

Wykorzystanie energii pochodzącej z farm wiatrowych do produkcji zielonego wodoru

Using energy from wind farms to produce green hydrogen

Bogdan Filar, Tadeusz Kwilosz, Mariusz Miziołek, Agnieszka Moska

Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy

STRESZCZENIE: Zatwierdzona 2 lutego 2021 r. Polityka energetyczna Polski do 2040 r. (PEP2040) zakłada duży wzrost udziału energii pochodzącej z OZE we wszystkich sektorach gospodarki. Zgodnie z prognozą w 2030 r. udział OZE w końcowym zużyciu energii brutto powinien wynieść co najmniej 23%. Projekt PEP2040 zakłada rozwój energetyki wiatrowej i fotowoltaicznej, co wpłynie na wzrost zainstalowanej mocy elektrowni wiatrowych do około 8–11 GW oraz fotowoltaicznych do około 10–16 GW. Zgodnie z danymi publikowanymi przez Rynek Elektryczny sumaryczna moc zainstalowanych OZE w Polsce na koniec sierpnia 2022 r. osiągnęła 20,9 GW. Należy podkreślić, że sumaryczna moc zainstalowana w całej polskiej energetyce (OZE i konwencjonalna) w sierpniu 2022 r. wynosiła 59 GW. Spośród elektrowni OZE największy udział miała fotowoltaika (11 GW), co stanowiło 19,2% ogółu zainstalowanych mocy. Natomiast sumaryczna moc elektrowni wiatrowych wynosiła 7,7 GW (13,3%). W publikacji podkreślono również, że w 2022 r. moc zainstalowanej fotowoltaiki wzrosła w porównaniu z rokiem 2021 o 84%, a elektrowni wiatrowych – o 12,7%. Powodem szybkiego rozwoju OZE jest duży wzrost ceny konwencjonalnych nośników energii (paliwa kopalne), który wpłynął na wzrost ceny energii elektrycznej. W czerwcu 2022 r. cena kontraktów na dostawy energii elektrycznej wynosiła około 884,68 PLN/MWh. Dla porównania cena referencyjna energii elektrycznej produkowanej w elektrowniach wiatrowych, na podstawie wyników aukcji przeprowadzonej przez Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki z grudnia 2021 r., wyniosła 250 PLN/MWh. Niestety produkcja prądu przez elektrownię wiatrową zależy od siły wiatru i cechuje się bardzo dużą zmiennością, często zmienia się z godziny na godzinę. Przykładowo w nocy elektrownie mogą pracować z mocą ponad 5 GW, a po południu wykorzystanie ich mocy będzie poniżej 1 GW. W związku z tym, że produkcja energii z OZE jest wysoce niestabilna, to jej nadwyżki powinny zostać zmagazynowane. Głównym celem publikacji jest określenie ilości wodoru, jaka może zostać wyprodukowana z nadwyżek energii pochodzących z elektrowni wiatrowej.

Słowa kluczowe: energia wiatrowa, wodór, energia odnawialna, farmy wiatrowe.

ABSTRACT: The Energy Policy of Poland until 2040 (EPP2040) approved on 2 February 2021 assumes a significant increase in the share of RES energy in all sectors of the economy. According to the prognosis, in 2030 the share of RES in gross final energy consumption should amount to at least 23%. The EPP2040 assumes that the development of wind and photovoltaic energy, will increase the installed capacity to approx. 8–11 GW (wind) and 10–16 GW (photovoltaic). According to the data published by the Rynek Elektryczny, the total installed capacity of RES in Poland reached 20.9 GW at the end of August 2022. It should be noted that the total installed capacity of the entire Polish energy sector (RES and conventional) in August 2022 was 59 GW. Among power plants classified as RES, the largest share was held by photovoltaics (11 GW), which accounted for 19.2% of the total installed capacity. The total capacity of wind farms was 7.7 GW (13.3%). The publication also emphasizes that in 2022, the installed capacity of photovoltaics, compared to 2021, increased by 84%, and wind farms by 12.7%. The rapid development of RES can be attributed a large increase in the price of conventional energy carriers (fossil fuels), which led to a rise in electricity prices. In June 2022, the price of electricity supply contracts was approximately PLN 884.68/MWh. For comparison, the reference price of electricity produced in wind farms, based on the results of the auction conducted by the President of the Energy Regulatory Office in December 2021, was PLN 250/MWh. Unfortunately, electricity production from wind farms depends on wind strength and characterized by high variability, often changing from hour to hour. For example, at night wind farms can operate with a capacity of over 5 GW, but in the afternoon their capacity utilization may be below 1 GW. As energy production from RES is highly unstable, its surpluses should be stored. The main purpose of this publication is to determine the amount of hydrogen that can be produced from surplus energy from a wind farm.

