

## Ocena kosztów produkcji wodoru z wykorzystaniem energii pochodzącej z instalacji fotowoltaicznej wybudowanej w Polsce

### Assessment of hydrogen production costs with the use of energy from a photovoltaic installation build in Poland

Bogdan Filar, Mariusz Miziołek, Tadeusz Kwilosz

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** W 2020 r. Komisja Europejska (KE) ogłosiła strategię wodorową spójną z założeniami Europejskiego Zielonego Ładu. Strategia zakłada ograniczenie wykorzystania paliw kopalnych do produkcji energii i zastępowanie ich energią odnawialną (OZE), produkowaną głównie przez farmy wiatrowe oraz solarne. Sumaryczna moc uruchomionych instalacji fotowoltaicznych (PV) w Polsce w listopadzie 2021 r. osiągnęła wartość 7,1 GW. Obecnie największą elektrownią fotowoltaiczną w Polsce jest elektrownia o mocy 70 MW wybudowana przez ZE PAK w Brudzewie. Nadwyżki energii pochodzącej z OZE mogłyby zostać wykorzystane do produkcji tzw. zielonego wodoru. W publikacji przedstawiono wyniki analizy, której celem było określenie szacunkowych kosztów produkcji wodoru przez elektrolizer zasilany energią pochodzącą z farmy fotowoltaicznej (PV). W przeprowadzonej analizie założono, że wodór będzie produkowany przez elektrolizer PEM o mocy 2,5 MW. W związku z tym, że ilość produkowanej energii jest zmienna w czasie, to ilość produkowanego wodoru obliczono dla instalacji o mocy zmieniającej się w zakresie 7–11 MW. Zakres minimalny wielkości instalacji był tak dobrany, aby w czerwcu (najlepszym miesiącu dla fotowoltaiki w Polsce) elektrolizer mógł pracować z całą mocą. Natomiast górny zakres mocy instalacji, wynoszący 11 MW, został określony w taki sposób, aby elektrolizer pracował z maksymalną mocą od marca do października. Obliczenia wykazały, że instalacja o mocy 7 MW pozwoli wyprodukować około 1,34 mln  $m_n^3$  wodoru, podczas gdy instalacja o mocy 11 MW może wyprodukować około 1,7 mln  $m_n^3$  wodoru. W dalszej kolejności obliczono nakłady inwestycyjne dla wszystkich wariantów budowy instalacji fotowoltaicznej. Koszt budowy instalacji o mocy 7–11 MW zmienił się w przedziale 34,4–44,7 mln zł. Natomiast roczne koszty operacyjne eksploatacji instalacji o mocy 7–11 MW zmieniły się w przedziale 1,19–1,4 mln zł. W dalszej kolejności obliczono koszt wyprodukowania 1  $m_n^3$  wodoru, zakładając eksploatację całej instalacji przez 20 lat. Koszt produkcji 1  $m_n^3$  wodoru uzyskano dzieląc sumę zdyskontowanych kosztów inwestycyjnych i operacyjnych, uzyskaną w okresie 20 lat, przez sumę zdyskontowanej ilości wyprodukowanego wodoru. Obliczenia wykazały, że optymalna instalacja PV dla elektrolizera o mocy 2,5 MW posiada moc 9 MW. Koszt produkcji wodoru obliczony dla instalacji PV o mocy 9 MW wyniósł 3,17 zł/ $m_n^3$ .

Słowa kluczowe: wodór, fotowoltaika, energia OZE.

**ABSTRACT:** In 2020, the European Commission (EC) announced a hydrogen strategy consistent with the principles of the European Green Deal. The strategy assumes limiting the use of fossil fuels for energy production and replacing them with renewable energy (RES) produced mainly by wind and solar farms. The power of launched photovoltaic (PV) installations in Poland in November 2021 reached a total value of 7.1 GW. Currently, the largest photovoltaic power plant in Poland is the one built by ZE PAK in Brudzewo with a capacity of 70 MW. Surplus energy from RES could be used to produce “green” hydrogen. This publication presents the results of the analysis aimed at determining the estimated costs of hydrogen production by an electrolyser powered by energy from a photovoltaic (PV) farm. In the conducted analysis, it was assumed that hydrogen will be produced by the PEM electrolyser with a capacity of 2.5 MW. Since the amount of produced energy varies with time, the amount of produced hydrogen was calculated for installations with a capacity of 7–11 MW. The minimum installation size was selected so as to allow the electrolyser to operate at full capacity in June (the best month for photovoltaics in Poland). On the other hand, the upper power range of the installation, amounting to 11 MW, was defined in such a way so as to allow the electrolyser to operate at maximum power from March to October. Calculations have shown that the 7 MW installation will produce approximately 1.34 million  $m_n^3$  of hydrogen, while an 11 MW plant can produce about 1.7 million  $m_n^3$  of hydrogen. Subsequently, the investment outlays were calculated for all variants of building a photovoltaic installation. The cost of building the installation with a capacity of 7–11 MW varied in the range of PLN 34.4–44.7 million. On the other hand, the annual operating costs for the operation of installations with a capacity of 7–11 MW varied in the range of PLN 1.19–1.4 million. Subsequently, the cost of producing 1  $m_n^3$  of hydrogen was calculated, assuming the operation of the entire installation for 20 years.

Autor do korespondencji: B. Filar, e-mail: [bogdan.filar@inig.pl](mailto:bogdan.filar@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 07.02.2022 r. Zatwierdzono do druku: 02.06.2022 r.

The cost of producing 1 m<sub>n</sub><sup>3</sup> of hydrogen was obtained by dividing the sum of discounted investment and operating costs obtained over a period of 20 years by the sum of the discounted amount of produced hydrogen. The calculations showed that the optimal size of the PV installation for a 2.5 MW electrolyser has a capacity of 9 MW. The cost of hydrogen production, calculated for a 9 MW PV installation, was PLN 3.17 m<sub>n</sub><sup>3</sup>.

