



Instytut Gospodarki
Surowcami Mineralnymi
i Energią
Polskiej Akademii Nauk

II Międzynarodowa Konferencja

Strategie wdrażania

Zielonego Ładu


Woda, Surowce i Energia



MONOGRAFIA

CZĘŚĆ II

PATRONAT HONOROWY

 Ministerstwo
Klimatu i Środowiska



Minister
Edukacji i Nauki



Izba Gospodarcza
WODOCIĄGI POLSKIE

IGSMiE PAN



8–10 grudnia 2021

REDAKTOR NAUKOWY

Dr hab. Marzena SMOL, prof. IGSMIE PAN
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk
Pracownia Surowców Biogenicznych

OKŁADKA I KOMPOZYCJA

Paulina MARCINEK i Dominika SZOŁDROWSKA
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk
Pracownia Surowców Biogenicznych



ADRES KORESPONDENCYJNY

Pracownia Surowców Biogenicznych
Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk
ul. J. Wybickiego 7A, 31-261 Kraków, Polska
e-mail: smol@meeri.pl
www.min-pan.krakow.pl/psb

Redaktor Wydawnictwa: Emilia Rydzewska-Smaza
Redaktor techniczny: Beata Stankiewicz, Barbara Sudoł

© *Copyright by Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk – Wydawnictwo*

© *Copyright by Autorzy*

Kraków 2022

Printed in Poland

e-ISBN 978-83-964234-0-5

DOI: 10.24425/stratziel2konf



8–10 grudnia 2021

KOMITET NAUKOWY

- Dr hab. **Marzena Smol**, prof. IGSMiE PAN, *Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Polska, Przewodnicząca*
- Dr inż. **Christian Adam**, *Federal Institute for Materials Research and Testing (BAM), Niemcy*
- Dr **Anna Avdiushchenko**, *Uniwersytet Jagielloński, Polska*
- Prof. **Tomasz Bajda**, *Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Polska*
- Prof. **Miriam Balaban**, *University Campus Bio-Medico of Rome, Włochy*
- Dr **Anna Berbesz**, *Politechnika Wrocławska, Polska*
- Prof. **Augusto Bianchini**, *Universita di Bologna, Włochy*
- Prof. **Michał Bodzek**, *Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Polska*
- Prof. **Idiano D'Adamo**, *Sapienza University of Rome, Włochy*
- Prof. **Joanna Duda**, *Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Polska*
- Prof. **Krzysztof Galos**, *Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Polska*
- Prof. **Krzysztof Gaska**, *Politechnika Śląska, Polska*
- Prof. **Lidia Gawlik**, *Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Polska*
- Prof. **Agnieszka Generowicz**, *Politechnika Krakowska, Polska*
- Prof. **Ludwig Halicz**, *Geological Survey of Israel, Izrael*
- Ludwig Hermann**, *Prezydent European Sustainable Phosphorus Platform (ESPP), Proman Management GmbH, Austria*
- Prof. **Mika Horttanainen**, *Lappeenranta-Lahti University of Technology, Finlandia*
- Prof. **Māris Kļaviņš**, *University of Latvia, Łotwa*
- Prof. **Jiří Jaromír Klemeš**, *Brno University of Technology, Czechy*
- Prof. **Eugeniusz Koda**, *Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie – SGGW, Polska*
- Prof. **Viktor Koval**, *Southern Scientific Center of National Academy of Sciences of Ukraine and Ministry of Education and Science of Ukraine, Ukraina*
- Prof. **Jolita Kruopienė**, *Kaunas University of Technology, Litwa*
- Dr inż. **Marcin Kuczera**, *CreativeTime, Polska*
- Dr inż. **Edyta Kudlek**, *Politechnika Śląska, Polska*
- Katalin Kurucz**, *Bay Zoltán Nonprofit Ltd. Applied Research, Węgry*
- Dr inż. **Bartłomiej Macherzyński**, *Uniwersytet Kardynała Stefana Wyszyńskiego w Warszawie, Polska*
- Prof. dr hab. **Izabela Majchrzak-Kucęba**, *Politechnika Częstochowska, Polska*
- Prof. **Jacek Mąkinia**, *Politechnika Gdańska, Polska*
- Prof. **Alfonso Mejia**, *Pennsylvania State University, Stany Zjednoczone*



8–10 grudnia 2021

- Prof. **Eugeniusz Mokrzycki**, *Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Polska*
Prof. **Majeti Narasimha Vara Prasad**, *University of Hyderabad, Indie*
Dr **Konstantinos Moustakas**, *National Technical University of Athens, Grecja*
Prof. **Zenon Pilecki**, *Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Polska*
Prof. **Eric Pirard**, *Université de Liège, Belgia*
Dr hab. inż. **Arkadiusz Piwowar**, prof. UEW, *Uniwersytet Ekonomiczny we Wrocławiu, Polska*
Prof. **Alexandra Ribeiro**, *NOVA University Lisbon, Portugalia*
Prof. **Czesława Rosik-Dulewska**, *Członek Rzeczywisty Polskiej Akademii Nauk, Instytut Podstaw Inżynierii Środowiska Polskiej Akademii Nauk, Polska*
Dr **Monika Sady**, *Uniwersytet Ekonomiczny w Krakowie, Polska*
Prof. dr hab. inż. **Agnieszka Sobczak-Kupiec**, *Politechnika Krakowska, Polska*
Prof. **Alexandros Stefanakis**, *School of Environmental Engineering, Technical University of Crete, Grecja*
Prof. **Krzysztof Szamałek**, *Uniwersytet Warszawski, Polska*
Dr inż. **Beata Szatkowska**, *Aquateam COWI, Norwegia – Polska*
Dr inż. **Renata Tomczak-Wandzel**, *Aquateam COWI, Norwegia – Polska*
Prof. **Konstantinos Tsagarakis**, *Democritus University of Thrace, Grecja*
Dr hab. inż. **Magdalena Wdowin**, prof. IGSMiE PAN, *Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, Polska*
Dr hab. inż. **Sebastian Werle**, prof. PŚ, *Politechnika Śląska, Polska*
Prof. **Maria Włodarczyk** – Makuła, *Politechnika Częstochowska, Polska*
Dr **Dariusz Włóka**, *GreenBack, Polska*
Dr **Kari Ylivainio**, *Natural Resources Institute (Luke), Finlandia*