Key words: wind energy, hydrogen, renewable energy, wind farms.

Ilość energii produkowanej przez farmę wiatrową w ciągu roku

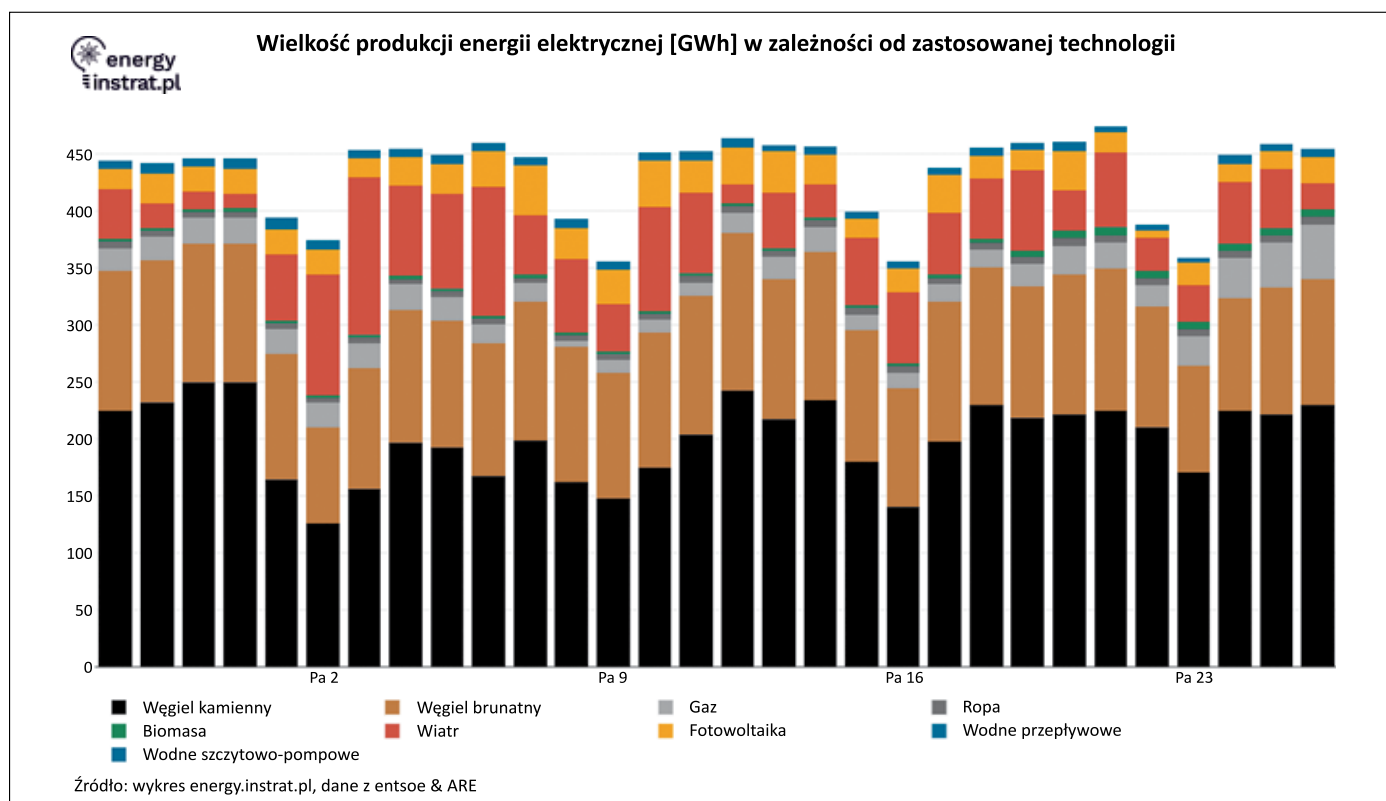
Ilość energii wyprodukowanej przez farmę wiatrową zależy od jej mocy, od prędkości wiejącego wiatru, stopnia wykorzystania mocy oraz czasu, przez jaki może pracować w ciągu roku. Opracowanie modelu, który posłuży do określenia ilości energii możliwej do wyprodukowania przez farmę wiatrową, jest trudne, gdyż siła wiatru oraz czas jego występowania charakteryzuje się dużą zmiennością (rysunek 1).