Key words: hydrogen, photovoltaics, renewable energy.

## Wstęp

W 2020 r. Komisja Europejska (KE) ogłosiła strategię wodorową spójną z założeniami Europejskiego Zielonego Ładu. Strategia zakłada ograniczenie wykorzystania paliw kopalnych do produkcji energii i zastępowanie ich energią odnawialną (OZE), produkowaną głównie przez farmy wiatrowe oraz solarne (Ciechanowska, 2020). Sumaryczna moc uruchomionych instalacji fotowoltaicznych (PV) w Polsce w listopadzie 2021 r. osiągnęła wielkość wynoszącą 7,1 GW (Rynek Elektryczny, 2022). Duża moc zielonej energii z jednej strony wpływa na redukcję emisji CO<sub>2</sub>, a z drugiej – na rosnącą niestabilność pracy całego systemu energetycznego. Nadwyżki energii pochodzącej z OZE mogłyby zostać wykorzystane do produkcji tzw. zielonego wodoru (Raballo et. al., 2010). W niniejszej publikacji przedstawiono wyniki analizy, której celem było określenie szacunkowych kosztów produkcji wodoru przez elektrolizer zasilany energią pochodzącą z farmy fotowoltaicznej (PV).

## Farmy fotowoltaiczne w Polsce

Moc zainstalowanych instalacji fotowoltaicznych w Polsce na koniec listopada 2021 roku wyniosła blisko 7,1 GW (Rynek Elektryczny, 2022). Zgodnie z danymi opublikowanymi przez Enerad – na koniec listopada 2021 roku 76% wszystkich instalacji PV stanowiły instalacje o mocy nie większej niż 50 kW (Biernaciak, 2022). Obecnie największą elektrownią fotowoltaiczną w Polsce jest elektrownia wybudowana przez ZE PAK w Brudzewie w województwie wielkopolskim. Elektrownia ta składa się ze 155 554 modułów fotowoltaicznych o mocy 455 W każdy. Elektrownia, o sumarycznej mocy wynoszącej około 70 MW, zajmuje teren o powierzchni 100 ha, a została oddana do eksploatacji 28.10.2021 r. Należy podkreślić, że elektrownię słoneczną wybudowano na terenie wykorzystywanym przez Kopalnię Węgla Brunatnego Adamów. Koszt inwestycji wyniósł 163,8 mln zł netto (Polsat News, 2021). Farma fotowoltaiczna w Brudzewie będzie produkować rocznie około 68 188 MWh, co przełoży się na zmniejszenie emisji



**Rysunek 1.** Farma fotowoltaiczna w Brudzewie (źródło: materiały prasowe Polsat News)

**Figure 1.** Solar farm in Brudzewo, source: Polsat News press materials

CO<sub>2</sub> na poziomie wynoszącym około 56,7 tysiąca ton rocznie. Rysunek 1 przedstawia zdjęcie farmy fotowoltaicznej w Brudzewie.

W artykule pt. *Największe farmy fotowoltaiczne w Polsce* (Enerad, 2021) przedstawiono listę największych farm fotowoltaicznych (tabela 1).

**Tabela 1.** Największe farmy fotowoltaiczne w Polsce

**Table 1.** The largest photovoltaic farms in Poland

Farma	Województwo	Moc [MW]	Rok	Właściciel
Brudzewo	wielkopolskie	70,0	2021	ZE PAK
Białczyk	wielkopolskie	64,6	2020	BayWa r.e.
Jaworzno	śląskie	5,0	2020	Tauron
Czernikowo	kujawsko-pomorskie	3,8	2015	Energa
Bierutów	dolnośląskie	2,1	2018	EnergiaLine
Cieszanów	podkarpackie	2,0	2014	Stowarzyszenie Horyzonty

Porównując wielkość elektrowni PV w Polsce z największą farmą fotowoltaiczną w Europie, działającą w Hiszpanii, należy zauważyć, że obiekty PV w Polsce są stosunkowo niewielkie, gdyż hiszpańska farma PV Núñez de Balboa posiada moc 500 MW, co pozwala na produkcję 832 GWh energii w ciągu roku. Natomiast światowym liderem wielkości jest farma zlokalizowana w Indiach. Farma Bhadla Solar Park posiada moc 2,25 GW. Farma indyjska zbudowana jest na działce o wielkości 57 km<sup>2</sup>.

### Ilość energii produkowanej przez instalację fotowoltaiczną (PV)

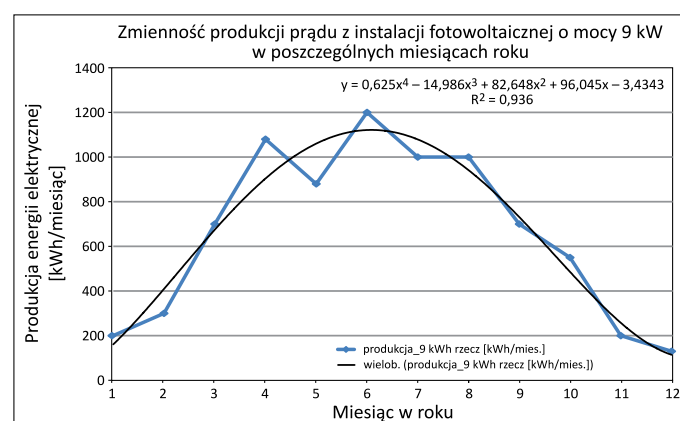
Ilość energii wyprodukowanej przez farmę fotowoltaiczną zależy od jej mocy oraz nasłonecznienia, które znacząco zmienia się w poszczególnych miesiącach roku. R. Ulbrich (2020) w swojej publikacji przedstawił wielkość produkcji energii elektrycznej przez instalację fotowoltaiczną o mocy 9 kW w ciągu roku 2018 i 2019.

