energii z siecią. Smart grids wykorzystują zaawansowane technologie informacyjne i komunikacyjne do monitorowania i zarządzania przepływem energii w czasie rzeczywistym. Dzięki temu możliwe jest dynamiczne zarządzanie zarówno podażą, jak i popytem na energię, co zwiększa stabilność i niezawodność sieci.

Inteligentne sieci energetyczne umożliwiają również integrację różnych źródeł energii, zarówno odnawialnych, jak i konwencjonalnych, oraz optymalizację ich wykorzystania.

W połączeniu z systemami magazynowania energii, smart grids mogą znacząco zmniejszyć wahania w dostawach energii i zwiększyć efektywność jej wykorzystania.

Systemy zarządzania energią (Energy Management Systems - EMS) są niezbędne do efektywnej integracji systemów magazynowania energii z siecią. EMS monitorują i kontrolują przepływ energii między magazynami energii a siecią, optymalizując ładowanie i rozładowywanie magazynów w zależności od bieżących warunków operacyjnych i zapotrzebowania na energię.

Zaawansowane systemy zarządzania energią wykorzystują algorytmy sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego do prognozowania zapotrzebowania na energię oraz produkcji z OZE. Dzięki temu możliwe jest bardziej precyzyjne planowanie i zarządzanie zasobami energii, co prowadzi do zwiększenia efektywności i redukcji kosztów operacyjnych.

Integracja systemów magazynowania energii z istniejącą infrastrukturą sieciową wymaga również inwestycji w modernizację sieci przesyłowych i dystrybucyjnych. Wymaga to zastosowania nowoczesnych technologii, takich jak inteligentne przekształtniki energii, które mogą zarządzać przepływem energii między różnymi magazynami a siecią, zapewniając stabilność i niezawodność dostaw.

Odpowiednie ramy regulacyjne i polityki wspierające są kluczowe dla sukcesu integracji systemów magazynowania energii. Rządy i organy regulacyjne muszą wprowadzać przepisy i inicjatywy, które wspierają inwestycje w technologie magazynowania energii oraz ich integrację z sieciami energetycznymi. Polityki wspierające mogą obejmować subsydia, ulgi

podatkowe oraz programy badawczo-rozwojowe, które promują innowacje w dziedzinie magazynowania energii.

Warto zaprezentować przykłady zastosowań, stanowiące dobre praktyki integracji systemów magazynowania z siecią energetyczną.

Integracja w projektach OZE, w ramach, których projekty farm wiatrowych i słonecznych często wykorzystują systemy magazynowania energii do zarządzania niestabilnością produkcji. Na przykład, farmy wiatrowe mogą magazynować nadmiar energii w bateriach litowo-jonowych lub systemach CAES, które mogą być później wykorzystane, gdy produkcja spada lub zapotrzebowanie rośnie.

W miastach inteligentne sieci energetyczne mogą integrować systemy magazynowania energii z infrastrukturą miejską, taką jak budynki komercyjne i mieszkalne, stacje ładowania pojazdów elektrycznych oraz systemy oświetlenia ulicznego. Przykłady zastosowań obejmują inteligentne przekształtniki energii oraz zaawansowane systemy zarządzania, które optymalizują zużycie i magazynowanie energii w zależności od bieżących warunków operacyjnych i prognozowanego zapotrzebowania.

Warto również przyjrzeć się **studiom przypadków**, które ilustrują sukcesy integracji systemów magazynowania energii z sieciami energetycznymi. Na przykład, w Niemczech projekt "Energiewende" z powodzeniem integruje duże ilości energii odnawialnej dzięki zaawansowanym systemom magazynowania i zarządzania energią. Podobnie, w Kalifornii rozwój projektów magazynowania energii pomógł w stabilizacji sieci energetycznej i zwiększeniu udziału OZE.

Integracja systemów magazynowania energii z istniejącymi sieciami energetycznymi jest niezbędna dla zrównoważonego

rozwoju i stabilności dostaw energii. Inteligentne sieci energetyczne oraz systemy zarządzania energią odgrywają kluczową rolę w umożliwieniu efektywnej pracy sieci przy dużej penetracji źródeł OZE. Pomimo licznych wyzwań technicznych, ekonomicznych i regulacyjnych, możliwości i strategię integracji systemów magazynowania energii oferują obiecujące rozwiązania dla przyszłości energetyki. Dzięki odpowiednim inwestycjom, innowacjom technologicznym oraz wsparciu regulacyjnemu, możliwe jest stworzenie bardziej efektywnych i niezawodnych systemów energetycznych, które wspierają zrównoważony rozwój i transformację energetyczną¹³.

5. Wpływ magazynowania energii na transformację energetyczną

Magazynowanie energii odgrywa kluczową rolę w globalnej transformacji energetycznej, stanowiąc fundament dla integracji odnawialnych źródeł energii (OZE) i zwiększenia elastyczności systemów energetycznych. Warto podkreślić znaczenie magazynowania energii w kontekście globalnej transformacji energetycznej, jego potencjał do zwiększania udziału OZE w miksie energetycznym oraz jak magazynowanie energii może przyczynić się do redukcji emisji gazów cieplarnianych i zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego.

Transformacja energetyczna odnosi się do przejścia z tradycyjnych, opartych na paliwach kopalnych systemów energetycznych do bardziej zrównoważonych i odnawialnych źródeł energii. Magazynowanie energii jest kluczowym elementem tego procesu, ponieważ umożliwia efektywne zarządzanie

¹³ Energy storage systems: a review, J. Mitali, S. Dhinakaran, A.A. Mohamad, Energy Storage and Saving, 2022 nr 1

niestabilnością produkcji energii z OZE, takich jak energia słoneczna i wiatrowa.

