



Techniczno – ekonomiczna analiza porównawcza stosowania paneli fotowoltaicznych i turbin wiatrowych

A technical and economic comparative analysis of the use of photovoltaic panels and wind turbines

Aleksandra Pietrzak^{1*}

¹ Wydział Inżynierii i Ekonomii, Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Ciechanowie

* Kontakt / Correspondence: olaturkiewicz1@gmail.com

Streszczenie:

W niniejszym artykule podjęto próbę porównania dwóch technologii OZE – farmy fotowoltaicznej i turbiny wiatrowej w kontekście ich wykorzystania do produkcji wodoru w procesie elektrolizy. Analiza została przeprowadzona o dane projektowe dla lokalizacji Odolanów. Uwzględnione zostały aspekty ekonomiczne, techniczne, a także wskaźniki efektywności inwestycji, tj. NPV, IRR, SPBT. Na podstawie przeprowadzonej analizy należy zwrócić uwagę na fakt, że instalacje fotowoltaiczne cechują się wyższą opłacalnością, za to turbiny wiatrowe zapewniają stabilną produkcję energii elektrycznej.

Słowa kluczowe: panele fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe, wodór, hydroliza, efektywność

Abstract:

This article attempts to compare two renewable energy technologies—a photovoltaic farm and a wind turbine—in the context of their use for hydrogen production via electrolysis. The analysis was conducted using design data for the Odolanów site. Economic and technical aspects were taken into account, as well as investment efficiency indicators, i.e., NPV, IRR, and SPBT. Based on the analysis, it should be noted that photovoltaic installations are more cost-effective, while wind turbines ensure stable electricity production.

Keywords: solar panels, wind turbines, hydrogen, hydrolysis, efficiency

1. Wstęp

W ostatnich latach można zauważyć wyraźny rozwój i zwiększoną popularność stosowania instalacji odnawialnych źródeł energii. Rosnące zapotrzebowanie na energię i jednoczesna konieczność ograniczenia emisji gazów cieplarnianych sprawiają, że OZE stają się jednym z najważniejszych elementów współczesnej gospodarki energetycznej.

Dynamiczny rozwój odnawialnych źródeł energii wynika m.in. ze wzrostu cen energii, coraz większego zapotrzebowania na energię oraz konieczności ograniczenia negatywnego oddziaływania energetyki na środowisko naturalne. Instalacje fotowoltaiczne i turbiny wiatrowe są najczęściej wybieranym rozwiązaniem do produkcji energii. Technologie te mają wspólny cel – produkcję energii w sposób przyjazny dla środowiska. Przy czym należy wziąć pod uwagę fakt, iż technologię te charakteryzują się odmiennymi wymaganiami technicznymi, kosztami inwestycyjnymi oraz efektywnością. Efektywność jest uzależniona od

warunków lokalnych takich jak siła wiatru, czy nasłonecznienie. Pod uwagę należy wziąć fakt, iż w Polsce nasłonecznienie i siła wiatru różnią się od siebie w zależności od regionu

Celem niniejszego artykułu jest nie tylko porównanie technologii turbiny wiatrowej i instalacji fotowoltaicznych, ale także ocena ich przydatności w kontekście zasilania elektrolizera w produkcji wodoru.

1.1. Cel analizy i metodyka badań

Głównym celem niniejszego artykułu jest techniczno-ekonomiczna analiza porównawcza stosowania paneli fotowoltaicznych i turbin wiatrowych o mocy 1 MW. Analiza posłuży do podjęcia decyzji przy wyborze optymalnego źródła energii elektrycznej, która będzie produkowana na potrzeby własne użytkownika.

Wybór konkretnej technologii odnawialnych źródeł energii musi być oparte na analizie, która obejmuje nakłady inwestycyj-

ne, koszty eksploatacji, a także efektywność wytwarzania energii elektrycznej, które wynika z lokalnych uwarunkowań klimatycznych.

Wykorzystana metodyka pozwoliła uzyskać obiektywne porównanie analizowanych technologii odnawialnych źródeł energii w warunkach pogodowych występujących w Odolanowie. W pierwszej kolejności została przeanalizowana literatura fachowa, a także obowiązujące akty prawne, które dotyczą odnawialnych źródeł energii. Przeanalizowane zostały także warunki klimatyczne dla analizowanego regionu.

Techniczno-ekonomiczną analizę przeprowadzono według poniższych założeń badawczych:

- instalacja fotowoltaiczna oraz turbiny wiatrowe mają porównywalną moc,
- zostało przyjęte, że wyprodukowana energia elektryczna jest wykorzystywana na potrzeby własne, bez uwzględnienia sprzedaży energii,
- zostały uśrednione ceny energii elektrycznej w całym okresie analizy co umożliwi porównanie tych technologii w jednolitych warunkach ekonomicznych.
- analiza obejmuje nakłady inwestycyjne (CAPEX) oraz koszty eksploatacji (OPEX) ponoszone w trakcie eksploatacji,
- uzysk energetyczny został obliczony na podstawie warunków klimatycznych, występujących w danym regionie. Podstawą do wykonania obliczeń są śródroczne dane meteorologiczne, które dotyczą nasłonecznienia i prędkości wiatru.

2. Podstawy teoretyczne odnawialnych źródeł energii

2.1. Charakterystyka odnawialnych źródeł energii

Odnawialne źródła energii wykorzystują naturalne zasoby. Zasoby te odnawiają się w sposób ciągły bądź w krótkim czasie w stosunku do ich zużycia. Promieniowanie słoneczne, energia wody, wiatru, energia geotermalna oraz energia biomasy pozwalają na wytwarzanie energii cieplnej oraz energii elektrycznej przy niskiej emisji gazów cieplarnianych oraz zanieczyszczeń w porównaniu do konwencjonalnych źródeł opartych na paliwach kopalnych.