Na rysunku 2 przedstawiono rzeczywistą ilość energii elektrycznej wyprodukowaną przez instalację fotowoltaiczną o mocy 9 kW w roku 2018.

R. Ulbrich (2020) wykazał, że sumaryczna ilość energii wyprodukowana przez instalację w roku 2018 wynosiła 7728 kWh. Analizując wykres przedstawiony na rysunku 2, można zauważyć, że w Polsce instalacja fotowoltaiczna najwięcej energii (około 74%) wyprodukuje w okresie kwiecień–wrzesień, natomiast ilość energii wyprodukowana w pozostałych miesiącach roku (październik–marzec) wyniesie około 26%.

Analiza przeprowadzona przez autorów niniejszej publikacji zakładała, że podstawowym źródłem energii niezbędnej do produkcji zielonego wodoru będzie farma fotowoltaiczna. Wykonanie analizy wymagało opracowania modelu instalacji fotowoltaicznej, bazującego na danych opublikowanych przez prof. dr hab. inż. Romana Ulbricha.

W opracowanym modelu autorzy założyli, że rzeczywista ilość energii wyprodukowanej przez instalację fotowoltaiczną będzie skorelowana z funkcją wielomianową czwartego rzędu (rysunek 2). Należy podkreślić, że przedstawiona funkcja jest dopasowana do wielkości energii wyprodukowanej przez instalację o mocy 9 kW. Określona w ten sposób funkcja pozwala na obliczenie ilości energii wyprodukowanej przez farmę fotowoltaiczną o dowolnej mocy. Oczywiście należy pamiętać o tym, że wykonane obliczenia będą pewnym uproszczeniem, gdyż zakłada się, że produkcja energii w zbudowanej instalacji będzie przebiegać zgodnie z danymi przedstawionymi w wymienionej publikacji.



**Rysunek 2.** Ilość energii wyprodukowanej przez instalację o mocy 9 kW w roku 2018

**Figure 2.** The amount of energy produced by the 9 kW installation in 2018

W rzeczywistości produkcja energii przez farmę fotowoltaiczną jest silnie skorelowana z warunkami pogodowymi, a więc trudna do precyzyjnego obliczenia. Niemniej jednak dokładność obliczeń w zupełności wystarczy do wykonania szacunkowej analizy wielkości produkcji energii elektrycznej przez instalację PV.

W tabeli 2 przedstawiono wyniki obliczeń wykonanych z wykorzystaniem modelu pracy instalacji fotowoltaicznej. Tabela prezentuje ilość energii wyprodukowanej przez instalację PV o mocy 1 MW w rozbiciu na poszczególne miesiące roku.

Można zauważyć, że w ciągu całego roku prognozowana wielkość wyprodukowanej energii wynosi około 869 203 kWh. Natomiast najwięcej energii zostanie wyprodukowane w czerwcu (123 487,52 kWh), a najmniej w grudniu (11 645,52 kWh).



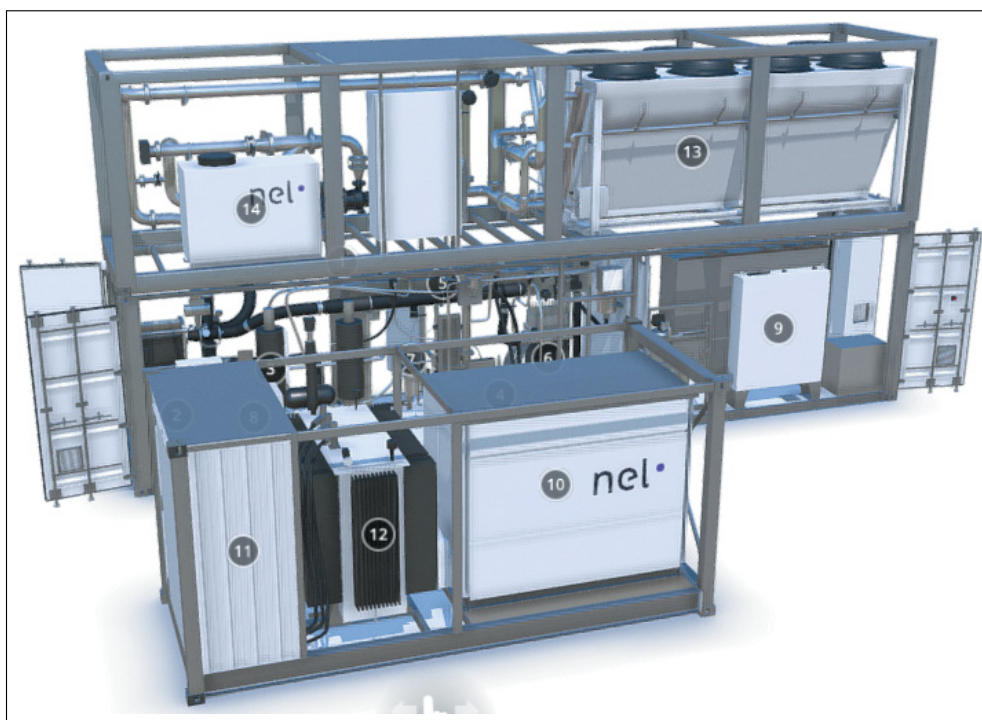
**Tabela 2.** Produkcja energii przez instalację PV w ciągu roku  
**Table 2.** Energy production by the PV installation during the year

Miesiąc	Moc instalacji [kW]	Produkcja energii [kWh/mies.]
Styczeń	1000,00	16 788,63
Luty	1000,00	44 395,52
Marzec	1000,00	73 859,52
Kwiecień	1000,00	99 356,63
Maj	1000,00	116 729,52
Czerwiec	1000,00	123 487,52
Lipiec	1000,00	118 806,63
Sierpień	1000,00	103 529,52
Wrzesień	1000,00	80 165,52
Październik	1000,00	52 890,63
Listopad	1000,00	27 547,52
Grudzień	1000,00	11 645,52
	Suma	869 202,71