8–10 grudnia 2021

Spis treści

<i>Recenzenci Części II</i>	6
<i>Przedmowa (Marzena Smol)</i>	7
YURII DELIKHOVSKYI, ŁUKASZ WÓJCIK <i>Ilovo-cementowe zawiesziny uszczelniające stosowane w ochronie przeciwpowodziowej, właściwości oraz parametry użytkowe</i>	9
BARTŁOMIEJ IGLIŃSKI <i>Sektor polskiej energetyki wiatrowej na tle światowej energetyki wiatrowej</i>	25
EDYTA GAWRYSIAK, KLAUDIA PAWLUS, TOMASZ JAROSZ <i>Przegląd literatury w zakresie zielonych alternatyw dla inicjujących materiałów wybuchowych w kontekście możliwości redukcji zanieczyszczenia środowiska metalami ciężkimi</i>	43
IZABELA KIEŁB-SOTKIEWICZ <i>Zastosowanie cytometrii przepływowej w badaniach prób środowiskowych</i>	61
BARBARA PIECZYKOLAN <i>Wykorzystanie wysuszonego osadu pokoagulacyjnego do adsorpcji Błękitu Helaktynowego F-2R</i>	75
KRZYSZTOF SŁOTA, ZBIGNIEW SŁOTA <i>Redukcja kosztów energii związanej z przewietrzaniem Sztolni Królowa Luiza – studium przypadku</i>	90
ZBIGNIEW SŁOTA, KRZYSZTOF SŁOTA <i>Wpływ nowelizacji przepisów dotyczących wartości dopuszczalnych stężeń dla tlenków azotu na projektowanie wentylacji w tunelach eksploatowanych metodą górnictw – studium przypadku</i>	104
SZYMON STOCKI, RAFAŁ HÜBNER <i>Zielony wodór jako przyszłość odnawialnych źródeł energii i energetyki</i>	117



Bartłomiej Igliński

Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu; e-mail: iglinski@chem.umk.pl

Sektor polskiej energetyki wiatrowej na tle światowej energetyki wiatrowej

STRESZCZENIE: Celem pracy było przedstawienie sektora energii wiatrowej w Polsce na tle sektora energii wiatrowej na świecie. Energetyka wiatrowa odgrywa coraz większą rolę w światowym miksie energii – tylko w 2020 r. przybyło 93 GW, osiągając łączną moc 743 GW. Wykorzystując dane meteorologiczne, obliczono potencjał techniczny energetyki wiatrowej w Polsce. Uzyskane wyniki wskazują, że zaledwie 0,02% obszaru Polski spełnia wymogi tzw. Ustawy odległościowej. Obecnie sektor energetyki wiatrowej w Polsce na tle sektora energetyki wiatrowej na świecie przeżywa od 5 lat stagnację. Liberalizacja ustawy odległościowej i rozwój morskiej energetyki wiatrowej powinny przyczynić się do znaczącego przyrostu mocy energetyki wiatrowej w Polsce.

SŁOWA KLUCZOWE: energia odnawialna, energia wiatrowa, potencjał techniczny, Polska, świat

Wprowadzenie

Energetyka wiatrowa to jedna z najdynamiczniej rozwijających się gałęzi energetyki odnawialnej na świecie. Energię wiatru pozyskuje się za pomocą stosunkowo prostych rozwiązań technologicznych – turbin wiatrowych, stanowiących element siłowni (elektrowni) wiatrowych, w których energia kinetyczna wiatru przetwarzana jest na energię mechaniczną lub elektryczną. Energię elektryczną wytwarza się w pojedynczych elektrowniach lub w zespołach elektrowni, tzw. parkach (farmach) wiatrowych (Buczowski i in. 2014).

Aktualny rozwój energetyki wiatrowej na świecie odbywa się w dwóch podstawowych kierunkach:

- Lądowa energetyka wiatrowa (ang. *onshore wind power*) – w ramach tej kategorii można wyróżnić:
 - wielkoskalową energetykę wiatrową – pojedyncze turbiny o mocach zwykle powyżej 1 MW lub farmy wiatrowe (złożone z kilku/kilkudziesięciu turbin wiatrowych),



8–10 grudnia 2021

- energetykę wiatrową średniej skali – pojedyncze turbiny o mocach z przedziału z reguły 200–600 kW, przyłączone do sieci elektroenergetycznej, będące w posiadaniu osób indywidualnych, małych przedsiębiorstw lub społeczności lokalnych,
- małą (rozproszoną) energetykę wiatrową (ang. *small (distributed) wind energy*) – pojedyncze turbiny wiatrowe o mocy nieprzekraczającej 100 kW, zlokalizowane głównie w pobliżu domostw jako alternatywne źródło energii; małe elektrownie wiatrowe znajdują zastosowanie także tam, gdzie brak uzasadnienia ekonomicznego dla doprowadzenia energii z sieci elektroenergetycznej (np. zasilanie oświetlenia znaków drogowych, billboardów itp.);
- Morska energetyka wiatrowa (ang. *offshore wind power*) – farmy wiatrowe zlokalizowane na otwartych wodach morskich; obecnie są to konstrukcje trwale związane z dnem morskim, jednakże bada się również możliwości budowy turbin pływających, przeznaczonych do instalowania w miejscach znacznie oddalonych od lądu, na większych głębokościach (Buczowski i in. 2014).

Większość instalowanych obecnie turbin wiatrowych to urządzenia o poziomej osi wirnika i trzech łopatach (taka ich liczba została uznana za optymalną). Wielkoskalowe turbiny wiatrowe są instalowane na wieżach o wysokości od kilkudziesięciu do ponad 100 m – zależy to od typu turbiny, jej mocy oraz warunków wietrznych panujących w danej lokalizacji. Na rynku oferowane są turbiny o bardzo szerokim zakresie mocy – od kilkudziesięciu watów (mikroturbiny, przeznaczone np. do zasilania oświetlenia ulicznego) do kilku MW. Największe komercyjnie dostępne turbiny wiatrowe mają obecnie moc ponad 10 MW, jednakże w zaawansowanym stadium są prace nad budową większych urządzeń. Wydajność turbiny wiatrowej opisuje tzw. współczynnik wykorzystania mocy, który określa ilość energii, jaką elektrownia wiatrowa jest w stanie wyprodukować w ciągu roku, w stosunku do maksymalnej możliwej produkcji, wyrażany w [%] lub w godzinach pracy z pełną mocą w ciągu roku (Igliński i in. 2016).

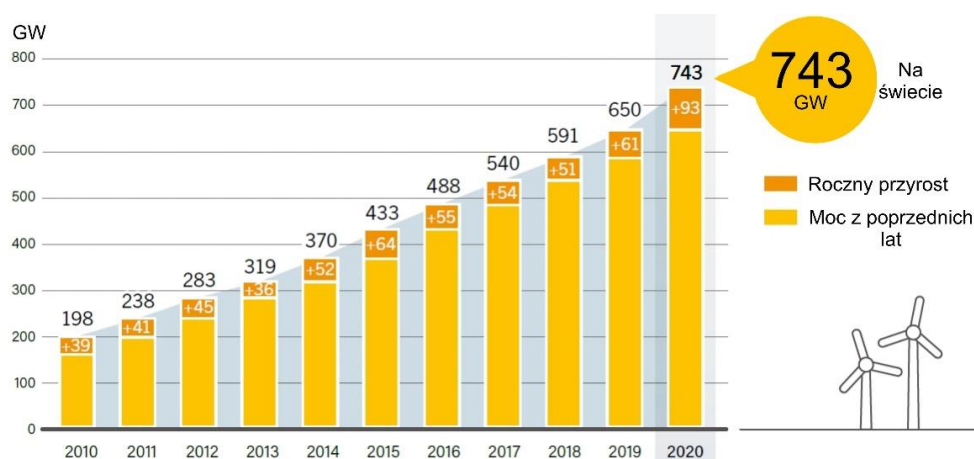
Współczesne, odpowiednio zlokalizowane lądowe turbiny wiatrowe charakteryzują się współczynnikami wykorzystania mocy powyżej 30% (w najlepszych lokalizacjach powyżej 35%). Morskie farmy wiatrowe mają znacznie większą wydajność – powyżej 40%, a postawione w ostatnich latach, z wykorzystaniem najnowszych technologii – nawet 50%. Typowa turbina wiatrowa rozpoczyna pracę przy prędkości wiatru 3–4 m/s i osiąga moc nominalną przy prędkości 11–12 m/s (Igliński i in. 2016).