Jednym z głównych wyzwań związanych z OZE jest ich zmienna natura - produkcja energii zależy od warunków pogodowych i pory dnia, co prowadzi do wahań w dostawach energii. Magazynowanie energii pozwala na przechowywanie nadmiaru energii produkowanej w okresach wysokiej produkcji i jej uwalnianie w okresach niskiej produkcji, co umożliwia stabilne dostawy energii niezależnie od warunków zewnętrznych.

Magazynowanie energii ma potencjał do znacznego **zwiększenia udziału OZE w globalnym miksie energetycznym**. Dzięki magazynowaniu energii, nadwyżki produkcji energii z OZE mogą być efektywnie zarządzane, co pozwala na większą penetrację tych źródeł energii w systemie energetycznym.

W krajach o wysokim udziale OZE, takich jak Niemcy i Dania, magazynowanie energii odgrywa kluczową rolę w integracji dużych ilości energii słonecznej i wiatrowej. Systemy magazynowania energii, takie jak baterie litowo-jonowe, magazynowanie ciepłe oraz sprężone powietrze (CAES), są wykorzystywane do balansowania podaży i popytu, co umożliwia stabilne i niezawodne dostawy energii.

Przykładem udanej integracji OZE z magazynowaniem energii jest projekt Hornsdale Power Reserve w Australii, gdzie zastosowano największą na świecie baterię litowo-jonową do stabilizacji sieci energetycznej i zarządzania nadwyżkami produkcji energii z farm wiatrowych. Projekt ten dowiódł, że

magazynowanie energii może znacząco poprawić stabilność sieci i zwiększyć udział OZE w miksie energetycznym¹⁴.

Magazynowanie energii może przyczynić się do znaczącej **redukcji emisji gazów cieplarnianych**, umożliwiając szersze wykorzystanie czystych źródeł energii i zmniejszając zależność od paliw kopalnych. Przechowywanie nadmiaru energii z OZE pozwala na redukcję emisji związanych z produkcją energii w elektrowniach gazowych i węglowych, które są często wykorzystywane jako źródła szczytowe.

Ponadto, systemy magazynowania energii mogą wspierać dekarbonizację sektora transportu, umożliwiając ładowanie pojazdów elektrycznych za pomocą energii pochodzącej z OZE. W połączeniu z inteligentnymi sieciami energetycznymi (smart grids) i systemami zarządzania energią (EMS), magazynowanie energii może przyczynić się do optymalizacji zużycia energii i redukcji emisji w całym systemie energetycznym.

Magazynowanie energii odgrywa również kluczową rolę w **zwiększaniu bezpieczeństwa energetycznego**, zapewniając stabilne dostawy energii w sytuacjach awaryjnych i ekstremalnych warunkach pogodowych. Systemy magazynowania energii mogą działać jako rezerwa energetyczna, która może być szybko uruchomiona w przypadku nagłego wzrostu zapotrzebowania na energię lub przerwy w dostawach z tradycyjnych źródeł.

Integracja systemów magazynowania energii z sieciami energetycznymi pozwala również na bardziej efektywne zarządzanie przepływem energii, co zmniejsza ryzyko przeciążeń i awarii

¹⁴ Compressed air energy storage systems could replace conventional batteries as energy providers, say scientists, University of Sharjah, 2024, <https://techxplore.com/news/2024-02-compressed-air-energy-storage-conventional.html>

sieci. W krajach o wysokim ryzyku naturalnych katastrof, takich jak Japonia i USA, magazynowanie energii jest kluczowym elementem strategii zarządzania ryzykiem i zapewnienia ciągłości dostaw energii.

Warto brać pod uwagę **dobre praktyki wdrażane na świecie**:

Projekt Hornsdale Power Reserve (Australia): Największa na świecie bateria litowo-jonowa, zainstalowana w Południowej Australii, która stabilizuje sieć energetyczną i zarządza nadwyżkami produkcji energii z farm wiatrowych.

Projekt Energiewende (Niemcy): Inicjatywa transformacji energetycznej w Niemczech, która integruje dużą ilość OZE dzięki zaawansowanym systemom magazynowania energii i inteligentnym sieciom energetycznym.

Projekty CAES w USA: Innowacyjne projekty magazynowania energii w sprężonym powietrzu, które zwiększają efektywność i stabilność dostaw energii w różnych stanach USA¹⁵.

Magazynowanie energii odgrywa kluczową rolę w globalnej transformacji energetycznej, umożliwiając większą integrację odnawialnych źródeł energii, redukcję emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego. Dzięki zaawansowanym technologiom magazynowania energii, takim jak baterie, magazynowanie ciepłe i sprężone powietrze, możliwe jest zarządzanie niestabilnością produkcji energii z OZE i optymalizacja jej wykorzystania. Przykłady udanych projektów na całym świecie pokazują, że magazynowanie energii

¹⁵ Energy storage systems in modern grids—Matrix of technologies and applications, Omid Palizban, Kimmo Kauhaniemi, Journal of Energy Storage, 2016 nr 6

może znacząco przyczynić się do zrównoważonego rozwoju i stabilności globalnych systemów energetycznych.

Zakończenie

Nowoczesne metody magazynowania energii odgrywają kluczową rolę w transformacji globalnego sektora energetycznego. Integracja odnawialnych źródeł energii (OZE) z istniejącymi sieciami energetycznymi wiąże się z wieloma wyzwaniami, w tym zmiennością produkcji energii, stabilnością sieci oraz potrzebą zwiększenia elastyczności systemów energetycznych. Magazynowanie energii jest nieodzownym elementem umożliwiającym skuteczne zarządzanie tymi wyzwaniami i maksymalizację korzyści wynikających z OZE.

Technologie takie jak baterie litowo-jonowe, baterie przepływowe, magazynowanie cieplne i magazynowanie energii w sprężonym powietrzu (CAES) oferują różnorodne rozwiązania, które mogą być dostosowane do specyficznych potrzeb i warunków. Zaawansowane strategie integracji, w tym inteligentne sieci energetyczne (smart grids) i systemy zarządzania energią (EMS), umożliwiają dynamiczne zarządzanie produkcją i konsumpcją energii, co przyczynia się do zwiększenia efektywności i niezawodności dostaw energii.