### Produkcja wodoru

Wodór jest najpowszechniejszym pierwiastkiem w Układzie Słonecznym, niestety praktycznie nie występuje w stanie wolnym na Ziemi. Wodór w stanie wolnym jest obecny w małych ilościach w gazach wulkanicznych i w śladowych ilościach w górnych warstwach atmosfery ziemskiej. W związku z tym

otrzymanie wolnego wodoru wymaga jego produkcji. Do najpopularniejszych metod produkcji wodoru na skalę przemysłową należy zaliczyć technologię reformingu parowego gazu ziemnego, zgazowania węgla oraz elektrolizy (Gupta, 2009). Niestety w dwóch pierwszych metodach produkcja wodoru powoduje również wytwarzanie CO<sub>2</sub>. W związku ze zmianami klimatycznymi coraz powszechniejsze staje się preferowanie technologii energetycznych ograniczających emisję CO<sub>2</sub>. Technologia produkcji wodoru oparta na elektrolizie wody jest rozwiązaniem, które budzi coraz większe zainteresowanie. Elektroliza wody to proces polegający na rozdzielaniu cząsteczki wody pod wpływem prądu elektrycznego na wodór oraz tlen (Godula-Jopek, 2015). W przemyśle taką reakcję często określa się technologią *power-to-gas* (Piskowska-Wasiak, 2020). W przypadku gdy energia elektryczna do elektrolizy pochodzi ze źródeł odnawialnych (energia wodna, słoneczna lub wiatrowa), wyprodukowany wodór określa się mianem „zielonego”. Główną zaletą produkcji zielonego wodoru jest brak emisji CO<sub>2</sub>. Produkcja wodoru z wykorzystaniem elektrolizy wymaga zastosowania elektrolizerów. Obecnie do wytwarzania wodoru najczęściej wykorzystuje się elektrolizery (Bloomenergy, 2021): alkaliczne, z polimerową membraną (PEM) i stałotlenkowe (SOEC). Na skalę przemysłową produkuje się elektrolizery alkaliczne oraz typu PEM. W bieżącej analizie założono, że do produkcji wodoru zostanie wykorzystany elektrolizer PEM, gdyż elektrolizery tego typu charakteryzują się krótkim czasem



**Rysunek 3.** Przykładowa kontenerowa instalacja elektrolizera typu PEM firmy NEL (źródło: <https://nelhydrogen.com/product/m-series-containerized/>)

**Figure 3.** An example of a container electrolyser installation of the PEM type by NEL (Source: <https://nelhydrogen.com/product/m-series-containerized/>)

rozruchu oraz niskim minimalnym obciążeniem. Przykładową instalację elektrolizera typu PEM przedstawiono na rysunku 3.

### Parametry elektrolizera

W analizie założono, że w instalacji do produkcji wodoru zostanie zastosowany elektrolizer typu PEM. Jak już wcześniej stwierdzono, głównym argumentem za zastosowaniem elektrolizera typu PEM jest krótki czas rozruchu instalacji elektrolizera oraz możliwość pracy pod niskim obciążeniem (wynoszącym około 10%). Producenci elektrolizerów wykonują je w systemach modułowych. W związku z tym w bieżącej analizie przyjęto, że produkcja wodoru będzie odbywać się z wykorzystaniem elektrolizera MC 500 firmy NEL o mocy 2,5 MW. Podstawowe parametry tego elektrolizera przedstawiono poniżej:

- moc elektrolizera: 2,5 MW;
- maksymalny strumień produkowanego wodoru: 492 m<sub>n</sub><sup>3</sup>/h;
- ciśnienie wyjściowe wodoru: 30 bar;
- zapotrzebowanie na energię elektryczną: 4,53 kWh/m<sub>n</sub><sup>3</sup>;
- dynamiczny zakres możliwości produkcyjnych: 10–100%;
- zużycie wody: 444 l/h (0,9 l/m<sub>n</sub><sup>3</sup> wodoru);
- żywotność: 20 lat;
- zawartość O<sub>2</sub> w H<sub>2</sub>: <1 ppm;
- zawartość H<sub>2</sub>O w H<sub>2</sub>: <5 ppm.

Zgodnie ze specyfikacją producenta do wyprodukowania 1 m<sub>n</sub><sup>3</sup> wodoru potrzeba energii w ilości 4,53 kWh. W związku z tym wykorzystanie całej mocy elektrolizera do produkcji wodoru wymaga wybudowania instalacji fotowoltaicznej, która wyprodukuje w ciągu godziny 492 · 4,53 = 2228,76 kWh

**Tabela 3.** Ilość energii produkowanej przez instalację o mocy 7035 kW

**Table 3.** The amount of energy produced by an installation with a capacity of 7035 kW

Miesiąc	Moc instalacji [kW]	Produkcja energii [kWh/h]	Produkcja H <sub>2</sub> [m <sub>n</sub> <sup>3</sup> /godz.]
Styczeń	7035	380,99	84,10
Luty	7035	1115,44	246,23
Marzec	7035	1676,13	370,01
Kwiecień	7035	1792,24	395,64
Maj	7035	2037,70	449,82
Czerwiec	7035	2227,52	491,73
Lipiec	7035	2073,96	457,83
Sierpień	7035	1807,27	398,96
Wrzesień	7035	1446,06	319,22
Październik	7035	1333,64	294,40
Listopad	7035	717,77	158,45
Grudzień	7035	293,64	64,82

energii. Wykorzystując matematyczny model „produkcji” energii z instalacji fotowoltaicznej, obliczono moc instalacji, jaka jest potrzebna do wyprodukowania niezbędnej ilości energii. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 3.