Celem pracy było przedstawienie rozwoju energetyki wiatrowej w Polsce na tle energetyki wiatrowej w Polsce. Dodatkowo, obliczono potencjał aeroenergetyki w Polsce z uwzględnieniem ustawy odległościowej (10H).



1. Energetyka wiatrowa na świecie

Światowy rynek energetyki wiatrowej osiągnął rekordowe 93 GW mocy nowych instalacji w 2020 r., podnosząc łączną moc aeroenergetyki na lądzie i morzu do 743 GW (rys. 1) (REN21 2021). Chiny i Stany Zjednoczone utrzymały stały, rekordowy przyrost mocy energetyki wiatrowej. Kilka innych krajów również osiągnęło rekordowy przyrost liczby instalacji, podczas gdy reszta świata zainstalowała mniej więcej tyle samo co w 2019 roku. W kilku krajach w 2020 r. znaczna część produkcji energii elektrycznej przypadała na energię wiatrową, w tym w Danii (ponad 58%), Urugwaju (40,4%), Irlandii (38%) i Wielkiej Brytanii (24,2%) (REN21 2021; Chomać-Pierzecka i in. 2022).



Rysunek 1.
Skumulowana moc i przyrost nowych mocy energetyki wiatrowej na świecie
w latach 2010–2020 (opracowanie własne za (REN21 2021))

Po raz pierwszy globalne nakłady inwestycyjne na morską energetykę wiatrową w ciągu roku przewyższyły inwestycje w morską ropę i gaz. Producenci turbin skupili się na innowacjach technologicznych, aby stale obniżać koszty i osiągać coraz niższy poziom kosztów energii. Ponadto poszerzyli swoją współpracę z jednostkami naukowymi, aby zwiększyć trwałość turbin wiatrowych podczas produkcji i pod koniec okresu użytkowania (REN21 2021; Haces-Fernandez i in. 2022).

Chiny powiększyły swoją dominację na rynku, pomimo związanych z pandemią opóźnień w przyłączeniu do sieci na początku roku. Szacuje się, że 52 GW (48,9 GW na lądzie i 3,1 GW na morzu) zostało dodane w 2020 r.; to było mniej więcej tyle, ile zainstalował cały świat w 2018 r. Sumaryczna moc wiatrowa tego kraju wynosi ponad 288 GW. W 2020 r. na Chiny przypadało 67% z 33,7 GW mocy wiatrowych na



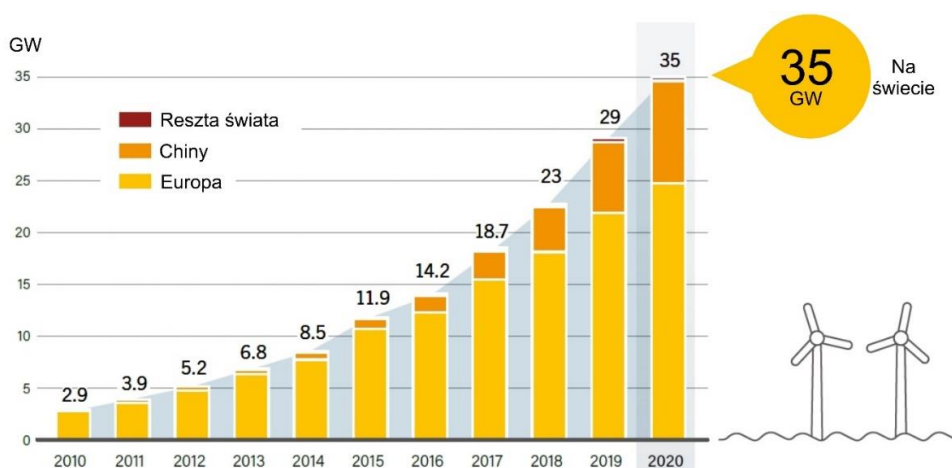
8–10 grudnia 2021

ładzie przyznanych na całym świecie w aukcjach, a większość przyznanej mocy chińskiej opierała się na schemacie parytetu sieci (REN21 2021; Haces-Fernandez i in. 2022).

Kraje amerykańskie dodały prawie 22 GW (wzrost o 62% w porównaniu z 2019 r.), przy czym większość turbin (72%) zainstalowano w USA. Kraj ten uruchomił 16,9 GW nowych mocy w 2020 roku, co stanowi wzrost o 85% w stosunku do 2019 roku. Dziewiąty rok z rzędu liderem pod względem rocznych instalacji wiatrowych był stan Teksas (4,2 GW), a następnie Iowa (1,5 GW), Wyoming (1,1 GW), Illinois (1,1 GW) i Missouri (1 GW). Pod koniec roku całkowita moc w USA osiągnęła 122,5 GW, co wystarczyło do zasilania ponad 38 milionów amerykańskich domów. Teksas nadal jest liderem pod względem całkowitej mocy (33,1 GW), z 27% całkowitej mocy w USA (gdyby Teksas był krajem, zająłby piąte miejsce na świecie pod względem skumulowanych mocy instalacji) (REN21 2021; Haces-Fernandez i in. 2022).

Europa dodała w 2020 r. 13,8 GW nowych mocy wiatrowych, z czego 21% działa na morzu, co daje łącznie prawie 210,4 GW w regionie. Wzrost mocy energetyki lądowej został wyhamowany przez pandemię COVID-19, co wynikało głównie z ograniczeń w przepływie osób i towarów. Mimo to rok 2020 był trzecim największym rokiem dla nowych instalacji w Europie, po 2017 i 2019 roku. Według danych WindEurope sektor wiatrowy zatrudnia już 300 tysięcy osób w całej Europie, przynosi 37 mld EUR do PKB UE i płaci 5 mld EUR podatków rocznie, przyczyniając się do rozwoju lokalnych społeczności. Każda nowa turbina zainstalowana w Europie generuje aktywność ekonomiczną wycenianą średnio na 10 mln EUR poprzez tzw. efekt mnożnikowy (REN21 2021).

W segmencie morskiej energetyki wiatrowej pięć krajów w Europie i dwa w Azji oraz Stany Zjednoczone przyłączyły w 2020 roku prawie 6,1 GW (rys. 2), zwiększając skumulowaną globalną moc offshore do ponad 35,3 GW. Turbiny wiatrowe działa-



Rysunek 2.