Przykłady udanych projektów z całego świata, takie jak Hornsdale Power Reserve w Australii, inicjatywa Energiewende w Niemczech czy innowacyjne projekty CAES w USA, pokazują, że nowoczesne metody magazynowania energii mogą znacząco zwiększyć udział OZE w miksie energetycznym, przyczyniając się do redukcji emisji gazów cieplarnianych i zwiększenia bezpieczeństwa energetycznego.

Jednak, aby w pełni wykorzystać potencjał magazynowania energii, konieczne są dalsze inwestycje w badania i rozwój,

dostosowanie ram regulacyjnych oraz wsparcie polityczne. Współpraca między rządami, przemysłem i instytucjami badawczymi jest kluczowa dla promowania innowacji i wdrażania zaawansowanych technologii magazynowania energii na szeroką skalę.

Nowoczesne metody magazynowania energii są nie tylko kluczem do efektywnego wykorzystania OZE, ale także fundamentem dla przyszłości zrównoważonej i stabilnej energetyki. Ich rozwój i integracja z sieciami energetycznymi stanowią istotny krok w kierunku osiągnięcia globalnych celów klimatycznych i zapewnienia bezpiecznych, czystych źródeł energii dla przyszłych pokoleń.

Innowacje i wyzwania w branży fotowoltaicznej

Przemysław Zych
Profisolat

Streszczenie: Artykuł omawia rozwój branży fotowoltaicznej w Polsce, która, mimo spowolnienia w 2022 roku z powodu zmian w systemie rozliczeń i wzrostu cen energii, nadal wprowadza innowacje. Przejście na net-billing skomplikowało inwestycje, ale umożliwiło wprowadzenie nowych modeli, takich jak „prosument zbiorowy” i „prosument lokatorski”. Nowe ogniwa typu „N” i „bifacial” oraz moduły „glass-glass” i szkło antyrefleksyjne zwiększają efektywność i trwałość instalacji fotowoltaicznych. Branża musi stawić czoła wyzwaniom, ale rozwój technologii magazynowania energii oraz innowacyjne modele biznesowe, jak „prosument zbiorowy”, stwarzają obiecujące perspektywy dla dalszego rozwoju sektora.

Wstęp

W ostatnich latach branża fotowoltaiczna w Polsce przeżywa dynamiczny rozwój, jednak w 2022 roku doświadczyła wyraźnego spowolnienia. Kluczowym czynnikiem była zmiana systemu rozliczeń dla prosumentów oraz rosnące ceny energii elektrycznej. Mimo to, firmy wdrażające rozwiązania OZE wciąż wprowadzają innowacje, które przyczyniają się do wzrostu efektywności oraz trwałości instalacji fotowoltaicznych.

Zmiany w systemie rozliczeń prosumentów

Jedną z najważniejszych zmian, które wpłynęły na rozwój fotowoltaiki w Polsce, była transformacja systemu rozliczeń z modelu net-meteringu na net-billing. W nowym systemie

prosumenci rozliczani są w ujęciu miesięcznym, co wprowadziło pewne komplikacje dla osób planujących inwestycje w panele fotowoltaiczne. Zmiana ta przyczyniła się do ogólnego spowolnienia w branży, jednak także otworzyła drogę do nowych rozwiązań, takich jak „prosument zbiorowy” oraz „prosument lokatorski”, które mają na celu lepsze dostosowanie oferty do potrzeb rynku.

Innowacje technologiczne w fotowoltaice

W obliczu wyzwań rynkowych, firmy montażowe wprowadzają na rynek szereg innowacji, które mają na celu zwiększenie efektywności oraz trwałości instalacji fotowoltaicznych. Jednym z przykładów są ogniwa typu „N”, charakteryzujące się krótszym procesem produkcji, niższą temperaturą wytwarzania oraz wysoką efektywnością przy niskim nasłonecznieniu. Dzięki bardzo niskiej degradacji oraz najniższemu współczynnikowi temperaturowemu, ogniwa te stanowią przyszłość branży.

Kolejną innowacją są ogniwa typu „bi-facial”, które mogą osiągać nawet 25-30% większą produkcję energii w porównaniu do tradycyjnych ogniw mono-facial. Charakteryzują się one także podwyższoną odpornością na niekorzystne warunki atmosferyczne oraz zwiększoną wydajnością w różnych warunkach środowiskowych.¹⁶

¹⁶ Solar energy technology and its roles in sustainable development, Ali O M Maka, Jamal M Alabid, *Clean Energy*, 2022 nr 6

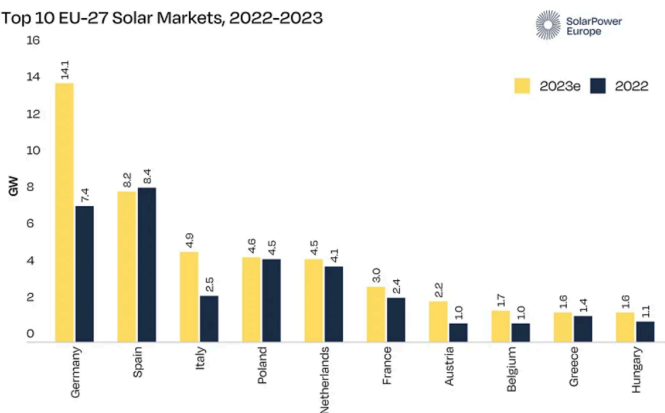
Nowoczesne moduły fotowoltaiczne

W ofercie innowacyjnych firm znajdują się także moduły typu „glass-glass”, które wyróżniają się podwyższoną odpornością na mgłę solną, amoniak oraz ogień. Tego rodzaju moduły charakteryzują się także zwiększoną odpornością na degradację, co czyni je idealnym wyborem dla instalacji w trudnych warunkach.