Rysunek 1 przedstawia ilość energii elektrycznej wyprodukowanej w dniach 1.10–26.10.2022 r. w Polsce w rozbiciu na zastosowaną technologię produkcji energii. Na wykresie można zauważyć bardzo dużą dobową zmienność ilości energii produkowanej przez elektrownie wiatrowe, która wahała się od 15 GWh do 138 GWh. Dodatkowo produkcja energii elektrycznej przez farmy wiatrowe charakteryzuje się dużą zmiennością godzinową. Dobrym tego przykładem są ilości energii wyprodukowanej przez farmy wiatrowe w poszczególnych godzinach w dniu 26.10.2022 r. Zgodnie z danymi farmy wiatrowe wyprodukowały najwięcej energii (około 1,9 GWh) w pierwszej godzinie doby, natomiast najmniej (około 0,3 GWh) zostało wyprodukowane w okresie od godziny 14 do 15 (rysunek 2).

W skrajnym przypadku może dojść do blackout, czyli automatycznego wyłączenia systemu elektroenergetycznego, gdy wiatr przestanie wiać. W sierpniu 2019 r. we wschodniej Anglii doszło do blackout, który pozbawił prądu setki tysięcy ludzi (Krzemiński, 2019). Prądu nie było tylko przez godzinę, ale skutki okazały się katastrofalne.

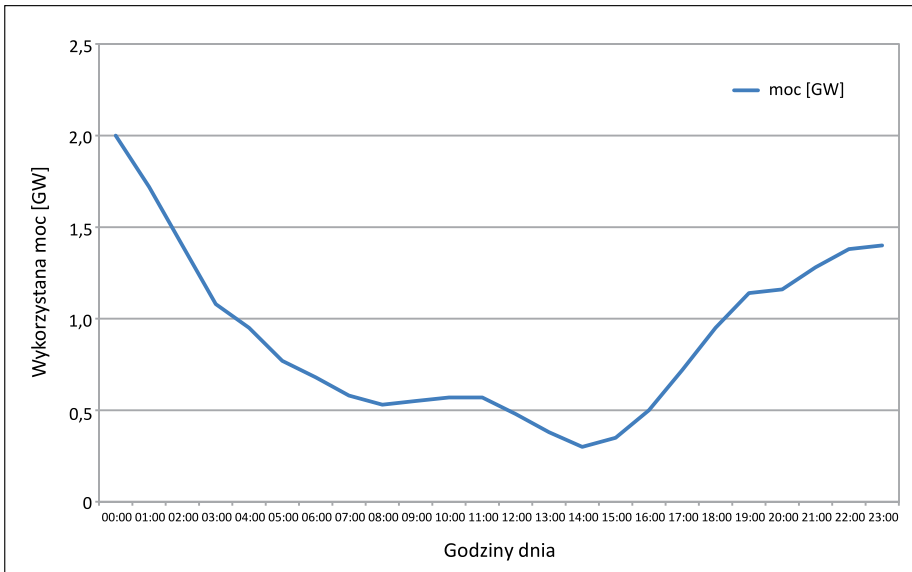
Autorzy analizy, bazując na danych z ENTSO i ARE, opracowali matematyczny model pozwalający na obliczenie ilości energii, która może zostać wyprodukowana przez elektrownię wiatrową o dowolnej mocy. W tym celu wykorzystano dane publikowane dla trzech farm wiatrowych, zlokalizowanych na terenach nadmorskich: Marszewa, Lotniska i Karścina (Rynek Elektryczny, 2022).

Farma wiatrowa Marszewo (województwo zachodniopomorskie) została oddana do użytku w 2013 r. Zbudowana jest z 50 turbin o łącznej mocy 100 MW. Prognozowana roczna produkcja energii wynosi około 220 GWh (Tauron, 2013). Moc farmy wiatrowej Lotnisko wynosi 94,50 MW, a jej prognozowana roczna produkcja energii elektrycznej to 195 GWh. Natomiast moc farmy wiatrowej Karścino wynosi 90 MW. Zgodnie z prognozą farma wytwarza około 170 GWh energii elektrycznej rocznie. Bazując na przedstawionych danych, wykonano wykres, na którym prognozowana ilość produkowanej energii zależy od mocy danej farmy (rysunek 3). Wykres