Można zauważyć, że wykorzystanie maksymalnej mocy produkcji elektrolizera wymaga instalacji fotowoltaicznej o mocy 7035 kW. Z przedstawionej tabeli wynika, że instalacja o mocy 7035 kW, zgodnie z prognozą, w czerwcu będzie produkować w ciągu godziny energię wynoszącą 2227,52 kWh. Energia pozyskana z instalacji pozwoli na wykorzystanie pełnej mocy elektrolizera i wyprodukowanie wodoru w ilości 491,73 m<sub>n</sub><sup>3</sup>/h. Natomiast zapotrzebowanie elektrolizera na wodę będzie wynosić 444 l/h.

Wyniki obliczeń przedstawione w tabeli 3 pokazują, że elektrolizer o mocy 2,5 MW, zasilany przez instalację PV o mocy 7,035 MW, będzie w pełni wykorzystany zaledwie przez 3 miesiące (maj, czerwiec i lipiec).

### Dobór wielkości instalacji fotowoltaicznej pozwalającej na optymalne wykorzystanie elektrolizera

W związku z tym, że ilość produkowanej energii przez instalację PV o mocy 7,035 MW pozwala na „pełne” wykorzystanie elektrolizera o mocy 2,5 MW przez trzy miesiące w roku, to określenie optymalnej wielkości instalacji wymaga przeprowadzenia obliczeń również dla instalacji o mocy większej. W bieżącej analizie wyznaczono ilość wyprodukowanego wodoru w poszczególnych miesiącach roku przez instalację o mocy zmieniającej się w zakresie 7–11 MW. Zakres minimalny wielkości instalacji był tak dobrany, aby w czerwcu (najlepszym miesiącu dla fotowoltaiki w Polsce) elektrolizer mógł pracować z całą mocą (około 492 m<sub>n</sub><sup>3</sup>/h). Natomiast górny zakres mocy instalacji PV, wynoszący 11 MW, został określony w taki sposób, aby elektrolizer pracował z maksymalną mocą przez okres od marca do października. Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 4.

W dalszej kolejności, korzystając z modelu „energetycznego” opracowanego dla instalacji fotowoltaicznej, obliczono ilość wodoru wyprodukowanego przez elektrolizer o mocy 2,5 MW. Wyniki obliczeń dla instalacji PV o mocy 7 MW przedstawiono w tabeli 5. Analogiczne obliczenia wykonano dla pozostałych wielkości instalacji PV. Moc instalacji zmieniała się w przedziale od 7 MW do 11 MW, z rozdzielczością co 1 MW.

Oczywiście należy podkreślić, że przy wyższych mocach instalacji w niektórych miesiącach będzie występowała nadwyżka mocy instalacji nad możliwościami produkcyjnymi elektrolizera. Można zauważyć, że instalacja o mocy 7 MW może wyprodukować, w czasie całego roku około 1,34 mln m<sub>n</sub><sup>3</sup>

wodoru, natomiast instalacja o mocy 11 MW może wyprodukować w tym samym czasie 1,70 mln  $m_n^3$  wodoru. Prognozowaną ilość wodoru możliwą do wyprodukowania przez instalację PV o mocy zmieniającej się w zakresie 7–11 MW przedstawiono na rysunku 4.

Optymalna wielkość instalacji fotowoltaicznej została określona w dalszej części artykułu na podstawie wyników analizy finansowej.

**Tabela 4.** Ilość wodoru produkowana przez instalacje PV o mocy 7–11 MW

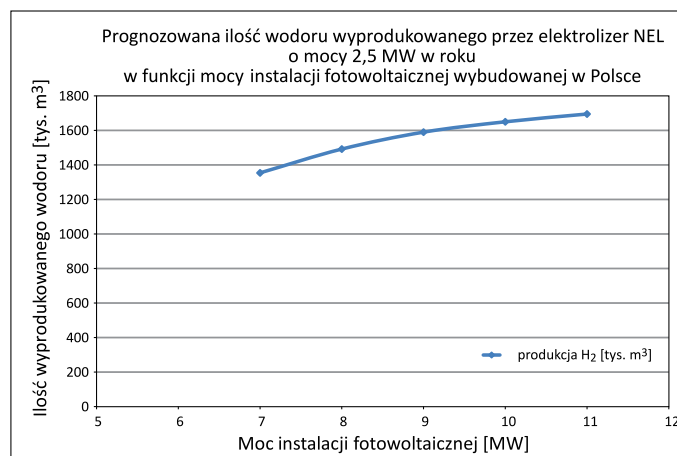
**Table 4.** The amount of hydrogen produced by PV installations with a capacity of 7–11 MW

Miesiąc	Moc instalacji [MW]				
	7	8	9	10	11
Produkcja H <sub>2</sub> [m <sub>n</sub> <sup>3</sup> /godz.]					
Styczeń	83,69	95,64	107,60	119,55	131,51
Luty	245,01	280,01	315,01	350,01	385,01
Marzec	368,17	420,76	473,36	492,00	492,00
Kwiecień	393,67	449,91	492,00	492,00	492,00
Maj	447,58	492,00	492,00	492,00	492,00
Czerwiec	489,28	492,00	492,00	492,00	492,00
Lipiec	455,55	492,00	492,00	492,00	492,00
Sierpień	396,97	453,68	492,00	492,00	492,00
Wrzesień	317,63	363,01	408,38	453,76	492,00
Październik	292,94	334,79	376,63	418,48	460,33
Listopad	157,66	180,18	202,70	225,23	247,75
Grudzień	64,50	73,71	82,93	92,14	101,36