Dodatkowo, firma wprowadza szkło antyrefleksyjne oraz dyfuzyjne produkowane przez firmę D.A.Glass, które zapewnia podwyższoną przepuszczalność promieni słonecznych oraz samoczyszczące właściwości. Dzięki tym rozwiązaniom, efektywność paneli fotowoltaicznych zostaje znacząco podwyższona, co przekłada się na lepsze wyniki finansowe dla użytkowników.¹⁷

¹⁷ Revolutionizing Solar Energy: The Impact of Artificial Intelligence on Photovoltaic Systems, Ashif Mohammad, Farhana Mahjabeen, International Journal of Multidisciplinary Sciences and Arts, 2023 nr 2

Top 10 EU-27 Solar Markets, 2022-2023



Prognoza wzrostu mocy elektrowni fotowoltaicznych w krajach Unii Europejskiej w okresie 2022-2023 (dane w GW). Źródło: SolarPower Europe

Przyszłość fotowoltaiki

Branża fotowoltaiczna w Polsce, podobnie jak na całym świecie, stoi przed szeregiem wyzwań związanych z dynamicznymi zmianami technologicznymi, regulacyjnymi i rynkowymi. Mimo tych trudności, nowoczesne technologie oferują ogromny potencjał do dalszego rozwoju sektora, co sprawia, że perspektywy dla energetyki słonecznej są bardzo obiecujące.

Jednym z kluczowych wyzwań, przed którymi stoi fotowoltaika, jest zmiana systemu rozliczeń prosumentów. Przejście z modelu net-meteringu na net-billing z jednej strony wymusza na użytkownikach większą ostrożność w planowaniu instalacji, ale z drugiej strony motywuje do wdrażania bardziej zaawansowanych technologii magazynowania energii i zarządzania jej zużyciem. W związku z tym, rozwój technologii związanych z akumulacją energii oraz inteligentnym zarządzaniem jej przepływem staje się priorytetem dla branży.

W tym kontekście firmy wdrażające rozwiązania OZE odgrywają wiodącą rolę w kształtowaniu przyszłości rynku fotowoltaicznego w Polsce. Czołowe przedsiębiorstwa w branży te inwestują w badania i rozwój, dążąc do wprowadzenia na rynek nowoczesnych rozwiązań, które zwiększają efektywność energetyczną i ekonomiczną instalacji fotowoltaicznych. Przykładem mogą być ogniwa typu „N” oraz „bi-facial”, które cechują się wyższą wydajnością w różnych warunkach atmosferycznych oraz zwiększoną odpornością na degradację. Dzięki temu, instalacje fotowoltaiczne stają się bardziej opłacalne i trwałe, co jest kluczowe w kontekście długoterminowego użytkowania.

Konieczny na rynku jest także intensywny rozwój technologii związanych z magazynowaniem energii. W obliczu rosnącego zapotrzebowania na elastyczność w zarządzaniu energią, magazyny energii stają się nieodzownym elementem nowoczesnych instalacji fotowoltaicznych. Pozwalają one na gromadzenie nadwyżek energii produkowanej w szczytowych momentach nasłonecznienia i jej wykorzystanie w okresach niskiej produkcji. To z kolei umożliwi lepsze zarządzanie zużyciem energii oraz minimalizację kosztów operacyjnych, co ma kluczowe znaczenie dla odbiorców indywidualnych i przedsiębiorstw.

Kolejnym aspektem, który będzie kształtował przyszłość fotowoltaiki, jest dalszy rozwój modułów fotowoltaicznych. Wprowadzenie na rynek zaawansowanych modułów typu „glass-glass” oraz innowacyjnych materiałów, takich jak szkło antyrefleksyjne i dyfuzyjne, znacząco podnosi wydajność paneli i ich odporność na niekorzystne warunki środowiskowe. Dzięki temu, instalacje fotowoltaiczne stają się bardziej efektywne i trwałe, co sprzyja ich upowszechnianiu w różnych regionach Polski, niezależnie od panujących tam warunków klimatycznych.

Nie można również zapominać o rosnącej roli innowacyjnych modeli biznesowych, takich jak „prosument zbiorowy” czy „prosument lokatorski”, które umożliwiają bardziej elastyczne korzystanie z energii słonecznej w ramach wspólnot mieszkaniowych i spółdzielni. Tego typu rozwiązania mogą znacząco zwiększyć dostępność energii odnawialnej dla szerszego grona odbiorców, co jest kluczowe w kontekście transformacji energetycznej.

Przyszłość fotowoltaiki w Polsce rysuje się w jasnych barwach, a kluczową rolę w tym procesie odgrywają firmy wdrażające rozwiązania fotowoltaiczne. Poprzez ciągłe innowacje, dostosowywanie oferty do zmieniających się warunków rynkowych oraz inwestycje w rozwój nowoczesnych technologii, takie firmy przyczyniają się do budowy stabilnej i zrównoważonej przyszłości energetycznej kraju. W obliczu rosnących wyzwań klimatycznych oraz potrzeby dekarbonizacji gospodarki, fotowoltaika staje się nie tylko alternatywą, ale i fundamentem nowoczesnego systemu energetycznego.¹⁸

Podsumowanie

Branża fotowoltaiczna w Polsce znajduje się w kluczowym momencie swojej ewolucji. W obliczu licznych wyzwań, takich jak zmiany regulacyjne, rosnące ceny energii oraz konieczność dostosowania się do zmieniających się warunków rynkowych, sektor ten wykazuje zdolność do adaptacji i innowacji. Technologie fotowoltaiczne w Polsce przechodzą dynamiczne zmiany,

¹⁸ Solar energy: Potential and future prospects, Ehsanul Kabir, Pawan Kumar, Sandeep Kumar, Adedeji A. Adelodun, Ki-Hyun Kim, Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018 nr 82

które są nie tylko odpowiedzią na bieżące potrzeby, ale także wyznaczają nowe kierunki rozwoju energetyki odnawialnej.