Rysunek 1. Produkcja energii elektrycznej w październiku 2022 r. z rozbiciem na źródła surowców (źródło: https://energy.instrat.pl/generation_by_fuel)

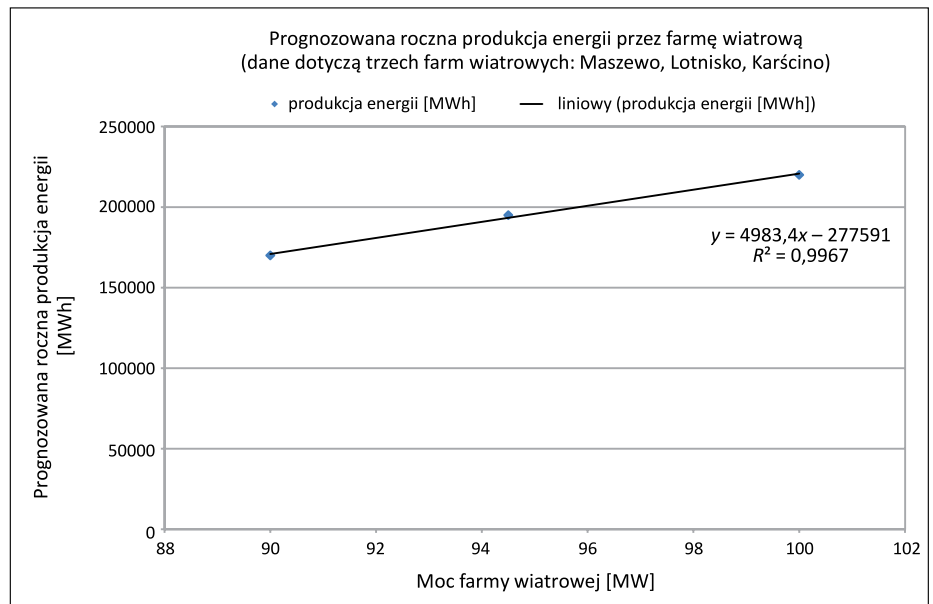
Figure 1. Electricity production in October 2022, broken down by raw material sources (Source: https://energy.instrat.pl/generation_by_fuel)



Rysunek 2. Moc farm wiatrowych wykorzystana do produkcji energii elektrycznej w Polsce w dniu 26.10.2022 r. (źródło: <https://windeurope.org/about-wind/daily-wind/>)
Figure 2. Wind farm capacity used for electricity generation in Poland on October 26, 2022 (Source: <https://windeurope.org/about-wind/daily-wind/>)

Rysunek 3. Ilość energii wyprodukowanej przez wybrane instalacje wiatrowe w Polsce

Figure 3. Amount of energy produced by selected wind installations in Poland



pozwoił na określenie zależności (linowej) pomiędzy mocą a prognozowaną roczną ilością produkowanej energii.

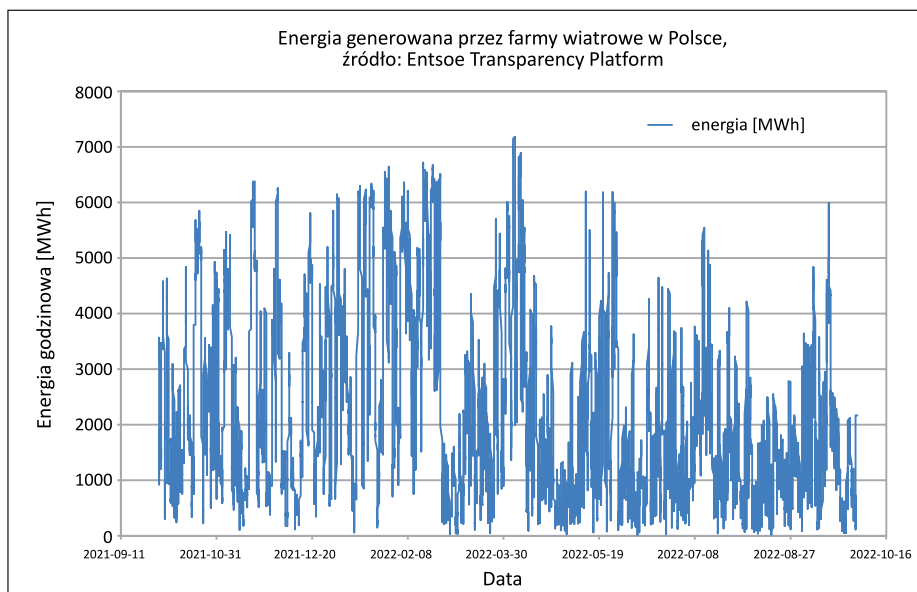
W następnym kroku określono ilość energii, jaka może zostać wyprodukowana przez farmę wiatrową w poszczególnych miesiącach roku. W tym celu wykonano analizę rzeczywistej produkcji energii przez farmy wiatrowe w Polsce. Dane przedstawione w rozdzielczości godzinowej dla okresu od października 2021 r. do września 2022 r. potwierdziły dużą niestabilność produkcji energii farm wiatrowych w ciągu ostatnich 12 miesięcy (rysunek 4).