**Tabela 5.** Ilość wodoru wyprodukowana przez instalację PV o mocy 7 MW

**Table 5.** The amount of hydrogen produced by 7 MW PV installations

Miesiąc	Moc instalacji [kW]	Produkcja energii [kWh/mies.]	Produkcja H <sub>2</sub> [m <sub>n</sub> <sup>3</sup> /mies.]
Styczeń	7000,00	117 520,43	25 942,70
Luty	7000,00	310 768,66	68 602,35
Marzec	7000,00	517 016,66	114 131,71
Kwiecień	7000,00	695 496,43	153 531,22
Maj	7000,00	817 106,66	180 376,75
Czerwiec	7000,00	864 412,66	190 819,57
Lipiec	7000,00	831 646,43	183 586,41
Sierpień	7000,00	724 706,66	159 979,39
Wrzesień	7000,00	561 158,66	123 876,08
Październik	7000,00	370 234,43	81 729,46
Listopad	7000,00	192 832,66	42 567,92
Grudzień	7000,00	81 518,66	17 995,29
	Suma	6084 418,98	1 343 138,85



**Rysunek 4.** Ilość wodoru wyprodukowana przez instalacje PV o mocy 7–11 MW

**Figure 4.** The amount of hydrogen produced by PV installations with a capacity of 7–11 MW

### Analiza kosztów produkcji zielonego wodoru

Głównym celem analizy było dokonanie oceny kosztów produkcji zielonego wodoru. Autorzy założyli, że wodór będzie produkowany przez elektrolizer zasilany energią pochodzącą z instalacji fotowoltaicznej. Ocenę wykonano na podstawie analizy finansowej. Odpowiednie obliczenia wymagały przyjęcia następujących założeń:

- obliczenia będą wykonywane w cenach stałych;
- realna stopa dyskontowa wynosi 7%;
- wodór będzie produkowany przez elektrolizer o mocy 2,5 MW;
- instalacja będzie eksploatowana przez 20 lat.

### Nakłady inwestycyjne

Autorzy wykonali uproszczoną analizę nakładów inwestycyjnych niezbędnych do wybudowania instalacji produkującej zielony wodór.

Budowa dużej farmy PV wymaga posiadania odpowiednio dużej działki. Zgodnie z publikacją dotyczącą farmy PV w Brudzewie – powierzchnia elektrowni PV o mocy 70 MW wynosi 100 ha. W związku z tym założono, że powierzchnia analizowanej inwestycji będzie wynosić 10 ha – dla instalacji PV o mocy 7 MW. W analizie założono również zakup działki po cenach rynkowych publikowanych przez GUS (2021). Koszt budowy farmy fotowoltaicznej o mocy 7–11 MW obliczono na podstawie danych opublikowanych przez firmę Voltaic System (2021). W publikacji wykazano, że całkowity koszt budowy instalacji PV o mocy 1 MW zawiera się w przedziale 2,3–2,6 mln zł. Koszt elektrolizera obliczono, zakładając, że cena elektrolizera typu PEM wynosi 1595 USD/kW (Bloomenergy, 2021). Dodatkowo założono, że koszt budowy

źródła wody, o wydajności 0,5 m<sup>3</sup>/h, wyniesie 50 tys. zł. W związku z tym przyjęto następujące założenia:

- koszt zakupu działki – 50 tys. zł/ha;
- koszt budowy farmy fotowoltaicznej – 2,5 mln zł/1 MW;
- koszt zakupu elektrolizera PEM o mocy 2,5 MW – 16 350 tys. zł (1 USD = 4,1 zł);
- koszt instalacji dostarczania wody – 50 tys. zł.

Koszty inwestycyjne, obliczone dla instalacji PV o mocy zmieniającej się w zakresie 7–11 MW, przedstawiono w tabeli 6.

**Tabela 6.** Zbiorcze zestawienie nakładów inwestycyjnych dla instalacji PV o mocy 7–11 MW

**Table 6.** Summary list of capital expenditures for PV installations with a capacity of 7–11 MW

Zadanie	Moc instalacji fotowoltaicznej [MW]				
	7	8	9	10	11
	Koszt [tys. zł]				
Zakup działki	500	571	643	714	786
Budowa farmy fotowoltaicznej	17 500	20 000	22 500	25 000	27 500
Budowa źródła wody wraz z oczyszczaniem	50	50	50	50	50
Elektrolizer z instalacją	16 350	16 350	16 350	16 350	16 350
Razem	34 400	36 971	39 543	42 114	44 686

Analizując uzyskane wyniki, można zauważyć, że koszt budowy instalacji o mocy 7 MW do produkcji wodoru wyniesie około 34,40 mln zł, natomiast koszt budowy analogicznej instalacji o mocy 11 MW to około 44,69 mln zł. Założono również, że budowa instalacji do produkcji wodoru zakończy się w ciągu pierwszego roku.

### Koszty operacyjne

Koszty działalności operacyjnej wynikają z eksploatacji instalacji PV oraz produkcji wodoru. Do kosztów operacyjnych należy zaliczyć:

- koszt eksploatacji instalacji fotowoltaicznej – 50 tys. zł/1 MW/rok;
- koszt zużytej wody przez elektrolizer, przyjęto – 20 zł/m<sup>3</sup>;
- obsługa elektrolizera z instalacją – 818 tys. zł/rok – zgodnie z danymi producenta.

Szacunkowe koszty operacyjne obliczone dla instalacji o mocy 7–11 MW przedstawiono w tabeli 7.

Wykonane obliczenia pokazują, że szacunkowa wielkość kosztów operacyjnych obliczonych dla pracy farmy fotowoltaicznej, elektrolizera o mocy 2,5 MW oraz całej instalacji do produkcji wodoru wynosi 1192 tys. zł/rok (w przypadku instalacji o mocy 7 MW).

Analogiczne koszty operacyjne dla instalacji o mocy 11 MW wynoszą natomiast 1399 tys. zł/rok.