Należy zwrócić uwagę na fakt, iż odnawialne źródła energii są istotnym elementem w obecnie funkcjonującym systemie energetycznym w kontekście negatywnego wpływu działalności przemysłowej na środowisko naturalne, a także w kontekście stale rosnących cen energii elektrycznej. Rozwój tego sektora ma wpływ na rozwój nowych technologii, a co za tym idzie rozwija się rynek pracy. Odnawialne źródła energii mają również istotny wpływ na bezpieczeństwo energetyczne kraju za sprawą zmniejszonej zależności od importowanych paliw. Istotnym jest to, że zastosowanie OZE w przedsiębiorstwach wymaga wykonania indywidualnej analizy techniczno-ekonomicznej w celu doboru najbardziej opłacalnego i dopasowanego do zużycia źródła energii. W warunkach przemysłowych odnawialne źródła energii mogą stanowić uzupełnienie zasilania z sieci elektroenergetycznej co powoduje redukcje kosztów energii oraz zwiększenie niezależności energetycznej.

Technologia fotowoltaiczna opiera się na konwersji promieniowania słonecznego na energię elektryczną. Proces konwersji

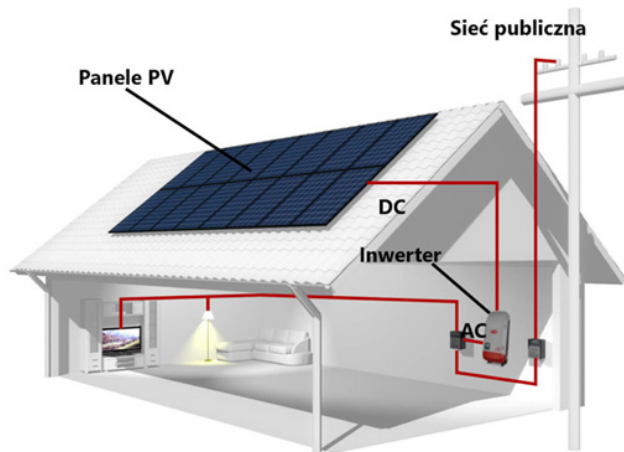
odbywa się w ogniwie fotowoltaicznym. Wówczas, gdy do panela fotowoltaicznego następuje rozdzielanie półprzewodników typu p-n, a różnica potencjałów elektrycznych powoduje, że następuje przepływ prądu po uprzednim zamknięciu obwodu elektrycznego [1].

Instalacje fotowoltaiczne dzielą się na dwie grupy, tzn. prace w systemie on-grid oraz off-grid. System on-grid jest podłączony do krajowej sieci elektroenergetycznej, oznacza to, że energia wyprodukowana przez instalacje PV jest na bieżąco zużywana, a nadwyżka energii jest przesyłana do dystrybutora za ustaloną opłatą za 1 kWh. Warto nadmienić, iż ten rodzaj instalacji nie jest wyposażony w magazyn energii. Panele fotowoltaiczne w zależności od potrzeb i wielkości instalacji są montowane na gruncie bądź dachu, połączone przewodami, gdzie wytworzona energia jest przesyłana do falownika, gdzie następuje przekształcenie z prądu stałego DC na prąd zmienny AC.

System off-grid jest to instalacja fotowoltaiczna, która nie jest podłączona do sieci elektroenergetycznej. Istotnym elementem tego systemu jest montaż magazynu energii. Ze względu na ilość dni słonecznych, w których instalacja PV ma możliwość wyprodukować energię elektryczną zaleca się montaż dodatkowego źródła energii, tj. agregatu prądotwórczego.

Instalacja fotowoltaiczna to system urządzeń, który jest złożony z wielu komponentów, a każdy z nich pełni oddzielną funkcję (rys.1):

- panele fotowoltaiczne: są to jednostki wytwórcze energii,
- inwerter: do jego zadań należy konwertowanie wytworzonego prądu stałego DC na prąd zmienny AC. Dostosowany do parametrów sieci.
- konstrukcja wsporcza: system montażowy paneli PV dostosowany do mocy i wymagań użytkownika,
- infrastruktura elektryczna: obejmuje okablowanie, systemy zabezpieczeń, zabezpieczenia przeciwprzebiegowe.



Rys. 1. Budowa instalacji fotowoltaicznej [12]
Fig. 1. Construction of a photovoltaic installation [12]

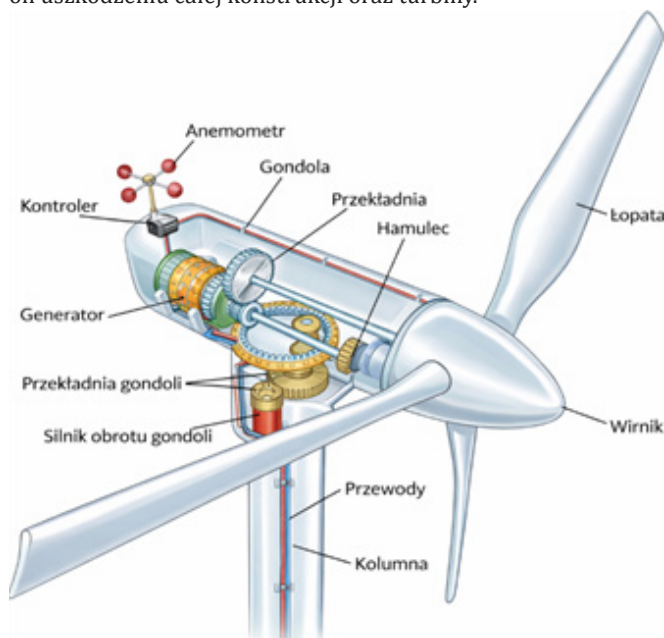
Elektrownie wiatrowe przetwarzają energię kinetyczną wiatru w energię mechaniczną, która jest przekształcana na energię elektryczną. Proces przetwarzania energii jest możliwy dzięki pracy generatora. Należy podkreślić fakt, iż prędkość wiatru jest zmienna, a co za tym idzie parametry prądu również. Dlatego ważne jest stosowanie przekształtników energoelektrycznych, które mają za zadanie stabilizację amplitudy i częstotliwości na-

pięcia, aby dostosować je do wartości wymaganych w Polsce, tj. 50 Hz i 230V [2].