W związku z tym zdecydowano się wykonać analizę dotyczącą ilości energii elektrycznej możliwej do wyprodukowania przez elektrownie wiatrowe, opierając się na danych pochodzących z ostatnich pięciu lat (2018–2022) (rysunek 5).

Na wykresie przedstawiono dane publikowane przez platformę ENTSOE. Można zauważyć, że pomimo dużej zmienności

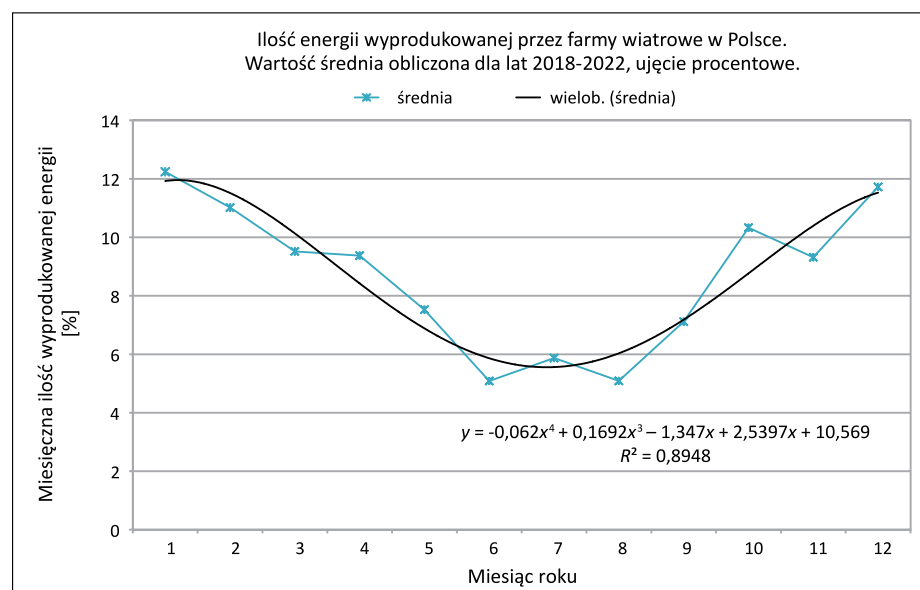
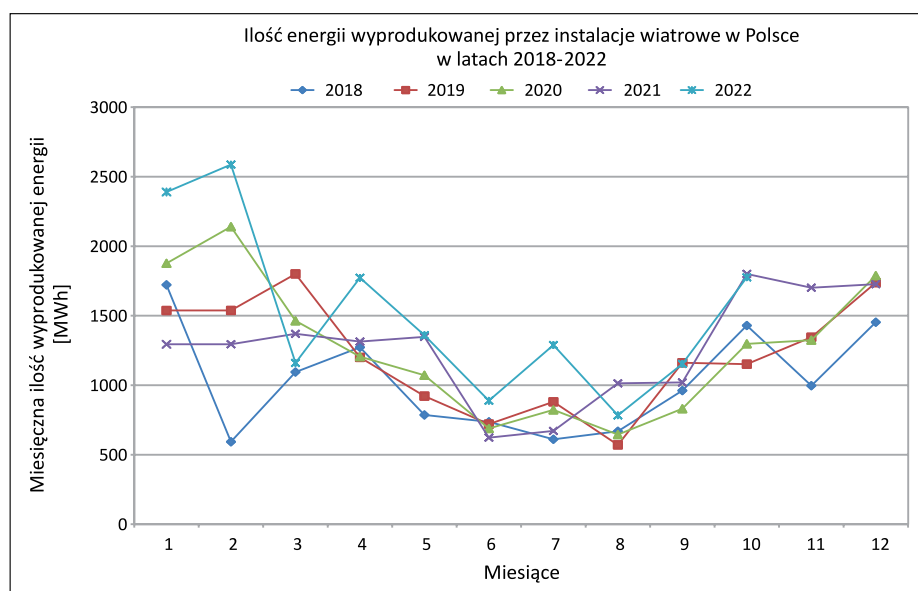
dane w poszczególnych latach w analogicznych miesiącach roku układają się w wyraźny trend. Z drugiej strony należy pamiętać o tym, że w okresie od 2018 r. do 2022 r. moc elektrowni wiatrowych wzrosła z 5,8 GW do 7,9 GW. W związku z tym bezpośrednie porównanie ilości generowanej energii przez farmy wiatrowe w poszczególnych latach nie jest miarodajne, gdyż różnica pomiędzy mocą zainstalowaną w 2018 r. (5,8 GW) a mocą zainstalowaną w 2022 r. (7,9 GW) wynosi około 36%. Z tego powodu autorzy zdecydowali się wykonać wykres produkowanej energii w poszczególnych miesiącach roku w ujęciu procentowym (rysunek 6).