Jednym z najważniejszych wyzwań jest zmiana systemu rozliczeń prosumentów, która wprowadziła nowy model net-billingu. Mimo że początkowo zmiana ta wywołała pewne spowolnienie w branży, otworzyła ona jednocześnie nowe perspektywy dla bardziej zrównoważonych i efektywnych rozwiązań. Przejście na bardziej zaawansowane systemy rozliczeń skłania prosumentów do szukania lepszych sposobów zarządzania energią, co stwarza nowe możliwości dla innowacji i wzrostu.

Firmy działające w obszarze odnawialnych źródeł energii odgrywają kluczową rolę w kształtowaniu przyszłości fotowoltaiki. Poprzez inwestowanie w badania i rozwój, a także wprowadzanie na rynek nowoczesnych rozwiązań technologicznych, przyczyniają się one do wzrostu efektywności energetycznej i ekonomicznej instalacji fotowoltaicznych. Innowacyjne technologie, takie jak ogniwa „N”, „bi-facial” czy moduły „glass-glass”, znacząco podnoszą wydajność oraz trwałość instalacji, co w dłuższej perspektywie przekłada się na korzyści ekonomiczne i ekologiczne dla całego społeczeństwa.

Jednak przyszłość fotowoltaiki to nie tylko technologia. Równie ważne są nowe modele biznesowe, które pozwalają na szersze wykorzystanie energii słonecznej w ramach wspólnot mieszkaniowych, spółdzielni czy przedsiębiorstw. Rozwiązania takie jak „prosument zbiorowy” czy „prosument lokatorski” otwierają nowe możliwości dla inwestycji w OZE, umożliwiając bardziej elastyczne i dostępne dla szerokiego grona odbiorców korzystanie z energii odnawialnej.

Wszystkie te działania wskazują, że przyszłość fotowoltaiki w Polsce jest pełna obiecujących możliwości. Rozwój sektora

nie jest już tylko odpowiedzią na aktualne wyzwania, ale także świadomym kształtowaniem przyszłości energetycznej kraju. W miarę jak technologie stają się coraz bardziej zaawansowane, a modele biznesowe coraz bardziej innowacyjne, jedynym ograniczeniem wydaje się być nasza wyobraźnia. To, co jeszcze niedawno było postrzegane jako ambitna wizja, dziś staje się rzeczywistością, a perspektywy dla fotowoltaiki w Polsce są bardziej obiecujące niż kiedykolwiek wcześniej.

R290 czynnik przyszłości dla sprężarkowych pomp ciepła

dr inż. Krzysztof Szczotka

Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

Wstęp

W dobie rosnącej świadomości ekologicznej i zaostrzających się regulacji dotyczących ochrony środowiska, przemysł HVAC (Heating, Ventilation, and Air Conditioning) zmierza ku coraz bardziej zrównoważonym rozwiązaniom. Kluczową rolę w tym procesie odgrywa wybór czynników chłodniczych stosowanych w sprężarkowych pompach ciepła. Tradycyjne czynniki, takie jak R410A czy R134a, mimo swojej efektywności, charakteryzują się wysokim potencjałem tworzenia efektu cieplarnianego (GWP), co stanowi wyzwanie w kontekście zrównoważonego rozwoju. W odpowiedzi na te wyzwania, coraz większe zainteresowanie budzi czynnik chłodniczy R290 (propan). Jest to naturalny czynnik o niskim GWP, który oferuje atrakcyjne właściwości termodynamiczne i może stanowić efektywne rozwiązanie zarówno z punktu widzenia efektywności energetycznej, jak i minimalizacji negatywnego wpływu na środowisko. Jego zastosowanie w pompach ciepła staje się przedmiotem licznych badań i wdrożeń, które mają na celu nie tylko poprawę wydajności energetycznej, ale także zwiększenie bezpieczeństwa użytkownika.

Celem niniejszej publikacji jest omówienie potencjału czynnika R290 jako przyszłościowego rozwiązania dla sprężarkowych pomp ciepła, z uwzględnieniem jego zalet, wyzwań technologicznych oraz perspektyw wdrożenia na szeroką skalę.

Czynniki termodynamiczne stosowane w pompach ciepła

Czynniki termodynamiczne stosowane w pompach ciepła odgrywają kluczową rolę w procesie przekazywania ciepła z jednego środowiska do drugiego. Ich właściwości fizykochemiczne determinują wydajność oraz efektywność energetyczną całego systemu. Oto kilka podstawowych kategorii czynników chłodniczych wykorzystywanych w pompach ciepła:

1. HFC (fluorowane węglowodory)

- R410A, R134a, R32

Często stosowane w tradycyjnych pompach ciepła, czynniki te charakteryzują się dobrymi właściwościami termodynamicznymi i wysoką efektywnością. Jednak ich główną wadą jest wysoki potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP), co sprawia, że są stopniowo wycofywane z rynku w związku z regulacjami środowiskowymi (np. F-gaz). Przykładowo, R410A ma GWP wynoszące około 2088, co sprawia, że jego przyszłość jest ograniczona.

2. Naturalne czynniki chłodnicze

- R290 (propan), R600a (izobutan), CO₂ (R744)

Są to czynniki o niskim lub zerowym potencjale tworzenia efektu cieplarnianego (GWP).

- R290 (propan) jest jednym z najczęściej badanych i wdrażanych czynników z tej grupy ze względu na bardzo niski GWP (3), wysoką wydajność energetyczną i dostępność. Jest to czynnik o niskiej toksyczności, ale z uwagi na jego łatwopalność, wdrożenie wymaga szczególnych środków bezpieczeństwa.

- R600a (izobutan) jest kolejnym popularnym czynnikiem stosowanym w mniejszych systemach chłodniczych, również ze względu na niskie GWP i wysoką efektywność.