Budowa i elementy turbiny wiatrowej (rys. 2):

- fundament,
- wieża,
- gondola turbiny wiatrowej,
- wirnik wraz z łopatom.

Systemy bezpieczeństwa odgrywają istotną rolę podczas eksploatacji elektrowni wiatrowych. Turbiny wiatrowe projektuje się dla określonych prędkości wiatru. Przyjęte jest, iż turbiny wiatrowe nie uruchamiają się przy prędkościach w zakresie 2–4 m/s, ze względu na to, iż energia jest zbyt mała do zapewnienia efektywnej pracy urządzenia. Wzrost prędkości wiatru wiąże się ze wzrostem wytwarzanej energii elektrycznej do momentu osiągnięcia przez turbinę mocy znamionowej. Wówczas, gdy prędkość wiatru przekroczy poziom 25–30 m/s turbina automatycznie zostaje wyłączona. Układ hamulcowy wirnika turbiny wiatrowej, jest istotnym jej elementem, ponieważ zapobiega on uszkodzeniu całej konstrukcji oraz turbiny.



Rys. 2. Budowa turbiny wiatrowej [13]
Fig. 2. Construction of a wind turbine [13]

3. Analiza techniczno-porównawcza

3.1. Porównanie sprawności technologii fotowoltaicznych i turbin wiatrowych

Analiza porównawcza obu technologii opiera się na analizie konwersji energii pierwotnej, tj. promieniowanie słoneczne, energia wiatru na energię elektryczną. Sprawność określa się jako stosunek uzyskanej energii elektrycznej do energii dostarczonej do układu.

Sprawność instalacji fotowoltaicznej jest ograniczona fizycznymi właściwościami półprzewodników oraz zjawiskami takimi jak odbicie światła, straty cieplne. Nowoczesne moduły monokrystaliczne osiągają sprawność rzędu 20–22% co oznacza, że większość energii ulega rozproszeniu [3].

Standard Test Conditions (STC) są to określone warunki laboratoryjne, do których odnoszą się producenci paneli fotowoltaicznych podając sprawność fotoogniw:

- moc promieniowania słonecznego – 1000 W/m² – wartość standardowego promieniowania słonecznego, które pada na powierzchnię ziemi,
- temperatura pomiaru 25°C – jest to temperatura ogniwa fotowoltaicznego. Jest to niezwykle istotna wartość, ponieważ wraz ze wzrostem temperatury ogniwa jego sprawność maleje,
- widmo promieniowania AM 1,5 SPECTRUM – jest to droga jaką promieniowanie słoneczne musi przebyć, aby dotrzeć na powierzchnię ziemi.

Turbiny wiatrowe wyróżniają się wyższą sprawnością chwilową, którą organiczna prawo Betza, które mówi o maksymalnej sprawności na poziomie 59,3%. Warto nadmienić, iż turbiny wiatrowe przekształcają energię wiatru z efektywnością, która sięga 45%. Sprawność jest zależna od prędkości wiatru, tzw. krzywa mocy [4].

Dzięki wykorzystaniu prawa Betza wiemy, iż turbiny wiatrowe nie są w stanie wykorzystać całej dostarczonej energii wiatru. Przyjmuje się, iż aktualnie wykorzystywane turbiny są w stanie wykorzystać około 35–40% energii wiatru.

Stabilna oraz bezpieczna praca elektrowni wiatrowych jest możliwa dzięki zastosowaniu rozwiązań, które mają na celu korygowanie kąta nachylenia łopatek wirnika. System pitch control koryguje ustawienie kąta łopatek względem kierunku wiatru co pozwala na kontrolę energii odbieranej ze strumienia powietrza. Natomiast system yaw control odpowiada za obracanie gondolą wraz z wirnikiem wokół osi, tak aby łopaty były zawsze skierowane w stronę nadchodzącego strumienia powietrza.

W celu dokonania rzetelnej oceny porównawczej obu technologii, konieczne jest zestawienie ich kluczowych parametrów operacyjnych oraz technicznych. Szczegółowe porównanie wydajności, żywotności oraz ryzyk eksploatacyjnych dla instalacji o mocy 1 MW w lokalizacji Odolanów przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Porównanie techniczno-eksploatacyjne (1 MW) [14]
Table 1. Technical and operational comparison (1 MW) [14]

Cecha / Parametr	Fotowoltaika (PV)	Elektrownia wiatrowa
Sprawność teoretyczna	18–22% (ogniwa krzemowe)	35–45% (limit Betza: 59,3%)
Roczna produkcja (Odolanów) [MWh]	ok. 1050–1100	ok. 1500–1800
Czas pracy (ekwiwalent pełnej mocy) [h/rok]	ok. 1000–1100	ok. 1600–2200
Zajętość terenu [ha]	ok. 1,2–1,5	ok. 0,2 (fundament + droga)
Żywotność systemu [lata]	25–30	20–25
Części ruchome	Brak (system statyczny)	Liczne (wirnik, przekładnia, generator)
Główne ryzyko techniczne	Degradacja ogniwa, awaria inwertera	Zmęczenie materiałowe łopatek, awaria przekładni
Wpływ temp. na sprawność	Spadek sprawności przy upałach	Znikomy (wpływ na gęstość powietrza)

Analiza danych zawartych w tabeli 1 pozwala na wyciągnięcie kilku istotnych wniosków. Przede wszystkim elektrownia wiatrowa charakteryzuje się znacznie wyższą gęstością energetyczną – przy ponad sześciokrotnie mniejszej zajętości terenu (ok. 0,2 ha wobec 1,2–1,5 ha dla PV) jest w stanie wyprodukować w Odolanowie nawet o 60% więcej energii elektrycznej w skali roku. Należy jednak zwrócić uwagę na aspekt eksploatacyjny: system fotowoltaiczny, jako układ statyczny, cechuje się dłuższą żywotnością i mniejszą awaryjnością mechaniczną, podczas gdy turbina wiatrowa, ze względu na liczne części ruchome, wymaga bardziej zaawansowanych procesów serwisowych związanych ze zmęczeniem materiałowym łopat czy pracą przekładni.