Rysunek 6 przedstawia wykres średniej (z lat 2018–2022) procentowej zmienności produkcji energii dla każdego miesiąca w roku. Na wykresie pokazana jest również linia trendu, która posłużyła do obliczenia prognozowanej ilości energii, jaka będzie wyprodukowana przez elektrownię wiatrową o dowolnej



Rysunek 4. Ilość energii wyprodukowanej przez instalacje wiatrowe w Polsce (źródło: <https://transparency.entsoe.eu/>)
Figure 4. Amount of energy produced by wind installations in Poland (Source: <https://transparency.entsoe.eu/>)

Rysunek 5. Miesięczna ilość energii wyprodukowanej przez instalacje wiatrowe w Polsce
Figure 5. Monthly amount of energy produced by wind installations in Poland



Rysunek 6. Zmiany średniej ilości energii wyprodukowanej przez instalacje wiatrowe w Polsce w latach 2018–2022, ujęcie procentowe
Figure 6. Changes in the average amount of energy produced by wind installations in Poland in 2018–2022, percentages

mocy. Bazując na opracowanej zależności pomiędzy mocą elektrowni wiatrowej a jej produkcją energii w roku, rozbitą na poszczególne miesiące, obliczono ilość energii, jaka może zostać wyprodukowana przez FW o mocy 10 MW (tabela 1). Prognoza wykazała, że najwięcej energii zostanie wyprodukowane w styczniu (2,6 GWh), a najmniej – w lipcu (1,2 GWh). Natomiast prognozowana sumaryczna produkcja energii elektrycznej dla całego roku wyniesie około 22 GWh.

Tabela 1. Prognozowana miesięczna produkcja energii przez elektrownię wiatrową o mocy 10 MW

Table 1. Forecasted monthly energy production by a 10 MW wind farm

Miesiąc	Moc instalacyjna	Energia	Energia
	[MW]	[%]	[MWh]
1	10	11,73	2579,65
2	10	11,32	2489,48
3	10	9,93	2185,11
4	10	8,22	1808,05
5	10	6,67	1467,07
6	10	5,63	1238,20
7	10	5,29	1164,75
8	10	5,71	1257,26
9	10	6,79	1493,56
10	10	8,27	1818,74
11	10	9,75	2145,15
12	10	10,69	2352,42
Suma:		100,00	21 999,43

Obliczenie ilości wodoru, jaka może zostać wyprodukowana przez elektrownię wiatrową

Autorzy założyli, że wodór będzie produkowany z nadmiarowej, dotychczas niewykorzystywanej energii (Godula-Jopek, 2015). Nadmiarowa ilość energii, jaka może zostać użyta do produkcji zielonego wodoru, została obliczona z wykorzystaniem matematycznego modelu „produkcji” energii przez instalację wiatrową. Autorzy wykonali obliczenia dla największej farmy wiatrowej w Polsce, która znajduje się w Potęgowie (CIRE 24, 2020). FW Potęgowo posiada moc 219 MW (Zielona Gospodarka, 2022). W pierwszej kolejności obliczono ilości energii, jaka zostanie wyprodukowana przez elektrownię w poszczególnych miesiącach roku. Następnie obliczono ilość nadmiarowej energii, która zostanie użyta do wyprodukowania wodoru, zakładając, że wynosi ona 10% możliwości produkcyjnych. W analizie założono również, że nadwyżki energii wystąpią w okresie od kwietnia do września, czyli w miesiącach o obniżonym zapotrzebowaniu na

energię. W końcowym etapie obliczono ilości wodoru, który może zostać wyprodukowany od początku kwietnia do końca września. Wyniki obliczeń wykonanych dla największej farmy wiatrowej przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Szacunkowa produkcja wodoru obliczona dla elektrowni Potęgowo