- CO₂ (R744), mimo wysokiego ciśnienia roboczego, charakteryzuje się zerowym GWP i jest wykorzystywany w specyficznych zastosowaniach, takich jak systemy o wysokich wymaganiach temperaturowych.

3. HFO (hydrofluoroolefiny)

- R1234yf, R1234ze

Czynniki te są nowoczesną alternatywą dla HFC, ponieważ oferują niski potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP poniżej 1) i są mniej szkodliwe dla środowiska. Często stosowane w systemach, gdzie istnieją rygorystyczne wymogi środowiskowe, jednak ich właściwości termodynamiczne mogą być mniej korzystne w porównaniu do HFC.

4. Amoniak (NH₃, R717)

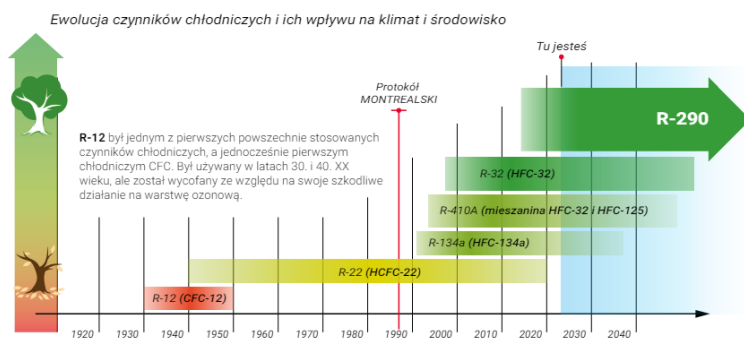
Amoniak jest bardzo efektywnym termodynamicznie czynnikiem o zerowym GWP, ale ze względu na jego toksyczność i korozyjność, jest stosowany głównie w dużych systemach przemysłowych, gdzie bezpieczeństwo użytkownika można zapewnić poprzez odpowiednie technologie. Mimo tych ograniczeń, cieszy się dużym zainteresowaniem w systemach, gdzie kluczowa jest efektywność i zrównoważoność.

5. Woda (R718)

Woda jako czynnik chłodniczy jest teoretycznie najbardziej ekologiczna, ponieważ nie ma negatywnego wpływu na środowisko. Jednak jej stosowanie jest ograniczone do specjalnych

systemów, ze względu na jej właściwości, w tym wysoką temperaturę parowania i wymogi pracy w bardzo niskim ciśnieniu.

Dobór odpowiedniego czynnika termodynamicznego zależy od wielu czynników, w tym od wymagań energetycznych, regulacji prawnych, kosztów operacyjnych oraz bezpieczeństwa.



Źródło: R290 czynnik przyszłości dla sprężarkowych pomp ciepła 2024

Rysunek przedstawia ewolucję czynników chłodniczych i ich wpływ na środowisko, zwracając szczególną uwagę na rozwój od chlorofluorowęglowodorów (CFC) i hydrofluorowęglowodorów (HFC) do bardziej ekologicznych opcji, takich jak R290 (propan). R12, stosowany od lat 30. XX wieku, został wycofany z powodu niszczenia warstwy ozonowej, co zaowocowało międzynarodowym Protokołem Montrealskim z 1987 r., mającym na celu eliminację substancji szkodliwych dla środowiska. Na przestrzeni lat zaczęto stosować HFC, takie jak R134a, jednak ze względu na ich wysoki potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP), również te związki są stopniowo zastępowane

przez czynniki o niższym wpływie na globalne ocieplenie, takie jak R290.

Zastosowanie R290 w pompach ciepła

R290 (propan) charakteryzuje się bardzo dobrymi właściwościami termodynamicznymi, co przekłada się na wysoką efektywność energetyczną pomp ciepła. Dzięki niskiej temperaturze wrzenia (-42°C), R290 może pracować przy niższych temperaturach parowania, co zwiększa sprawność systemów. W praktyce, pompy ciepła z tym czynnikiem wykazują wyższą efektywność COP (Coefficient of Performance) w porównaniu do innych powszechnie stosowanych czynników, takich jak R410A czy R134a.

R290 ma zerowy wpływ na niszczenie warstwy ozonowej (ODP = 0) oraz bardzo niski potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP = 3). Jest to jeden z najbardziej ekologicznych czynników chłodniczych, co czyni go idealnym rozwiązaniem w kontekście rosnących wymagań dotyczących ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Jego zastosowanie pomaga spełniać surowe normy i regulacje, takie jak Protokół Montrealski oraz rozporządzenia UE dotyczące F-gazów. Pompy ciepła z R290 są wykorzystywane zarówno w zastosowaniach domowych, jak i komercyjnych oraz przemysłowych. Można je znaleźć w systemach ogrzewania budynków, podgrzewania wody użytkowej oraz w systemach klimatyzacji. W szczególności R290 jest stosowany w rozwiązaniach przeznaczonych do pracy w zimnym klimacie, gdzie wymagana jest wysoka wydajność przy niskich temperaturach zewnętrznych. Wielu producentów, takich jak Daikin, LG czy Samsung, zaczyna wprowadzać na rynek

pompy ciepła z R290, widząc potencjał tego czynnika w kontekście nowych regulacji prawnych oraz potrzeb rynku na bardziej zrównoważone rozwiązania. R290 jest stosowany zarówno w nowych instalacjach, jak i w modernizacjach starszych systemów, które wymagają wymiany czynnika chłodniczego. Pomimo licznych zalet, zastosowanie R290 niesie pewne wyzwania, głównie ze względu na jego łatwopalność. To wymaga specjalnych środków bezpieczeństwa podczas instalacji i serwisowania urządzeń z tym czynnikiem. W związku z tym producenci muszą stosować technologie, które minimalizują ryzyko, takie jak hermetyczne obudowy, systemy detekcji wycieków oraz odpowiednie normy instalacyjne.¹⁹

Ważnym aspektem zastosowania R290 jest także bezpieczeństwo. Mimo że propan jest gazem łatwopalnym, producenci wprowadzili odpowiednie systemy zabezpieczeń, w tym szczelne komory dla komponentów hydraulicznych oraz automatyczne systemy wentylacyjne, które minimalizują ryzyko zapłonu w razie wycieku.