3.2. Warunki klimatyczne i lokalizacyjne, a efektywność systemów

Wybrana do analizy lokalizacja – miejscowość Odolanów (powiat ostrowski, województwo wielkopolskie) – charakteryzuje się specyficznymi warunkami klimatycznymi, które determinują efektywność systemów OZE. Z punktu widzenia energetyki słonecznej, region ten znajduje się w strefie o korzystnym nasłonecznieniu, typowym dla nizinnej części Polski środkowo-zachodniej. Z kolei pod względem wietrzności, Odolanów leży w strefie sklasyfikowanej jako umiarkowanie korzystna, co wymaga precyzyjnego doboru wysokości wieży turbiny.

Efektywność odnawialnych źródeł energii w miejscowości Odolanów charakteryzuje się mikroklimatem, gdzie duże nasłonecznienie w okresie letnim, tj. maj – sierpień powoduje zmniejszoną aktywność wiatrową. Warto nadmienić, iż miesiące zimowe oferują najwyższy potencjał energii wiatrowej [5]. Analizowany region charakteryzuje się korzystnym indeksem nasłonecznienia 1100 kWh/m² rok. Odnosząc się do danych dotyczących energetyki wiatrowej region dysponuje umiarkowanymi zasobami, tzn. III klasa wietrzności. Analiza danych meteorologicznych dla miejscowości Odolanów w województwie Wielkopolskim pozwala na oszacowanie rocznego uzysku energii, co przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2. Dane pogodowe dla regionu Wielkopolski [5]

Table 2. Weather data for the Wielkopolska region [5]

Parametr pogodowy	Wartość średnioroczna
Nasłonecznienie (GHI) [kWh/m ² rok]	~1110–1130
Liczba dni słonecznych	ok. 160–180
Śr. prędkość wiatru (100m) [m/s]	5,8–6,4 m/s
Dominujący kierunek wiatru	W i SE

Analiza danych meteorologicznych zawartych w tabeli 2 wykazuje, że region Wielkopolski charakteryzuje się sprzyjającymi warunkami do rozwoju obu technologii OZE. Szczególną uwagę należy zwrócić na wysoki poziom nasłonecznienia, przekraczający 1100 kWh/m² rok, co bezpośrednio przekłada się na krótki okres zwrotu inwestycji w systemy PV.

3.3. Wymagania instalacyjne i eksploatacyjne

Realizacja instalacji OZE o mocy 1 MW uwzględnia szereg uwarunkowań technicznych, ekonomicznych, formalnych, które są różne dla instalacji PV oraz dla instalacji turbiny wiatrowej. W przypadku instalacji fotowoltaicznej należy posiadać dostęp do dużej powierzchni gruntu, w klasie IV lub V. Dla energetyki wiatrowej należy wziąć pod uwagę aspekt odległości od zabudowy mieszkalnej [6]. W tabeli poniżej (tab. 3) przedstawiono porównanie wymagań instalacyjnych i eksploatacyjnych dla technologii OZE.

Tabela 3. Porównanie wymagań instalacyjnych i eksploatacyjnych [8, 14, 15]

Table 3. Comparison of installation and operational requirements [8, 14, 15]

Parametr	Farma fotowoltaiczna (PV)	Elektrownia wiatrowa
Zapotrzebowanie na grunt	Wysokie: ok. 1,2–1,5 ha	Niskie: punktowo pod fundament i drogę (~0,2 ha)
Klasa gruntu	Głównie nieużytki lub klasy IV, V, VI	Możliwa klasa III i IV (mniejsza powierzchnia wyłączenia)
Ograniczenia prawne	Miejscowy Plan Zagospodarowania Przestrzennego (MPZP)	Ustawa odległościowa (zasada 10H lub min. 700 m)
Czas montażu	2–4 miesiące	6–12 miesięcy (logistyka, fundamenty)
Części ruchome	Brak (system statyczny)	Liczne (wirnik, przekładnia, generator, yaw system)
Główny wymóg serwisowy	Mycie modułów, inspekcje termowizyjne	Smarowanie, serwis mechaniczny, dozór UDT
Integracja z wodorem	Wymaga dużych magazynów energii (praca tylko w dzień)	Stabilniejsze zasilanie elektrolizera (praca całodobowa)
Infrastruktura IT	System monitoringu pracy inwerterów	Zaawansowany system SCADA i sterowanie mocą

Dla miejscowości Odolanów, gdzie znajduje się instalacja do produkcji wodoru efektywność produkcji zielonego wodoru jest uzależnione od charakterystyki pracy źródeł OZE. Elektrolizery stanowiące główny element instalacji wodorowej najefektywniej pracują przy stałym obciążeniu znamionowym. Zmienność warunków pogodowych zmusza użytkownika do zastosowania integracji systemowej, która zrównoważy niestabilną produkcję energii [7].

Produkcja energii elektrycznej ogranicza się do godzin dziennych, co powoduje częste wymuszenia cyklu start – stop elektrolizera. Energetyka wiatrowa posiada rozproszony profil działalności w ciągu doby, to pozwala na dłuższą pracę jednostek wytwórczych w ciągu doby. W tabeli 4 przedstawiono porównanie współpracy wybranej technologii odnawialnych źródeł energii z elektrolizerem.