Przyrost mocy morskiej energetyki wiatrowej na świecie w latach 2010–2020 (opracowanie własne za (REN21 2021))



jące na morzu stanowiły 6,5% wszystkich nowo zainstalowanych światowych mocy wiatrowych w 2020 r. Zainteresowanie morską energetyką wiatrową rośnie – w tym wśród korporacji chcących podpisać umowy zakupu energii (PPA) – ze względu na dużą skalę produkcji, wskaźniki wysokiej mocy, dość jednolite profile wytwarzania i spadające koszty (REN21 2021).

Chiny dodały rekordową moc 3,1 GW na morzu, co łącznie daje im około 10 GW sumarycznej mocy. W planach miało być oddanych więcej mocy do eksploatacji w 2020 r., ale postęp został zahamowany przez pandemię, w tym problemy z łańcuchem dostaw i brak statków do instalacji turbin na morzu. Chiny wyznaczyły sobie cele w zakresie morskiej energetyki wiatrowej na poziomie 60 GW do 2030 roku (REN21 2021).

Europa pozostała światowym liderem, jeśli chodzi o moc aeroenergetyki na morzu: dodała 2,9 GW w 2020 r. w dziewięciu ukończonych farmach wiatrowych, co daje łącznie 25 GW. Holandia ponad dwukrotnie zwiększyła swoją moc na morzu (dodając 1,5 GW), co stanowiło ponad połowę instalacji w Europie; za nią uplasowała się Belgia (0,7 GW), która miała również „rekordowy” rok, Wielka Brytania (0,5 GW), Niemcy (0,2 GW) i Portugalia (prawie 17 MW). W planach są kolejne, większe projekty offshore, w tym także w Polsce (REN21 2021).

2. Energetyka wiatrowa w Polsce

Konsekwentnie rośnie udział OZE w Polsce (Igliński 2019). Najwięcej czystej energii produkuje się w lądowych farmach wiatrowych. W 2020 r. moc zainstalowana instalacji wykorzystujących energię wiatru na lądzie wyniosła 6,35 GW. Produkcja energii elektrycznej z OZE wyniosła w ubiegłym roku blisko 28 TWh, w tym niemalże 16 TWh z energetyki wiatrowej. Celem strategicznym jest uwolnienie pełnego potencjału polskiej energetyki wiatrowej na lądzie. PSEW szacuje go na 22–24 GW w perspektywie lat 2030–2035. Z kolei McKinsey w raporcie „Neutralna emisyjnie Polska 2050” wskazuje na 35 GW lądowych farm do 2050 r. (PSEW 2021).

Energetyka wiatrowa na lądzie ma wszelkie warunki do tego, by stać się odpowiedzialnością zarówno na kryzys klimatyczny, jak i gospodarczy. Pandemia uderzyła w globalne łańcuchy dostaw i wskazała ich słabe punkty. Jednak branża wiatrowa wyszła z tego obroną ręką, okazując wyjątkową odporność na zawirowania światowej koniunktury. W Polsce także wykazano się prawdziwą determinacją, realizując w tych trudnych okolicznościach zaplanowane inwestycje zgodnie z napiętymi harmonogramami i tworząc mnóstwo wartościowych, opartych na wiedzy, stanowisk pracy. Co więcej, farmy wiatrowe na lądzie wzmocniły także budowany od lat wizerunek najtańszych źródeł wytwarzania energii. Już dzisiaj koszt pozyskania jednej megawatogodziny oscyluje wokół 200 PLN. Likwidacja barier odległościowych, która umożliwi wykorzystanie w realizowanych projektach turbin najnowszych generacji,

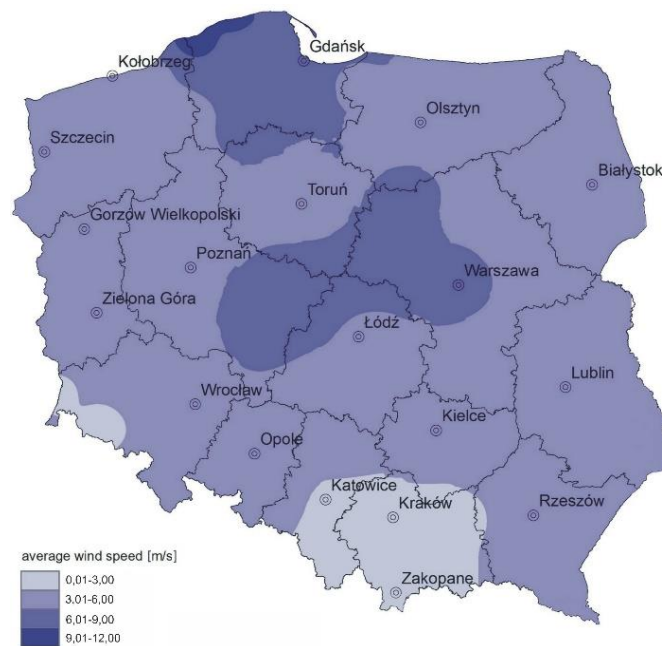


8–10 grudnia 2021

stworzy przestrzeń do dalszego obniżania średniej ceny ofert składanych w aukcjach przez inwestorów wiatrowych – nawet o kolejne kilkadziesiąt złotych na megawatogodzinę (PSEW 2021).

Realny obraz dynamiki rynku wiatrowego w Polsce oddają dane Urzędu Regulacji Energetyki dotyczące ewolucji mocy zainstalowanej instalacji wykorzystujących energię wiatru na lądzie. Lata 2013–2016 były okresem stałego wzrostu mocy wiatrowych. Wejście w życie ustawy odległościowej (10H) znacząco zahamowało rozwój sektora. W latach 2017–2019 zaniechano części działań związanych z rozwijaniem nowych projektów wiatrowych. Ramy prawne energetyki wiatrowej istotnie wpływają na rozwój inwestycji (PSEW 2021). Z zadowoleniem należy odnotować wzrost mocy zainstalowanych w 2020 r. oraz doskonałe dla aeroenergetyki aukcje z lat 2019 i 2020. Pełne odblokowanie potencjału onshore dokona się wraz ze zniesieniem sztywnego rygoru 10H (PSEW 2021).

Patrząc na mapę prędkości wiatru na wysokości 140 m (rys. 3), należy stwierdzić, że Polska ma korzystne warunki do energetyki wiatrowej – najlepsze warunki panują w części północnej i środkowej kraju (Igliński 2019).



Rysunek 3.

Średnia prędkość wiatru na wysokości 140 m w latach 1990–2015 (opracowanie własne za (Igliński 2019))

Pierwsza elektrownia wiatrowa w województwie pomorskim o mocy 150 kW powstała w 1991 roku w Lisewie koło Gniewina. W tym samym roku w Swarzewie koło Pucka wzniesiono elektrownię o mocy 90 kW (obecnie nieczynna). Od roku 2005, po



przystąpieniu Polski do Unii Europejskiej i usunięciu części barier prawnych, zaczęła wzrastać ilość inwestycji w energetykę wiatrową (Buczkowski i in. 2014). Stawiane są zarówno pojedyncze turbiny, jak i całe farmy.