Coraz więcej producentów sprzętu chłodniczego i klimatyzacyjnego decyduje się na zastosowanie czynnika chłodniczego R290 (propanu) w swoich produktach. Jest to związane z rosnącą świadomością negatywnego wpływu tradycyjnych czynników chłodniczych na środowisko oraz z coraz bardziej restrykcyjnymi przepisami dotyczącymi ochrony klimatu. Zastosowanie R290 w urządzeniach chłodniczych i klimatyzacyjnych jest coraz bardziej popularne. Dzięki swoim właściwościom, czynnik ten przyczynia się do poprawy efektywności

¹⁹ <https://tomalainstalacje.pl/czynnik-r290-w-pompach-ciepła-co-to-takiego/>

energetycznej, zmniejszenia wpływu na środowisko i obniżenia kosztów eksploatacji. Jeśli szukasz ekologicznego i wydajnego rozwiązania, warto zwrócić uwagę na urządzenia wykorzystujące R290.

Wyzwania związane z wdrożeniem R290

Chociaż R290 (propan) jest uważany za ekologiczne i wydajne rozwiązanie dla pomp ciepła, jego wdrożenie wiąże się z pewnymi wyzwaniami.

R290 jest gazem łatwopalnym, co stanowi istotne wyzwanie w zakresie bezpieczeństwa. W przypadku wycieku, istnieje ryzyko zapłonu, zwłaszcza w zamkniętych pomieszczeniach. Dlatego instalacje pomp ciepła na propan muszą być projektowane i montowane zgodnie z rygorystycznymi standardami bezpieczeństwa. Wprowadza to dodatkowe koszty związane z zabezpieczeniami, takimi jak systemy wentylacyjne i szczelne komory na komponenty hydrauliczne. Pomimo zaawansowanych technologii zabezpieczeń, jak szczelne obudowy czy systemy „przedmuchiwania” instalacji, łatwopalność propanu wymaga przeszkolenia instalatorów i serwisantów, co może podnosić koszty oraz ograniczać dostępność odpowiednich specjalistów. Z uwagi na właściwości łatwopalne, R290 nie zawsze może być stosowany w dużych budynkach wielorodzinnych czy przestrzeniach komercyjnych o podwyższonym ryzyku. W takich przypadkach, pomimo ekologicznych zalet, konieczne może być zastosowanie alternatywnych czynników chłodniczych, co ogranicza powszechność tego rozwiązania²⁰. Ponadto istnieją

²⁰ <https://onninen.pl/arttykul/r290-naturalny-czynnik-chlodniczy-w-pompach-ciepla-bosch>

międzynarodowe normy dotyczące maksymalnej ilości propanu, jaka może być używana w systemach chłodniczych i grzewczych. W niektórych przypadkach może to wymagać zmniejszenia mocy urządzenia, co wpłynie na jego efektywność w dużych instalacjach.

Choć R290 jest tańszy i bardziej dostępny niż niektóre syntetyczne czynniki chłodnicze, koszty adaptacji istniejących systemów do jego zastosowania mogą być wysokie. Wymagane są specjalne materiały odporne na działanie propanu oraz dodatkowe komponenty zabezpieczające, co podnosi cenę urządzeń. Ponadto producenci muszą inwestować w rozwój nowych urządzeń dostosowanych do specyfiki R290, co może wpłynąć na tempo wdrożenia tego czynnika na szeroką skalę.

Mimo że R290 jest postrzegany jako przyszłościowy czynnik chłodniczy, jego stosowanie w niektórych regionach może wymagać spełnienia określonych norm i przepisów związanych z substancjami łatwopalnymi. To stawia dodatkowe wyzwania przed producentami oraz instalatorami, którzy muszą uzyskać odpowiednie certyfikaty i uprawnienia do pracy z tym gazem. Regulacje mogą różnić się w zależności od kraju, co sprawia, że wdrożenie R290 na globalną skalę wymaga harmonizacji przepisów dotyczących czynników chłodniczych²¹.

Instalacje na R290 mogą wymagać bardziej zaawansowanego serwisowania w porównaniu do urządzeń na syntetyczne czynniki chłodnicze. Regularne kontrole szczelności, przeglądy systemów zabezpieczeń oraz monitorowanie stanu komponentów

²¹ <https://globenergia.pl/pompa-ciepla-na-czynnik-r290-w-domu-jednorodinnym-montaz-eksploatacja-i-statystyki-zuzycia-energii/>

są kluczowe dla bezpiecznego i efektywnego użytkowania. To z kolei może podnieść koszty eksploatacji w długim okresie.

Pomimo tych wyzwań, R290 jest wciąż postrzegany jako perspektywiczne rozwiązanie dla pomp ciepła, zwłaszcza w kontekście zaostreżenia norm dotyczących emisji gazów cieplarnianych. Jednak jego wdrożenie wymaga starannego planowania, szczególnie w obszarach związanych z bezpieczeństwem, regulacjami prawnymi oraz dostosowaniem technologii.

Perspektywy rozwoju rynku R290

Czynnik chłodniczy R290 (propan) zyskuje coraz większą popularność w branży chłodniczej i klimatyzacyjnej, a także w pompach ciepła. Jego niskie oddziaływanie na środowisko oraz wysoka wydajność sprawiają, że jest to jeden z najbardziej obiecujących czynników chłodniczych przyszłości.