**Tabela 7.** Zestawienie kosztów operacyjnych określonych dla instalacji PV o mocy 7–11 MW

**Table 7.** List of operating costs specified for PV installations with a capacity of 7–11 MW

Zadanie	Moc instalacji fotowoltaicznej [MW]				
	7	8	9	10	11
	Koszt [tys. zł]				
Instalacja fotowoltaiczna	350	400	450	500	550
Woda dla elektrolizera	24	27	29	30	31
Elektrolizer z instalacją	818	818	818	818	818
Razem	1192	1245	1297	1348	1399

### Wyniki analizy finansowej

Głównym celem analizy ekonomicznej było obliczenie szacunkowego kosztu produkcji wodoru przez elektrolizer PEM zasilany energią pochodzącą z instalacji fotowoltaicznej. Całkowity zdyskontowany koszt produkcji wodoru, obejmujący koszt budowy instalacji oraz jej użytkowania przez 20 lat, został obliczony z wykorzystaniem poniższego równania:

$$NPV \text{ Koszty} = \sum_{n=0}^{20} \left( \frac{(KosztInw + KosztOper)_n}{(1+R)^n} \right) \quad (1)$$

gdzie:

$KosztInw$  – koszty inwestycyjne w roku budowy instalacji (rok 0),

$KosztOper$  – koszty operacyjne w poszczególnych latach eksploatacji instalacji,

$R$  – stopa dyskonta (7%).

Następnie obliczono zdyskontowaną ilość wyprodukowanego wodoru podczas 20 lat eksploatacji instalacji:

$$NPV \text{ Wodór} = \sum_{n=0}^{20} \left( \frac{ProdWodór_n}{(1+R)^n} \right) \quad (2)$$

gdzie:  $ProdWodór_n$  – ilość wyprodukowanego wodoru w  $n$ -tym roku eksploatacji.

W dalszej kolejności obliczono koszt wyprodukowania 1 m<sup>3</sup> wodoru, zakładając eksploatację całej instalacji przez 20 lat. Koszt produkcji 1 m<sup>3</sup> wodoru uzyskano, dzieląc sumę zdyskontowanych kosztów inwestycyjnych i operacyjnych uzyskaną w okresie 20 lat przez sumę zdyskontowanej ilości wyprodukowanego wodoru. Średni koszt produkcji wodoru został obliczony zgodnie z poniższym wzorem:

$$Koszt \text{ Wodór} = \frac{NPV \text{ Koszty}}{NPV \text{ Wodór}} \quad (3)$$

Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 8. Należy podkreślić, że wszystkie obliczenia mają charakter szacunkowy.



**Tabela 8.** Koszt produkcji wodoru obliczony dla instalacji PV o mocy 7–11 MW

**Table 8.** Hydrogen production cost calculated for 7–11 MW PV installations

Moc instalacji [MW]	Koszt produkcji [tys. zł]	Produkcja wodoru [tys. m <sup>3</sup> ]	Koszt produkcji wodoru [zł/m <sup>3</sup> ]
7	47 028,07	14 229,24	3,31
8	50 160,55	15 778,83	3,18
9	53 283,44	16 834,95	3,17
10	56 394,73	17 442,09	3,23
11	59 507,03	17 958,55	3,31

Analizując wyniki obliczeń, należy stwierdzić, że najniższy koszt produkcji wodoru będzie generować instalacja fotowoltaiczna o mocy 9 MW. Szacunkowy koszt produkcji 1 m<sup>3</sup> zielonego wodoru wyniesie 3,17 zł.

### Podsumowanie

Wykonana analiza miała na celu określenie kosztów produkcji wodoru przez elektrolizer zasilany energią elektryczną pochodzącą z farmy fotowoltaicznej. W analizie założono, że wódór będzie produkowany przez elektrolizer PEM o mocy 2,5 MW. Natomiast wielkość instalacji fotowoltaicznej została zoptymalizowana pod kątem pracy elektrolizera. W związku z tym, że ilość produkowanej energii jest zmienna w czasie, to ilość produkowanego wodoru obliczono dla instalacji o mocy zmieniającej się w zakresie 7–11 MW. Zakres minimalny wielkości instalacji został dobrany w taki sposób, aby w czerwcu (najlepszym miesiącu dla fotowoltaiki w Polsce) elektrolizer mógł pracować z całą mocą (492 m<sup>3</sup>/h). Natomiast górny zakres mocy instalacji, wynoszący 11 MW, został dobrany tak, aby elektrolizer pracował z maksymalną mocą od marca do października. Instalacja o mocy 7 MW pozwoli wyprodukować około 1,34 mln m<sup>3</sup> wodoru, podczas gdy instalacja o mocy 11 MW może wyprodukować około 1,7 mln m<sup>3</sup> wodoru. W dalszej kolejności obliczono nakłady inwestycyjne dla wszystkich wariantów instalacji fotowoltaicznej. Koszt budowy instalacji o mocy 7 MW wyniesie około 34,4 mln zł, a koszt budowy analogicznej instalacji o mocy 11 MW – około 44,7 mln zł. Analiza finansowa wymagała obliczenia również rocznych kosztów operacyjnych. Roczne koszty operacyjne związane z eksploatacją instalacji o mocy 7 MW wyniosą około 1,19 mln zł, a koszty operacyjne obliczone dla instalacji o mocy 11 MW osiągnęły wielkość 1,4 mln zł. W dalszej kolejności określono koszt wyprodukowania 1 m<sup>3</sup> wodoru, zakładając eksploatację instalacji przez 20 lat. Koszt produkcji 1 m<sup>3</sup> wodoru uzyskano, dzieląc sumę zdyskontowanych kosztów