Table 2. Estimated hydrogen production calculated for the Potęgowo power plant

Miesiąc	Moc instalacji	Produkcja instalacji	Produkcja nadmiarowa	Produkcja H ₂
	[MW]	[MWh/mies.]	[MWh/mies.]	[Nm ³ /mies.]
1	219	56494,42	5649,44	1 247 117,44
2	219	54 519,52	5451,95	1 203 521,51
3	219	47 853,82	4785,38	1 056 375,75
4	219	39 596,25	3959,63	874 089,43
5	219	32 128,83	3212,88	709 245,76
6	219	27 116,67	2711,67	598 601,93
7	219	25 507,94	2550,79	563 089,13
8	219	27 533,91	2753,39	607 812,50
9	219	32 708,92	3270,89	722 051,22
10	219	39 830,41	3983,04	879 258,41
11	219	46 978,87	4697,89	1 037 061,21
12	219	51 517,91	5151,79	1 137 260,72
Suma, cały rok		481 787,47	48 178,75	10 635 485,01
Suma, IV–IX		184 592,52	18 459,25	4 074 889,97

Można zauważyć, że elektrownia Potęgowo o mocy 219 MW, w ciągu całego roku, zgodnie z prognozą, wyprodukuje około 482 GWh (Rynek Elektryczny, 2021). Największa ilość energii zostanie wyprodukowana w styczniu (56,5 GWh), a najmniejsza w lipcu (25,5 GWh). Na uwagę zasługuje fakt, że w odróżnieniu od elektrowni fotowoltaicznej najwięcej energii (zgodnie z prognozą) zostanie wyprodukowane w miesiącach zimowych (od grudnia do marca). Natomiast prognozowana ilość energii wyprodukowanej w miesiącach od kwietnia do września wyniesie około 185 GWh. W związku z tym ilość nadmiarowej energii wyprodukowanej w miesiącach od kwietnia do września wyniesie około 18,5 GWh (10%). W bieżącej analizie przyjęto, że produkcja wodoru będzie odbywać się z wykorzystaniem elektrolizera firmy NEL. Zgodnie z danymi producenta wyprodukowanie 1 Nm³ wodoru wymaga dostarczenia energii elektrycznej w ilości 4,53 kWh. Należy podkreślić, że sprawność elektrolizerów wynosi obecnie od 50% do 86% – w zależności od zastosowanej technologii (Kotowicz i Szykowska, 2021). Wykonane obliczenia wykazały, że wykorzystanie 10% nadmiarowej energii, w okresie od kwietnia do września, pozwoli na wyprodukowanie około 4 mln m³ wodoru (tabela 2). Trzeba zaznaczyć, że obliczenia mają charakter szacunkowy.