Tabela 4. Porównanie współpracy OZE z elektrolizerem [7, 16, 17]
Table 4. Comparison of cooperation between renewable energy sources and electrolyzer [7, 16, 17]

Cecha współpracy	Fotowoltaika (PV)	Elektrownia wiatrowa
Ciągłość zasilania	Tylko w dzień (przestoje nocne)	Możliwa praca całodobowa
Stabilność mocy	Wysoka w dni bezchmurne	Wysoka zmienność (porywistość)
Wpływ na elektrolizer	Częste cykle uruchomień	Stabilniejsza temperatura pracy
Rola systemu IT	Optymalizacja startu rano	Szybka regulacja mocy (pitch control)

Analiza danych zawartych w tabeli 4 wskazuje na istotne różnice w profilach operacyjnych obu technologii. Szczególną uwagę należy zwrócić na wpływ źródła zasilania na pracę elektrolizera, gdzie energetyka wiatrowa zapewnia stabilniejszą temperaturę pracy, co bezpośrednio przekłada się na mniejsze obciążenie termiczne układu. Realizacja instalacji OZE o mocy 1 MW uwzględnia szereg uwarunkowań technicznych, ekonomicznych, formalnych, które są różne dla instalacji PV oraz dla instalacji turbiny wiatrowej. W przypadku instalacji fotowoltaicznej należy posiadać dostęp do dużej powierzchni gruntu, w klasie IV lub V. Dla energetyki wiatrowej należy wziąć pod uwagę aspekt odległości od zabudowy mieszkalnej.

4. Analiza ekonomiczna

4.1. Koszty inwestycyjne CAPEX dla instalacji PV i turbin wiatrowych

Analiza nakładów inwestycyjnych, stanowi jeden z głównych elementów oceny doboru instalacji OZE. Koszty CAPEX (z ang. Capital Expenditure) zawierają całkowite nakłady finansowe niezbędne do realizacji projektu od pozyskania pozwoleń do projektów, a także zakup komponentów oraz prace montażowo – budowlane. Koszty uwzględniane w przypadku instalacji PV głównie opierają się na cenie modułu fotowoltaicznego oraz konstrukcji montażowych paneli [8]. Koszty turbiny wiatrowej są o wiele większe, ze względu na koszt turbiny wiatrowej, a także infrastruktury towarzyszącej [9]. W tabeli 5 zostały przedstawione szacunkowe koszty inwestycyjne dla obu wariantów.

Tabela 5. Koszty Capex dla paneli PV i turbin wiatrowych [8, 14]
Table 5. Capex costs for PV panels and wind turbines [8, 14]

Składowa kosztów	Fotowoltaika (PV) [PLN]	Elektrownia wiatrowa [PLN]
Dokumentacja i projektowanie	100 000–150 000	250 000–400 000
Główne komponenty (panele / turbina)	1 600 000–1 800 000	3 800 000–4 500 000
Systemy montażowe / Fundamenty	400 000–500 000	800 000–1 200 000
Inwertery / Transformatory	300 000–400 000	400 000–600 000
Roboty budowlane i przyłącze	300 000–450 000	600 000–900 000
Łączny koszt (CAPEX)	~ 2,8–3,3 mln	~ 6,0–7,5 mln
Koszt jednostkowy [PLN/kW]	2 800–3 300	6 000–7 500

Analiza nakładów inwestycyjnych wykazuje, że energetyka wiatrowa charakteryzuje się ponad dwukrotnie wyższą barierą wejścia niż fotowoltaika, co wynika głównie z kosztownych komponentów mechanicznych oraz skomplikowanych prac inżyniersko-budowlanych. Koszt jednostkowy turbin wiatrowych (do 7 500 PLN/kW) znacząco przewyższa wydatki na systemy PV (do 3 300 PLN/kW), jednak te wyższe nakłady początkowe (CAPEX) są w lokalizacji Odolanów rekompensowane przez znacznie większą wydajność produkcyjną [MWh]. W konsekwencji, mimo wyższych wymagań kapitałowych na starcie, turbina wiatrowa może oferować atrakcyjniejszy wskaźnik rentowności w długim terminie dzięki wyższej efektywności energetycznej.

4.2. Koszty eksploatacyjne OPEX

Koszty operacyjne OPEX (z ang. Operating Expenditure) uwzględniają wszelkie koszty, ponoszone podczas użytkowania instalacji, które są niezbędne do utrzymania pełnej sprawności technicznej. Koszty instalacji PV to koszty o stałym charakterze, tzn. monitoring, podatek, ubezpieczenia. Należy także uwzględnić koszt mycia modułów, a także corocznego przeglądu elektrycznego [10]. Elektrownia wiatrowa generuje o wiele większe koszty eksploatacji i serwisu, ze względu na wymianę ruchomych elementów, wymiany oleju w instalacji, obowiązku przeglądu UDT (Urzędu Dozoru Technicznego), ze względu na występujące elementy hydrauliczne [11]. Tabela poniżej (tab. 6) przedstawia szacunkowe roczne koszty utrzymania OPEX dla obu technologii.

Tabela 6. Roczne koszty operacyjne OPEX [8, 14]
Table 6. Annual operating costs OPEX [8, 14]

Składowa kosztów OPEX	Fotowoltaika (PV) [PLN]	Elektrownia wiatrowa [PLN]
Serwis i konserwacja	10 000–15 000	60 000–90 000
Podatki i opłaty (grunt, budowla)	20 000–25 000	30 000–45 000
Ubezpieczenie instalacji	5 000–8 000	15 000–25 000
Monitoring i ochrona (IT/SCADA)	10 000–12 000	15 000–20 000
Zarządzanie i administracja	5 000–10 000	10 000–15 000
Łączny koszt roczny (OPEX)	~50 000–70 000	~130 000–195 000
Udział w CAPEX [% rocznie]	~1,5–2,0	~2,5–3,5

Analiza kosztów operacyjnych wskazuje, iż instalacje fotowoltaiczne posiadają przewagę ekonomiczną nad turbinami wiatrowymi. Koszty utrzymania farmy fotowoltaicznej są o wiele niższe ze względu na pasywną konstrukcję i brak ruchomych elementów. W przypadku turbiny wiatrowej elementy mechaniczne oraz zmęczenie materiału generują duże koszty serwisu wraz z wiekiem instalacji.