2.1. Potencjał techniczny aeroenergetyki w Polsce

Potencjał techniczny energii wiatru wiąże się przede wszystkim z przestrzennym rozmieszczeniem terenów otwartych (o niskiej szorstkości podłoża i bez obiektów zaburzających przepływ powietrza). Istotnym ograniczeniem przestrzennym dla rozwoju energetyki wiatrowej jest występowanie i powiększanie obszarów chronionych (Igliński i in. 2016).

Obowiązująca od 16 lipca 2016 r. ustawa o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych (Ustawa 2016), nazywana też „odległościową”, zmieniła zasadniczo sytuację energetyki wiatrowej na rynku. Ustawa wprowadza definicję elektrowni wiatrowej i ustala, że instalacje tego typu będą mogły być lokalizowane wyłącznie na podstawie miejscowego planu zagospodarowania przestrzennego. Zgodnie z ustawą, nową elektrownię wiatrową będzie można postawić w odległości nie mniejszej niż dziesięciokrotność jej wysokości (licząc z łopatami) od zabudowań mieszkalnych i mieszanych oraz obszarów szczególnie cennych z przyrodniczego punktu widzenia (parków narodowych, parków krajobrazowych, rezerwatów przyrody, obszarów Natura 2000 i leśnych kompleksów promocyjnych).

Obliczono potencjał techniczny aeroenergetyki w Polsce. Założono, że stawiane będą turbiny 140-metrowe, czyli że ich wysokość wraz ze śmigłem wyniesie 215 m. Jak już wspomniano, według ustawy „odległościowej” (Ustawa 2016), turbina musi stać w odległości równej co najmniej dziesięciokrotności wysokości (czyli w tym przypadku w odległości co najmniej 2150 m) od budynków mieszkalnych oraz od wybranych form ochrony przyrody (parki narodowe, parki krajobrazowe, rezerваты i obszary Natura 2000) i leśnych kompleksów (Ustawa 2016). Prezentowane są własne obliczenia autora.

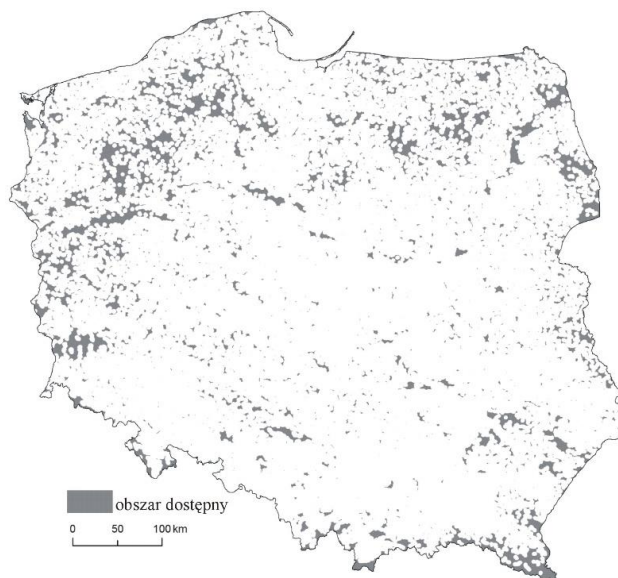
2.1.1. Zabudowa mieszkalna wraz z buforem

Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w Polsce, z uwzględnieniem strefy buforowej 2150 m od zabudowy mieszkalnej, wynosi 29 072 km² (rys. 4) i stanowi 9,3% powierzchni kraju.

Analizując rysunek 4, należy stwierdzić, że największej obszarów, na których można stawiać turbiny wiatrowe, biorąc pod uwagę konieczność zachowania minimalnej odległości od zabudowań, znajduje się w Polsce północnej i zachodniej.



8–10 grudnia 2021



Rysunek 4.

Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w Polsce, z uwzględnieniem zabudowy mieszkalnej i strefy buforowej 2150 m (opracowanie własne)

2.1.2. Formy ochrony przyrody i leśne kompleksy promocyjne wraz z buforem

Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w Polsce, z uwzględnieniem strefy buforowej 2150 m od takich form ochrony przyrody jak parki narodowe, parki krajobrazowe, rezerваты przyrody i obszary Natura 2000, oraz od leśnych kompleksów promocyjnych, wynosi 64 747 km² (rys. 5) i stanowi 20,8% powierzchni kraju.

2.1.3. Lasy wraz z buforem

Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w Polsce, z uwzględnieniem strefy buforowej 200 m od lasów (warunek wynikający z konieczności ochrony nie-toperzy), wynosi 135 870 km² (rys. 6) i stanowi 43,6% powierzchni kraju.

2.1.4. Wody powierzchniowe wraz z buforem

Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w Polsce, z uwzględnieniem sieci hydrograficznej i strefy buforowej 90 m (długość śmigła 75 m powiększona o dodatkowe 15 m) od wód powierzchniowych Buczkowski i in. 2014), wynosi 38 081 km² (rys. 7) i stanowi 12,2% powierzchni kraju.

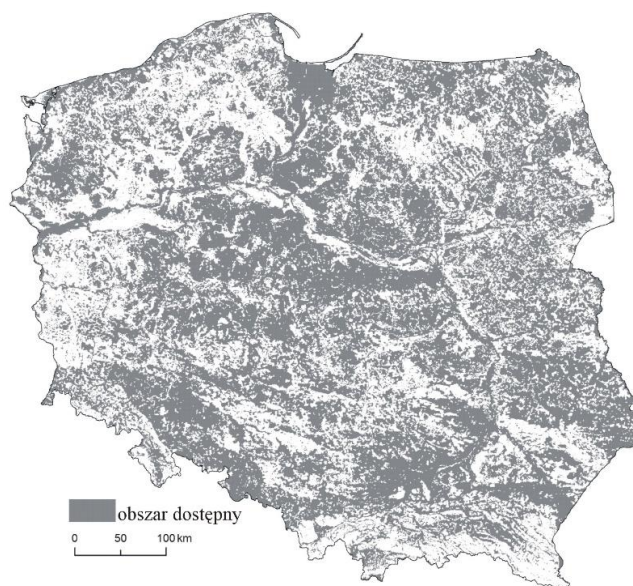


8–10 grudnia 2021



Rysunek 5.

Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w Polsce, z uwzględnieniem form ochrony przyrody i leśnych kompleksów promocyjnych oraz strefy buforowej 2150 m (opracowanie własne)

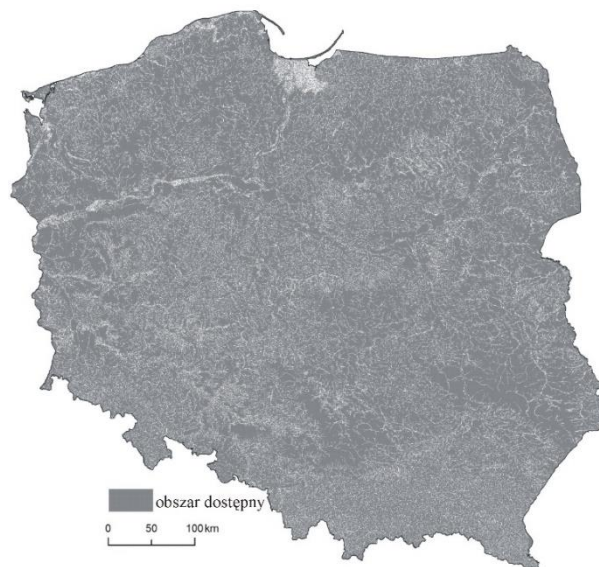


Rysunek 6.

Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w Polsce, z uwzględnieniem lasów i strefy buforowej 200 m (opracowanie własne)



8–10 grudnia 2021



Rysunek 7.

Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w Polsce, z uwzględnieniem wód powierzchniowych i strefy buforowej 90 m (opracowanie własne)

2.1.5. Infrastruktura wraz z buforem

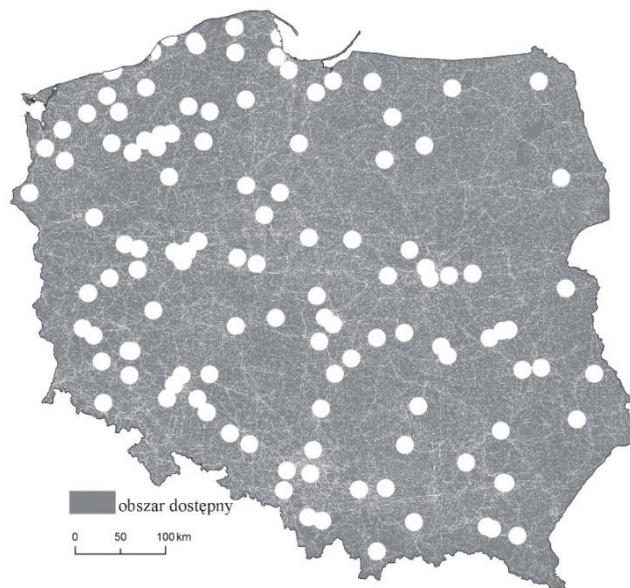
Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w Polsce, z uwzględnieniem sieci infrastruktury i strefy buforowej 90 m (długość śmigła 75 m powiększona o dodatkowe 15 m), wynosi 74 913 km² (rys. 8) i stanowi 24,0% powierzchni kraju.

2.1.6. Sumaryczny obszar dostępny dla rozwoju aeroenergetyki

Biorąc pod uwagę wszystkie kryteria ograniczające, powierzchnia obszarów wyłączonych z możliwości lokalizacji energetyki wiatrowej wynosi 311 657 km², czyli 99,92% powierzchni lądowej Polski, tj. 311 904 km² (rys. 9). Oznacza to, że pod budowę siłowni wiatrowych dostępne jest jedynie 247 km², tj. 0,02% terytorium naszego kraju. Dlatego też od momentu wprowadzenia ustawy odległościowej, aeroenergetyka w Polsce praktycznie w ogóle się nie rozwija.



8–10 grudnia 2021



Rysunek 8.

Obszar dostępny pod budowę siłowni wiatrowych w Polsce, z uwzględnieniem infrastruktury i strefy buforowej 90 m (opracowanie własne)



Rysunek 9.

Sumaryczny obszar dostępny dla rozwoju aeroenergetyki (opracowanie własne)



2.2. Metodyka obliczania potencjału technicznego energetyki wiatrowej w Polsce

Energia kinetyczna ruchu powietrza E_k [J] o masie m [kg] poruszającego się z prędkością v [m/s] określona jest znanym z mechaniki klasycznej wzorem (Igliński 2019):

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (1)$$

podczas gdy moc powietrza P_w przepływającego w czasie t wynosi:

$$P_w = \frac{E_k}{t} \quad (2)$$

Biorąc pod uwagę, że masa powietrza o gęstości ρ przepływającego w czasie t przez powierzchnię S (np. powierzchnię zakreślaną przez łopaty wirnika, tj. tzw. koło wiatrowe) jest równa:

$$m = \rho \cdot S \cdot v \cdot t \quad (3)$$

otrzymujemy wyrażenie na moc powietrza przepływającego przez koło wiatrowe:

$$P_w = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^3 \quad (4)$$

Gęstość powietrza jest uzależniona od aktualnych parametrów pogody, tj. temperatury i ciśnienia. Do obliczeń zwykle przyjmuje się średnią gęstość powietrza $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$. Równanie (5) przedstawia energię kinetyczną wiatru przepływającego przez jednostkową powierzchnię prostopadłą do kierunku wiatru w czasie t :

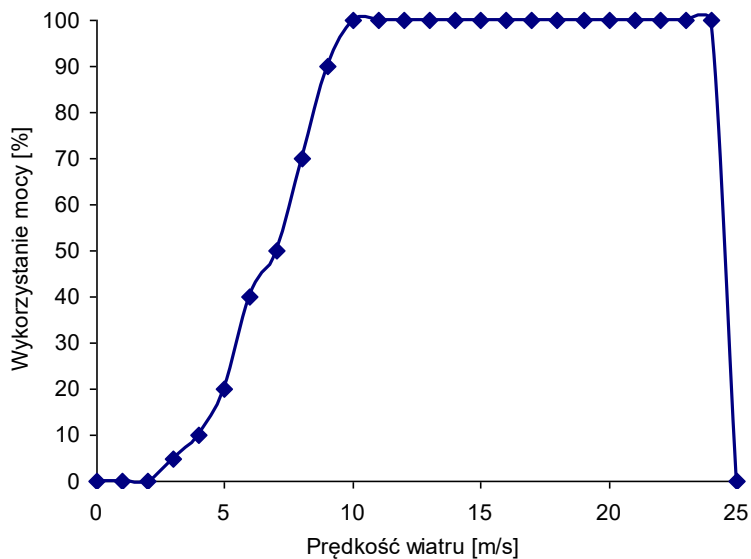
$$P_w = 0,625v^3 \quad (5)$$

W celu obliczenia ile energii można pozyskać z turbin wiatrowych, uzyskano z IMGW dane godzinowe odnośnie prędkości wiatrów (IMGW 2019). Przydzielono je do zbiorów: 0 m/s, 1 m/s, 2 m/s, 3 m/s itd. Przyjęto, że energetyczne wykorzystanie wiatru ma miejsce od 3 m/s, zaś pełną moc turbina osiąga przy 10 m/s. Przy prędkości 25 m/s i większej turbina jest wyłączana i nie jest produkowany prąd elektryczny (rys. 10).

Na rysunku 11 przedstawiono potencjał techniczny (z uwzględnieniem Ustawy odległościowej) energetyki wiatrowej w Polsce. Łączny potencjał w Polsce wynosi 14,7 PJ (4,1 TWh), przy czym największy jest w województwie lubelskim (2,5 PJ), mazowieckim (2 PJ) i wielkopolskim (2 PJ). Należy tu podkreślić, że złagodzenie przepisów Ustawy odległościowej znacznie zwiększyłoby potencjał techniczny aeroenergetyki w Polsce.