Podsumowanie

W ostatnich latach w Polsce następuje szybki wzrost mocy zainstalowanych OZE (Derski, 2022). Na koniec sierpnia 2022 r. moc wszystkich OZE wynosiła 20,9 GW (Rynek Elektryczny, 2022). Powodem szybkiego rozwoju OZE jest duży wzrost ceny konwencjonalnych nośników energii (paliwa kopalne), wpływający na wzrost ceny energii elektrycznej. Dobrym tego przykładem jest cena kontraktów na rynku energii elektrycznej. W czerwcu 2022 r. cena kontraktów na dostawę energii elektrycznej wynosiła około 884,68 PLN/MWh. Dla porównania cena referencyjna energii elektrycznej produkowanej w elektrowniach wiatrowych, na podstawie wyników aukcji przeprowadzonej przez Prezesa Urzędu Regulacji Energetyki z grudnia 2021 r., wyniosła 250 PLN/MWh (Gajowiecki et al., 2022). Niestety produkcja prądu przez elektrownię wiatrową charakteryzuje się bardzo dużą zmiennością, często zmienia się z godziny na godzinę. Przykładowo w nocy elektrownie mogą pracować z mocą ponad 5 GW, a po południu wykorzystanie ich mocy może być poniżej 1 GW (Rynek Elektryczny, 2022). W związku z tym, że produkcja energii z OZE jest wysoce niestabilna, to jej nadwyżki powinny zostać wykorzystane. Głównym celem bieżącej analizy było szacunkowe określenie ilości nadwyżek energii, które mogą zostać użyte do produkcji zielonego wodoru. Autorzy obliczyli szacunkową ilość wodoru, jaką można byłoby wyprodukować (w miesiącach od kwietnia do września) z nadmiarowej energii wytworzonej przez największą (listopad 2022 r.) elektrownię wiatrową w Polsce – FW Potęgowo. Przeprowadzone obliczenia wykazały, że największa farma wiatrowa w Polsce mogłaby wyprodukować, z „nadmiarowej” energii, około 4 mln m³ zielonego wodoru. Należy podkreślić, że budowane ostatnio w Polsce morskie elektrownie wiatrowe pozwolą na produkcję większej

ilości energii elektrycznej niż lądowe (morskie wiatraki mogą pracować z całą mocą przez 30% do 50% czasu w roku, natomiast lądowe tylko do 40%), stąd można oczekiwać uzyskania jeszcze większych ilości „nadmiarowej” energii w systemie energetycznym Polski, a tym samym zielonego wodoru.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Wykorzystanie energii pochodzącej z farm wiatrowych do produkcji zielonego wodoru*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0033/KP/2022, nr archiwalny: DK-4100-0033/2022.

Literatura

- CIRE 24, 2020. Powstała największa farma wiatrowa w Polsce. *Serwis Informacyjny CIRE 24*.
- Derski B., 2022. Moc fotowoltaiki w Polsce przekroczyła 10 GW. 20 lat wcześniej niż zakładał rząd. *Wysokie Napięcie*. <<https://wysokienapiecie.pl/73113-moc-fotowoltaiki-w-polsce/>> (dostęp: 16.05.2023).
- Gajowiecki J., Sztuba W., Lasocki K., 2022. Polska energetyka wiatrowa 4.0. Raport 2022. *TPA Poland / Baker Tilly TPA*.
- Godula-Jopek A., 2015. Hydrogen Production: by Electrolysis. *Wiley-VCH*. DOI: 10.1002/9783527676507.
- Kotowicz J., Szykowska K., 2021. Wodór i współczesne metody jego produkcji oraz wykorzystania. *Rynek Energii*, 2: 23–29.
- Krzemiński J., 2019. Energetyczna rewolucja: czekają nas problemy czy świetlana przyszłość? <<https://www.obserwatorfinansowy.pl/bez-kategorii/rotator/energetyczna-rewolucja-czekaja-nas-problemy-czy-swietlana-przyszlosc/>> (dostęp: 16.05.2023).
- Rynek Elektryczny, 2021. Największe farmy wiatrowe w Polsce. <<https://www.rynekelektryczny.pl/najwieksze-farmy-wiatrowe-w-polsce/>> (dostęp: 16.05.2023).
- Rynek Elektryczny, 2022. Moc zainstalowana farm wiatrowych w Polsce. <<https://www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-farm-wiatrowych-w-polsce/>> (dostęp: 16.05.2023).
- Tauron, 2013. Elektrownie wiatrowe. <<https://www.tauron-ekoenergia.pl/elektrownie/energia-wiatrowa/>> (dostęp: 16.05.2023).
- Zielona Gospodarka, 2022. <<https://zielonagospodarka.pl/na-pomorz-u-uruchomiono-najwieksza-farme-fotowoltaiczna-w-tej-czesci-europy-8842>> (dostęp: 16.05.2023).



Mgr inż. Bogdan FILAR
Starszy specjalista badawczo-techniczny; Kierownik Zakładu Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: bogdan.filar@inig.pl



Mgr Mariusz MIZIOŁEK
Starszy specjalista badawczo-techniczny w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: mariusz.mizolek@inig.pl



Dr Tadeusz KWIŁOSZ
Adiunkt w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: tadeusz.kwilosz@inig.pl



Dr Agnieszka MOSKA
Adiunkt w Zakładzie Podziemnego Magazynowania Gazu
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy
ul. Lubicz 25 A
31-503 Kraków
E-mail: agnieszka.moska@inig.pl