Główne czynniki napędzające rozwój rynku R290:

- Ścisłe regulacje dotyczące czynników chłodniczych: Coraz bardziej restrykcyjne przepisy dotyczące emisji gazów cieplarnianych i ochrony warstwy ozonowej przyspieszają przejście na czynniki o niskim potencjale tworzenia efektu cieplarnianego (GWP), takie jak R290.
- Wzrost świadomości ekologicznej: Konsumenci i przedsiębiorstwa są coraz bardziej świadomi wpływu

swoich działań na środowisko, co zwiększa popyt na produkty przyjazne dla klimatu.

- Wysoka wydajność: R290 charakteryzuje się doskonałymi właściwościami termodynamicznymi, co przekłada się na wysoką wydajność urządzeń chłodniczych i klimatyzacyjnych.
- Opłacalność: Pomimo początkowo wyższych kosztów inwestycji, urządzenia z R290 mogą przynieść długoterminowe oszczędności dzięki niższym kosztom eksploatacji.

Perspektywy na przyszłość:

- Zwiększenie udziału w rynku: Można oczekiwać, że udział R290 w rynku czynników chłodniczych będzie nadal rosł, zwłaszcza w segmencie domowych urządzeń chłodniczych i klimatyzacyjnych oraz pomp ciepła.
- Rozwój nowych zastosowań: R290 może znaleźć zastosowanie w coraz większej liczbie urządzeń, takich jak suszarki do ubrań, chłodnie sklepowe czy przemysłowe systemy chłodnicze.
- Standaryzacja i uproszczenie procedur: Wraz ze wzrostem popularności R290 można oczekiwać dalszej standaryzacji i uproszczenia procedur związanych z jego stosowaniem, co przyczyni się do obniżenia kosztów i przyspieszenia wdrażania nowych rozwiązań.
- Rozwój technologii: Będą prowadzone dalsze badania nad optymalizacją systemów chłodniczych wykorzystujących R290, co pozwoli na jeszcze większe zwiększenie ich wydajności i niezawodności.

Wyzwania:

- **Bezpieczeństwo:** Palność R290 wymaga szczególnych środków ostrożności podczas produkcji, instalacji i serwisowania urządzeń.
- **Koszty:** Pomimo spadających cen, R290 wciąż może być droższy od niektórych innych czynników chłodniczych.
- **Dostępność:** W niektórych regionach dostępność R290 może być ograniczona.
- **Kwalifikacje personelu:** Instalatorzy i serwisanci muszą posiadać odpowiednie kwalifikacje i być przeszkoleni w zakresie bezpiecznego obsługiwanie urządzeń z R290.

Podsumowując, perspektywy rozwoju rynku R290 są bardzo pozytywne. Coraz więcej czynników wskazuje na to, że ten naturalny czynnik chłodniczy odegra kluczową rolę w transformacji branży chłodniczej i klimatyzacyjnej w kierunku bardziej zrównoważonego rozwoju.

Podsumowanie i wnioski

Niniejsza publikacja przedstawiła kompleksową analizę potencjału czynnika chłodniczego R290 w zastosowaniu do sprężarkowych pomp ciepła. Dokonano przeglądu jego właściwości fizycznych, wpływu na środowisko oraz porównania z innymi czynnikami chłodniczymi powszechnie stosowanymi w tej branży.

R290, czyli propan, wyróżnia się niezwykle niskim potencjałem tworzenia efektu cieplarnianego (GWP), co czyni go jednym

z najbardziej ekologicznych czynników chłodniczych dostępnych na rynku. Jego wysoka wydajność termodynamiczna przekłada się na efektywność energetyczną pomp ciepła, co z kolei przyczynia się do obniżenia kosztów eksploatacji.

Mimo że palność R290 stanowi pewne wyzwanie, nowoczesne technologie i odpowiednie środki bezpieczeństwa pozwalają na bezpieczne stosowanie tego czynnika w urządzeniach chłodniczych. Producenci pomp ciepła coraz częściej wprowadzają na rynek modele wykorzystujące R290, co świadczy o rosnącej świadomości ekologicznej i dążeniu do zrównoważonego rozwoju.

1. **R290 jest przyszłością dla sprężarkowych pomp ciepła:** Jego niskie GWP, wysoka wydajność i coraz szersza dostępność sprawiają, że jest to rozwiązanie coraz chętniej wybierane przez producentów i użytkowników.
2. **Wymaga to zmian w branży:** Wdrożenie R290 wymaga dostosowania procesów produkcyjnych, instalacyjnych i serwisowych, a także wprowadzenia nowych standardów bezpieczeństwa.
3. **Korzyści dla środowiska i użytkowników:** Zastosowanie R290 przyczynia się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i ochrony klimatu. Dla użytkowników oznacza to niższe rachunki za energię i większy komfort.
4. **Wyzwania do pokonania:** Palność R290 wymaga odpowiednich środków ostrożności, a koszty początkowe inwestycji mogą być nieco wyższe niż w przypadku urządzeń z innymi czynnikami chłodniczymi.

-
5. **Konieczność dalszych badań:** Dalsze badania powinny koncentrować się na optymalizacji systemów chłodniczych wykorzystujących R290 oraz na rozwoju nowych materiałów i technologii, które umożliwią jeszcze bardziej efektywne i bezpieczne stosowanie tego czynnika.

Podsumowując, R290 stanowi ważny krok w kierunku bardziej zrównoważonej przyszłości branży chłodniczej. Jego zastosowanie w pompach ciepła przyczynia się do ochrony środowiska i poprawy jakości życia.



Organizator:

Polska Izba Ekologii
40-009 Katowice
ul. Warszawska 3



Partner:

Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki
Akademii Górniczo - Hutniczej
im. Stanisława Staszica
w Krakowie

www.innowacjeoze.com

PROJEKT DOFINANSOWANY ZE ŚRODKÓW BUDŻETU
PAŃSTWA, PRYZNANYCH PRZEZ MINISTRA NAUKI
I SZKOLNICTWA WYŻSZEGO W RAMACH PROGRAMU
„DOSKONAŁA NAUKA II”.



Ministerstwo Nauki
i Szkolnictwa Wyższego