Przedstawione wartości kosztów inwestycyjnych oraz kosztów eksploatacyjnych zostały określone na podstawie analizy uśrednionych kosztów realizacji instalacji odnawialnych źródeł energii, literatury branżowej, a także dostępnych danych rynko-

wych. Ze względu na opracowanie własne zostały przyjęte wartości orientacyjne, które odpowiadają rzeczywistym warunkom inwestycyjnym dla instalacji OZE.

4.3. Analiza opłacalności NPV, IRR i SPBT

Ocena ekonomiczna opłacalności zastosowania jednej z technologii OZE wymaga nie tylko oceny danego projektu, ale także uwzględnienie zmienności wartości pieniądza w czasie. Jednym z ważniejszych wskaźników jest bieżąca wartość netto, która pozwala określić realny zysk inwestora po uwzględnieniu kosztów kapitału. Przyjęto stopę dyskonta na poziomie 8% [11]. Wariant fotowoltaiczny to niski nakład inwestycyjny, a także minimalne nakłady operacyjne, które przekładają się na korzystny wskaźnik wewnętrznej stopy zwrotu. Okres zwrotu dla technologii PV wynosi zazwyczaj 7–8 lat. Te dane czynią instalacje fotowoltaiczne inwestycjami o niskim profilu ryzyka. Wariant turbiny wiatrowej cechuje się dużą ilością wyprodukowanej energii w ciągu roku, jednakże posiada relatywnie duże koszty wejściowe oraz koszty eksploatacji i serwisów. Ocenę opłacalności analizowanych wariantów wykorzystano następujące wskaźniki: NPV, IRR, SPBT, które zostały przedstawione w tabeli 7. Obliczenia zostały przeprowadzone na podstawie przyjętych kosztów CAPEX i OPEX. Przyjęta stopa dyskontowa $r=8\%$ uzyskano wartość dodatnią NPV dla instalacji PV co wskazuje na opłacalność inwestycji. Wariant turbiny wiatrowej posiada NPV ujemne, co powoduje niższą efektywność finansową. Przedstawia się to za pomocą wzoru (1):

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

gdzie:

- CF_t – przepływ pieniężny w roku t , PLN
- r – stopa dyskontowa, %
- t – okres analizy, lata
- n – liczba lat eksploatacji, lata

Dla wariantu instalacji fotowoltaicznej NPV wynosi:

$$NPV = 430000 \frac{PLN}{rok} \cdot \left(\frac{1 - (1 + 0,08)^{-20}}{0,08} \right) - 3\,050\,000 \text{ PLN}$$

$$NPV = 430000 \cdot 9,82 - 3\,050\,000 \text{ PLN}$$

$$NPV = 4\,222\,600 - 3\,050\,000 \approx 1,15 \text{ mln PLN}$$

Wewnętrzna stopa zwrotu IRR została wyznaczona jako stopa dyskontowa, dla której wartość NPV wynosi 0. Instalacja PV uzyskała wartość 12,4%, a turbina wiatrowa 7,6%. Wewnętrzna stopa zwrotu na poziomie 12,4% potwierdza większą atrakcyjność inwestycyjną farmy fotowoltaicznej. NPV został przedstawiony we wzorze poniżej (2).

$$NPV = 0 \quad (2)$$

IRR dla wariantu turbiny wiatrowej:

$$0 = 670000 \frac{PLN}{rok} \cdot \left(\frac{1 + IRR}{IRR} \right)^{-20} - 6\,750\,000 \text{ PLN}$$

$$IRR \approx 0,076\%$$

Okres zwrotu SPBT został określony na podstawie stosunku nakładów inwestycyjnych do rocznych przepływów pieniężnych netto. Dla instalacji PV okres zwrotu wyniósł około 7,4 lat, a dla

turbiny wiatrowej 10,6 lat. Okres zwrotu został przedstawiony we wzorze (3).

$$SPBT = \frac{CAPEX}{CF_{roczny}} \quad (3)$$

gdzie:

$CAPEX$ – całkowite nakłady inwestycyjne, PLN

CF_{roczny} – średni roczny przepływ pieniężny netto, PLN

Dla wariantu turbiny wiatrowej:

$$SPBT = \frac{6750000 \text{ PLN}}{670\,000 \text{ PLN/rok}}$$

$$SPBT \approx 10,1 \text{ lat}$$

W tabeli poniżej (tab 7.) zostały przedstawione szacunkowe wskaźniki ekonomiczne dla wybranych technologii OZE.

Tabela 7. Porównanie szacunkowych wskaźników ekonomicznych ($r=8\%$, 20 lat) [8, 18]
Table 7. Comparison of estimated economic indicators ($r=8\%$, 20 years) [8, 18]

Wskaźnik ekonomiczny	Fotowoltaika (1 MW)	Turbina wiatrowa (1 MW)
NPV (bieżąca wartość netto) ($r=8\%$, 20 lat) [PLN]	ok. 1,15 mln	ok. - 0,12 mln
IRR (wewnętrzna stopa zwrotu) (20 lat) [%]	12,40	7,60
SPBT (okres zwrotu) (lata)	7,4	10,6
LCOE (uśredniony koszt wytworzenia energii) (PLN/MWh)	~ 245	~ 375

Z powyższej tabeli można wywnioskować, iż instalacja fotowoltaiczna jest rozwiązaniem optymalnym, biorąc pod uwagę względy finansowe, tj. krótki okres zwrotu, relatywnie niskie koszty inwestycyjne. Turbina wiatrowa pomimo większych nakładów finansowych oraz dłuższej stopy zwrotu, posiada stabilny profil energetyczny.