inwestycyjnych i operacyjnych w okresie 20 lat przez sumę zdyskontowanej ilości wyprodukowanego wodoru. Obliczenia wykazały, że optymalna instalacja PV dla elektrolizera o mocy 2,5 MW posiada moc 9 MW. Koszt produkcji wodoru obliczony dla instalacji PV o mocy 9 MW wyniósł 3,17 zł/m<sup>3</sup>. W związku z tym koszt wyprodukowania 1 kg zielonego wodoru wynosi około 8,6 USD. Koszt produkcji szarego wodoru z gazu ziemnego, uwzględniając wysoką cenę gazu ziemnego oraz wysoką cenę certyfikatów emisji CO<sub>2</sub> (październik 2021 r.), wyniósł 5,74 USD (Burgess, 2021). Należy zauważyć, że producenci elektrolizerów dążą do redukcji kosztów produkcji oraz zwiększenia ich efektywności. Prototyp elektrolizera firmy Hysata uzyskał sprawność wynoszącą 95%, podczas gdy efektywność elektrolizerów komercyjnych wynosi obecnie około 75% (Blain, 2022). Cały czas trwają prace zmierzające do zwiększenia efektywności paneli PV oraz redukcji kosztów ich produkcji. Zgodnie z publikacją National Renewable Energy Laboratory (NREL, 2021) koszt produkcji systemów PV został zredukowany o 64% względem roku 2010. Biorąc pod uwagę przedstawione tendencje, można stwierdzić, że powszechniejsze zastosowanie wodoru w przemyśle może nastąpić szybciej, niż przewidywaliśmy (Schmidt et al., 2017).

### Wnioski

1. Obecnie budowa instalacji fotowoltaicznej do produkcji zielonego wodoru jest z punktu widzenia ekonomicznego nieopłacalna. Można przewidywać, że opłacalność takiej inwestycji będzie w najbliższym czasie rosła.
2. Każdy projekt instalacji do produkcji zielonego wodoru powinien przejść procedurę optymalizacyjną.

Artykuł powstał na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza opłacalności magazynowania wodoru, pochodzącego z OZE, w podziemnych magazynach gazu* – praca INiG – PIB, nr zlecenia: 0033/2021/KP, nr archiwalny: DK-4100-0021/2021.

### Literatura

Biernaciak E., 2022. Fotowoltaika w Polsce – Podsumowanie 2021 roku. Raport. <<https://enerad.pl/aktualnosci/fotowoltaika-w-polsce-podsumowanie-2021-roku/>> (dostęp: luty 2022).

Blain L., 2022. Record-breaking hydrogen electrolyzer claims 95% efficiency. <<https://newatlas.com/energy/hysata-efficient-hydrogen-electrolysis/Record-breaking-hydrogen-electrolyzer-claims-95%-efficiency/>> (dostęp: kwiecień 2022).

Bloomenergy, 2021. The role of solid oxide technology in the hydrogen economy: a primer. <<https://resources.bloomenergy.com/the-role-of-solid-oxide-technology-in-the-hydrogen-economy/>> (dostęp: grudzień 2021).

Burgess J., 2021. European green hydrogen costs, S&P Global Platts. <<https://www.spglobal.com/platts/en/market-insights/latest-news/electric-power/102221-european-green-hydrogen-costs-already->



- competitive-with-fossil-fuels-say-producers> (dostęp: grudzień 2021).
- Ciechanowska M., 2020. Europejski Zielony Ład wyzwaniem dla transformacji polskiego przemysłu naftowego i gazowniczego. *Nafta-Gaz*, 76(10): 757–761. DOI: 10.18668/NG.2020.10.12.
- Enerad, 2021. Największe farmy fotowoltaiczne w Polsce. <<https://enerad.pl/fotowoltaika/najwieksze-farmy-fotowoltaiczne-w-polsce-ranking/>> (dostęp: luty 2022).
- Godula-Jopek A., 2015. Hydrogen Production by Electrolysis. *Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA*. DOI: 10.1002/9783527676507.
- Gupta R.B., 2009. Hydrogen Fuel: Production, Transport, and Storage. *CRC Press Inc.* ISBN 978-1-4200-4575-8.
- GUS, 2021. Średnie ceny gruntów. <<https://www.gov.pl/web/arimr/srednie-ceny-gruntow-wg-gus>> (dostęp: grudzień 2021).
- NREL, 2021. Documenting a Decade of Cost Declines for PV Systems. <<https://www.nrel.gov/news/program/2021/documenting-a-decade-of-cost-declines-for-pv-systems.html>> (dostęp: grudzień 2021).
- Piskowska-Wasiak J., 2020, Doświadczenia i perspektywy procesu Power to Gas. *Nafta-Gaz*, 76(12): 951–954. DOI: 10.18668/NG.2020.12.09.
- Polsat News, 2021. Największa elektrownia słoneczna w Polsce już działa i produkuje prąd. <<https://www.polsatnews.pl/wiadomosc/2021-10-28/najwieksza-elektrownia-sloneczna-w-polsce-juz-dziala-i-produkuje-prad/>> (dostęp: grudzień 2021).
- Raballo S., Llera J., Perez A., Bolcich J.C., 2010. Clean Hydrogen Production in Patagonia, Argentina. *18<sup>th</sup> World Hydrogen Energy Conference 2010 – WHEC 2010*.
- Rynek Elektryczny, 2022. Prawie wszystkie nowe instalacje OZE to fotowoltaika. <<https://www.rynekelektryczny.pl/moc-zainstalowana-oze-w-polsce/>> (dostęp: luty 2022).
- Schmidt O., Gambhir A., Staffell I., Hawkes A., Nelson J., Few S., 2017. Future cost and performance of water electrolysis: An expert elicitation study. *International Journal of Hydrogen Energy*, 42(52): 30470–30492. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2017.10.045.
- Ulbrich R., 2020. Analiza pracy domowej mikro instalacji fotowoltaicznej po 2 latach eksploatacji. *Instal*, 5: 6–10. DOI: 10.36119/15.2020.5.1.
- Voltaic System, 2021. Farma fotowoltaiczna – koszty i zyski. <<https://voltaicsystem.pl/farma-fotowoltaiczna-koszty-i-zyski/>> (dostęp: luty 2022).



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.miziolek@inig.pl](mailto:mariusz.miziolek@inig.pl)



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](mailto:bogdan.filar@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](mailto:tadeusz.kwilosz@inig.pl)