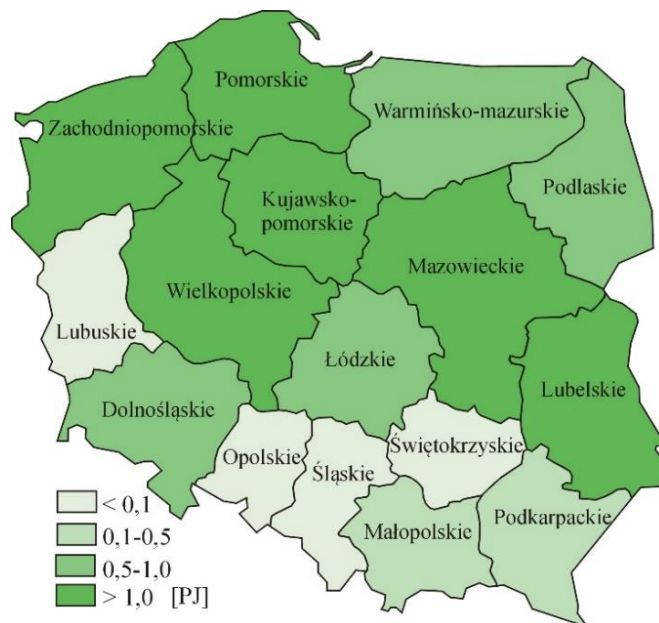


8–10 grudnia 2021



Rysunek 10.

Wykorzystanie mocy turbiny wiatrowej w funkcji prędkości wiatru (opracowanie własne)



Rysunek 11.

Roczny potencjał techniczny energetyki wiatrowej w Polsce (opracowanie własne)



3. Morska energetyka wiatrowa

Morska energetyka wiatrowa stanowi obecnie jeden z najszybciej rozwijających się rynków energetycznych na świecie. Najczęściej przytaczanymi czynnikami stymulującymi postęp są: korzystne warunki aerodynamiczne, które pozwalają na dość regularne i stabilne dostawy energii, co z kolei umożliwia generowanie stałych zysków, znacznie większa swoboda lokalizacyjna, co przy rozmiarach farm i samych wiatraków nie jest bez znaczenia, oraz umiarkowana akceptacja przez społeczności lokalne budowy i funkcjonowania tego typu konstrukcji (Czapliński 2016).

Na mocy ustawy o obszarach morskich Rzeczypospolitej Polskiej i administracji morskiej z dnia 21 marca 1991 r. (Ustawa 1991) turbiny wiatrowe mogą być lokalizowane w wyłącznej strefie ekonomicznej obszarów morskich Polski. Oznacza to minimalną odległość od linii brzegowej wynoszącą 12 mil morskich (około 22 km). Według wyliczeń Instytutu Morskiego w Gdańsku całkowita powierzchnia obszarów, na których można zlokalizować morskie farmy wiatrowe, wynosi 3590 km², jednak po uwzględnieniu uwarunkowań ekonomicznych (np. głębokość i odległość od lądu) należy go ograniczyć do około 2000 km² do roku 2030. Pozostałe obszary będą mogły zostać wykorzystane w dalszej perspektywie w miarę rozwoju nowych technologii fundamentowania i spadku kosztów inwestycji (Igliński i in. 2021).

Ministerstwo Transportu, Budownictwa i Gospodarki Morskiej w roku 2012 zamieściło w Internecie *Mapę potencjalnych miejsc przeznaczonych pod lokalizację farm wiatrowych w wyłącznej strefie ekonomicznej*. Obszary wskazane jako możliwe lokalizacje morskich farm wiatrowych na wysokości województwa pomorskiego zlokalizowane są w dwóch strefach:

- północnej, obejmującej południowo-zachodni stok Ławicy Środkowej – 501,61 km²,
- środkowej, obejmującej północny i wschodni stok Ławicy Słupskiej – 1363,86 km² (Mapa potencjalnych miejsc 2021).

W projekcie *Programu rozwoju morskiej energetyki wiatrowej i przemysłu morskiego*, przy uwzględnieniu dostępnego obszaru polskiej wyłącznej strefy ekonomicznej (2000 km² w perspektywie do 2030 r.), warunków wietrznych, produktywności oraz gęstości mocy zainstalowanej (6 MW/km²) potencjał teoretyczny oszacowano na poziomie 12 GW, z potencjałem wytwórczym wynoszącym około 48-56 TWh. Natomiast potencjał techniczny energetyki morskiej oszacowano na 7,4 GW do roku 2030 (rys. 12) (Mapa potencjalnych miejsc 2021).

Polska Grupa Energetyczna i duński Ørsted podpisały umowę inwestycyjną, której celem jest rozwój, budowa i eksploatacja dwóch morskich projektów wiatrowych na Morzu Bałtyckim o łącznej mocy około 2,5 GW. Chodzi o Elektrownię Wiatrową Baltica-3 o mocy ponad 1 GW oraz Elektrownię Wiatrową Baltica-2 o mocy około 1,5 GW. Baltica-2 i Baltica-3 kwalifikują się do uczestnictwa w 2021 r. w pierwszej fazie działania systemu wsparcia dla morskiej energetyki wiatrowej w Polsce dla farm o łącznej mocy wynoszącej 5,9 GW (Igliński i in. 2021).



Rysunek 12.
Potencjalne lokalizacje morskich farm wiatrowych w Polsce (opracowanie
własne za (Mapa potencjalnych miejsc 2021))

Baltica-2 Sp. z o.o. zawarła umowę o przyłączenie do Krajowej Sieci Przesyłowej w grudniu 2020 r. Baltica 3 Sp. z o.o. jest zaawansowanym projektem, z umową o przyłączenie zawartą w 2014 r. Termin przyłączenia jest wyznaczony na 31.12.2027 r. PGE jest kolejnym podmiotem, który wybiera partnera strategicznego do inwestycji w morskie farmy wiatrowe (Igliński i in. 2021).

Od 2018 r. Polenergia i Equinor współpracują w ramach spółek MFW Bałtyk III i MFW Bałtyk II, w których posiadają po 50% udziałów. W grudniu 2019 r. Equinor nabył 50% udziałów od Polenergii w trzecim projekcie MFW Bałtyk I. Wszystkie trzy projekty mają już umowy przyłączeniowe dotyczące około 3 GW mocy (Igliński i in. 2021).

W 2020 r. portugalski EDP Renewables i francuska spółka Engie zaprezentowali wspólny podmiot joint venture „Ocean Winds”.

W ostatnim czasie Polski Koncern Naftowy Orlen nawiązał współpracę z kanadyjską spółką Northland Power. Partnerzy będą współpracować przy realizacji projektu morskiej farmy wiatrowej o maksymalnej łącznej mocy do 1,2 GW, w ramach spółki celowej Baltic Power Sp. z o.o. (Igliński i in. 2021).