5. Studium przypadku

5.1. Opis lokalizacji i założenia projektowe

Miejscowość Odolanów znajduje się w województwie Wielkopolskim. W tej miejscowości znajduje się testowa instalacja produkcji wodoru, który jest częścią projektu Power-to-Gas. Teren planowanej inwestycji posiada ekspozycję na otwarte przestrzenie, a także brak przeszkód terenowych, a także budowlanych co minimalizuje ryzyko zacielenia paneli fotowoltaicznych, a także turbulencji powietrza, które mogą mieć wpływ na pracę wirnika turbiny. Najistotniejszym założeniem projektowym dla obu wariantów jest maksymalne bezpośrednie wykorzystanie wyprodukowanej energii elektrycznej przez elektrolizer. Dobre urządzenia muszą charakteryzować się wysoką sprawnością oraz zapewnienie stabilności napięciowej układu.

5.2. Wariant instalacji fotowoltaicznej

Projektowana instalacja fotowoltaiczna o mocy 1 MW będzie bazować na technologii modułów monokrystalicznych typu Bifacial (dwustronnych), które są wykonane w technologii N-type.

Dobór tego typu paneli podyktowany jest wyższą sprawnością konwersji w warunkach światła rozproszonego, a także z możliwością przetworzenia energii światła, która została odbita od podłoża. Panele zostaną zamontowane na gruncie na konstrukcji dwupodporowej z zachowaniem optymalnego kąta nachylenia dla miejscowości Odolanów wynoszącym 35° w kierunku południowym.

Aby zapewnić niezawodność oraz ciągłość dostawy przetworzonej energii przewidziano zastosowanie rozproszonego systemu inwerterowego. Zostanie wykorzystane 5 inwerterów stringowych o mocy jednostkowej około 200 kW. Pozwoli to na zoptymalizowane zarządzanie mocą oraz w przypadku awarii zostanie odłączona uszkodzona sekcja paneli, pozostałe będą nadal wytwarzać energię. Zainstalowane moduły fotowoltaiczne zostaną zintegrowane z nadrzędnym systemem sterowania energią EMS. System ten ma na celu zarządzanie energią oraz dopasowywaniem parametrów pracy farmy PV do chwilowego zapotrzebowania elektrolizera na prąd stały. Dane projektowe wariantu instalacji fotowoltaicznej zostały przedstawione w tabeli 8 (opracowanie własne na podstawie danych technicznych producentów modułów PV i inwerterów, bazy danych meteorologicznych PVGIS oraz standardów projektowych zawartych w: B. Szymański, „Fotowoltaika. Teoria i praktyka”, Kraków 2023.

Tabela 8. Parametry techniczne instalacji PV o mocy 1 MW
Table 8. Technical parameters of a 1 MW PV installation

Parametr techniczny	Wartość / Opis
Typ i moc modułu [Wp]	Monokrystaliczny Bifacial, 550
Liczba modułów	1818 sztuk
Łączna moc DC [kWp]	1000
Liczba i typ inwerterów [kW]	5 x 200 (stringowe)
Kąt nachylenia i azymut [°]	35°, orientacja S
Zajmowana powierzchnia [ha]	ok. 1,35
Średnia roczna produkcja [MWh]	ok. 1 090

5.3. Wariant turbiny wiatrowej

Wariant elektrowni wiatrowej zakłada wykorzystanie pojedynczej turbiny o trzyłopatowej konstrukcji oraz wirnikiem w osi poziomej. Lokalizacja turbiny w bezpośrednim sąsiedztwie instalacji wodorowej pozwala na zminimalizowanie strat przesyłowych energii elektrycznej, której zwiększona produkcja występuje w porze nocnej oraz okresie jesienno – zimowym. Ze względu na warunki terenowe uwzględniono turbinę o wysokości wieży 80 m. Na tej wysokości występują stabilniejsze strugi powietrza o większej prędkości. Najistotniejszym elementem jest zastosowanie asynchronicznego generatora dwustronnie zasilanego, który pozwala na współpracę z siecią przy zmiennych wartościach obrotu wirnika. To pozwoli na zoptymalizowanie produkcji energii przy słabych podmuchach wiatru, które dominują w regionie Wielkopolski. Łopaty turbiny wiatrowej będą wyposażone w system pitch control, tzn. system sterowania kątem natarcia łopat, zapewni to precyzyjną regulację mocy oddawanej do elektrolizera, co jest istotne dla stabilnych parametrów procesowych produkcji wodoru. W tabeli 9 została przedstawiona specyfikacja techniczna turbiny wiatrowej o mocy 1 MW (opra-

cowanie własne na podstawie: Normy IEC 61400-1 Wind energy generation systems, specyfikacji technicznych turbin klasy 1 MW np. Vestas, Gamesa oraz raportów rynkowych Polskiego Stowarzyszenia Energetyki Wiatrowej (PSEW).

Tabela 9. Specyfikacja turbiny wiatrowej o mocy 1 MW
Table 9. Specifications of a 1 MW wind turbine

Parametr techniczny	Wartość / Opis
Model turbiny (klasa) [MW]	Turbina 1 MW, IEC Class III
Moc znamionowa [kW]	1000
Średnica wirnika [m]	ok. 54–62
Wysokość piasty (wieża) [m]	80 (stalowa rurowa)
Prędkość startowa [m/s]	3,0
Powierzchnia wyłączenia [ha]	ok. 0,25 (bez strefy buforowej)
Średnia roczna produkcja [MWh]	ok. 1 750

5.4. Porównanie wyników technicznych i ekonomicznych

Zestawienie obu technologii, tj. technologii PV oraz turbiny wiatrowej w miejscowości Odolanów wykazuje istotne różnice w profilu produkcji energii elektrycznej, a także efektywności kosztowej. Instalacja fotowoltaiczna mimo, iż charakteryzuje się niższymi nakładami finansowymi, a także mniej skomplikowaną eksploatacją oraz serwis w ciągu roku wyprodukuje o około 60% mniej energii elektrycznej niż turbina wiatrowa. Istotnym faktem jest, iż zasilanie elektrolizera najistotniejszym wskaźnikiem jest liczba godzin pracy przy pełnym obciążeniu. Turbina wiatrowa posiada zbliżony profil do potrzeb ciągłego procesu przemysłowego. W tabeli poniżej (tab. 10) przedstawiono zestawienie technologii PV oraz turbiny wiatrowej (opracowanie własne na podstawie: Raportów Instytutu Energetyki Odnawialnej IEO „Rynek Fotowoltaiki w Polsce”, analiz rynkowych PSEW oraz danych technicznych producentów urządzeń – moduły PV 550Wp, turbina klasy 1MW).