Uruchamianie morskich farm wiatrowych odbywać się będzie sukcesywnie. Oddana farma wiatrowa w fazie eksploatacyjnej ma funkcjonować przez co najmniej



25 lat i przez cały ten okres będzie generować wpływy finansowe do sektora finansów publicznych. Rozwój morskiej energetyki wiatrowej na morzu będzie generował nowe miejsca pracy. Już w trakcie rozwoju i budowy morskich farm wiatrowych potrzebnych będzie około 34 tysięcy etatów, zaś obsługa gotowych farm wiatrowych generować będzie około 29 tysięcy miejsc pracy. Zapotrzebowanie za kadrę pracowniczą wzrośnie nie tylko w sektorach związanych bezpośrednio z energetyką i branżą wiatrową, ale również w jednostkach administracji publicznej, budownictwie, finansach, transporcie, usługach itp. Oznacza to, że rozwój branży morskich farm wiatrowych ma szansę stać się nie tylko motorem rozwoju sektora morskiego, ale również innych sektorów gospodarki (PSEW 2020).

4. Dyskusja

Energetyka wiatrowa to sektor, który bardzo szybko rozwija się na świecie. Tylko w 2020 r. przybyło 93 GW nowych mocy, zaś łączna moc aeroenergetyki osiągnęła moc 743 GW. Krajem, w którym najszybciej rozwija się energetyka wiatrowa są Chiny – aż 52 GW mocy dodane tylko w 2020 r. Z kolei w krajach UE szybko rozwija się morska energetyka wiatrowa (offshore) – razem z Chinami osiągnęła moc 35 GW. Wszystko wskazuje, że mimo pandemii koronawirusa, rok 2021 będzie rekordowy i łączna nowa moc energetyki wiatrowej przekroczy 100 GW.

W Polsce do 2016 r. energetyka wiatrowa rozwijała się bardzo szybko, osiągając moc ponad 6 GW. Wprowadzona ustawa odległościowa (Ustawa 2016) praktycznie zahamowała rozwój aeroenergetyki w Polsce. Obliczony potencjał techniczny wskazuje, że zaledwie 0,02% powierzchni lądowej Polski spełnia wymogi ustawy odległościowej (Ustawa 2016). Sytuację poprawiły nieco wygrane aukcje, ale bez zmiany prawa nie można liczyć na dalszy rozwój lądowej energetyki wiatrowej w Polsce.

Duże nadzieje wiąże się w Polsce z morską energetyką wiatrową. W projekcie *Programu rozwoju morskiej energetyki wiatrowej i przemysłu morskiego*, przy uwzględnieniu dostępnego obszaru polskiej wyłącznej strefy ekonomicznej (2000 km² w perspektywie do 2030 r.), warunków wietrznych, produktywności oraz gęstości mocy zainstalowanej (6 MW/km²) potencjał teoretyczny oszacowano na poziomie 12 GW, z potencjałem wytwórczym wynoszącym około 48–56 TWh.

Obliczony łączny potencjał w Polsce wynosi 14,7 PJ (4,1 TWh), przy czym największy jest w województwie lubelskim (2,5 PJ), mazowieckim (2 PJ) i wielkopolskim (2 PJ). Należy tu podkreślić, że złagodzenie przepisów Ustawy odległościowej znacznie zwiększyłoby potencjał techniczny aeroenergetyki w Polsce.

Obecnie sektor energetyki wiatrowej w Polsce na tle sektora energetyki wiatrowej na świecie przeżywa od 5 lat stagnację. Liberalizacja ustawy odległościowej i rozwój morskiej energetyki wiatrowej powinny przyczynić się do znaczącego przyrostu mocy energetyki wiatrowej w Polsce. Energetyka wiatrowa wraz z innymi źródłami



energii odnawialnej pozwoli na transformację energetyczną Polski w kierunku źródeł energii nisko- i bezemisyjnych.

Wnioski

Energetyka wiatrowa odgrywa coraz większą rolę w światowym miksie energii – w 2020 r. przybyło 93 GW nowych mocy, osiągając łączną moc 743 GW.

Łączny potencjał energetyki wiatrowej w Polsce wynosi 14,7 PJ (4,1 TWh), przy czym największy jest w województwie lubelskim (2,5 PJ), mazowieckim (2 PJ) i wielkopolskim (2 PJ).

Liberalizacja ustawy odległościowej i rozwój morskiej energetyki wiatrowej powinny przyczynić się do znaczącego przyrostu mocy energetyki wiatrowej w Polsce.

Energetyka wiatrowa wraz z innymi źródłami energii odnawialnej pozwoli na transformację energetyczną Polski w kierunku źródeł energii nisko-i bezemisyjnych.

LITERATURA

- Buczkowski R., Igliński B. i Cichosz M. (2014) Technologie aeroenergetyczne. Wyd. UMK, Toruń.
- Chomać-Pierzecka E., Sobaczak A. i Soboń D. (2022) Wind Energy market in Poland in the background of the Baltic sea bordering countries in the era of the COVID-19 pandemic. *Energies* 15(7), DOI: 10.3390/en15072470.
- Czapliński P. (2016) Problemy rozwoju morskiej energetyki wiatrowej na południowym Bałtyku. *Prace Komisji Geografii Przemysłu Polskiego Towarzystwa Geologicznego* 3(30), 173–184.
- Haces-Fernandez F., Cruz-Mendoza M. i Li H. (2022) Onshore wind farm development: technologies and layouts. *Energies* 15(7), DOI: 10.3390/en15072381.
- Igliński B. (2019) Badanie sektora energii odnawialnej w Polsce: potencjał techniczny, badania ankietowe, analiza SWOT, analiza PEST. Wyd. UMK, Toruń.
- Igliński B., Iglińska A., Koziński G., Skrzatek M. i Buczkowski R. (2016) Wind energy in Poland – history, current state, surveys, renewable energy sources act, SWOT analysis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 64, 19–33.
- Igliński B., Kiełkowska U., Pietrzak M.B. i Skrzatek M. (2021) Energia odnawialna w województwie pomorskim. Wyd. UMK, Toruń 2022.
- IMGW, Dane godzinowe prędkości wiatru ze stacji meteorologicznych.
- Institut Energetyki Odnawialnej (2011) Energetyka wiatrowa – stan aktualny i perspektywy rozwoju w Polsce, Warszawa.
- Mapa potencjalnych miejsc (2021) [Online] www.mir.gov.pl/Gospodarka_Morska/Pozwolonia/Documents/Mapa_potencjalnych_miejsc_farmy_wiatrowe.pdf (Dostęp: 02.10.2021).
- PSEW (2021) Łądowa energetyka wiatrowa w Polsce, TPA Poland 2021.



8–10 grudnia 2021

- PSWE (2020) Wizja dla Bałtyku. Wizja dla Polski. Rozwój energetyki wiatrowej w basenie Morza Bałtyckiego.
- REN21 (2021) Renewables 2021, Global Status Report, Paris.
- Ustawa (1991) z dnia 21 marca 1991 o obszarach morskich Rzeczypospolitej Polskiej i administracji morskiej, Dz.U. 1991, Nr 32, poz. 131.
- Ustawa (2016) z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych, Dz.U. 2016, poz. 961.