Tabela 10. Zestawienie technologii PV i turbiny wiatrowej
Table 10. Summary of PV and wind turbine technologies

Kryterium porównawcze	Fotowoltaika (PV)	Elektrownia wiatrowa
Roczna produkcja [MWh]	1 090	1 750
Nakłady CAPEX [mln PLN]	~ 3,1	~ 6,8
Koszty OPEX (rok) [tys. PLN]	~ 60	~ 160
Zajętość gruntu [ha]	1,35	0,25
Czas zwrotu (SPBT) [lata]	7,4	10,8
Współczynnik wydajności [%]	~ 12%	~ 20%

Na podstawie powyższej tabeli oraz uwzględnienie procesu technologicznego jakim jest produkcja wodoru, można stwierdzić, że instalacja PV charakteryzuje się większą stopą zwrotu oraz mniejszym ryzykiem finansowym niż turbina wiatrowa. Jednakże z perspektywy technologicznej – zasilanie elektrolizera to turbina wiatrowa zapewni lepsze wykorzystanie mocy elektrolizera w cyklu całorocznym. Wykorzystanie mocy elektrolizera przekłada się na jednostkowy koszt produkcji kilograma wodoru, pomimo wyższych kosztów samej instalacji.

5.5. Wpływ na środowisko naturalne

Technologia PV oraz turbiny wiatrowe są to instalacje bezemisyjne ich obecność w krajobrazie jest podyktowana decyzją środowiskową oraz wymaganymi pozwoleniami na montaż danej technologii. W przypadku instalacji fotowoltaicznej najistotniejszym czynnikiem jest zajętość terenu, tj. około 1,3–1,5 ha na 1 MW. Posadowienie farmy PV na gruncie o takiej powierzchni wiąże się ze zmianą sposobu użytkowania gruntu. Wyłączenie takiej powierzchni może wiązać się z degradacją mikroflory oraz ograniczeniu retencji wody. Należy podkreślić, iż instalacja fotowoltaiczna emituje hałas z inwerterów, które pracują w ciągu dnia.

Turbiny wiatrowe emitują hałas mechaniczny oraz aerodynamiczny, to powoduje iż turbiny muszą znajdować się w znacznej odległości od zabudowy mieszkalnej. Zjawisko migotania cienia oraz emisja infradźwięków jest kolejnym istotnym aspektem, które ma wpływ na środowisko. Można stwierdzić, iż technologia PV jest mniej inwazyjna dla społeczeństwa oraz środowiska. Montaż turbiny wiatrowej jest obwarowany szeroką analizą akustyczną oraz bioróżnorodnością i wpływ na środowisko naturalne.

6. Opis wyników i badań

6.1. Cel badań

Celem niniejszych badań jest techniczno-ekonomiczna analiza porównawcza technologii fotowoltaicznych oraz turbin wiatrowych o zainstalowanej mocy 1 MW. Analiza obejmowała obszar miejscowości Odolanów w województwie Wielkopolskim. Analiza miała na celu dobór najbardziej optymalnej technologii odnawialnych źródeł energii dla procesu technologicznego – elektrolizy co pozwala na wyprodukowanie zielonego wodoru. Poprzez analizę kosztów CAPEX i OPEX, a także efektywność energetyczną należało wybrać pomiędzy niskimi kosztami inwestycyjnymi, a stabilnością i ilością produkcji energii w ujęciu rocznym.

6.2. Opis wyników badań

W trakcie przeprowadzonej analizy zostało wykazane, iż region Wielkopolski charakteryzuje się wysokim potencjałem solarnym, a także umiarkowanymi i stabilnymi zasobami wiatru na wysokości powyżej 80 m. Wykonana analiza ekonomiczna wykazała, iż technologia fotowoltaiczna charakteryzuje się niskim początkowym nakładem inwestycyjnym, a także niższymi kosztami utrzymania w porównaniu do turbiny wiatrowej. Analiza techniczna pokazała przewagę w ilości wyprodukowanej energii, która jest w stanie wygenerować około 1750 MWh rocznie co stanowi o 60% większą ilość wyprodukowanej energii w porównaniu do farmy fotowoltaicznej. Istotnym faktem jest to, iż turbiny wiatrowe stanowią lepszy profil zasilania elektrolizerów ze względu na stabilność pracy oraz ilość wyprodukowanej energii elektrycznej.

7. Wnioski

Na podstawie analizy techniczno-ekonomicznej wykazano, iż to, do jakiego celu oraz w jakim zakresie planowane jest wyko-

rzystanie danej technologii, ma kluczowy wpływ na jej wybór. Charakter i przeznaczenie inwestycji determinują bowiem wymagania techniczne oraz ekonomiczne, a dostępność kapitału początkowego wpływa bezpośrednio na możliwość realizacji wybranej technologii. Dla instalacji PV początkowy koszt to około 3,1 mln zł, w przypadku turbin wiatrowych koszty CAPEX są na poziomie 6,8 mln zł. Różnica w kosztach początkowych ma bezpośredni wpływ na stopę zwrotu inwestycji. Systemy fotowoltaiczne jako rozwiązania pasywne, generują blisko trzykrotnie niższe koszty operacyjne niż turbiny wiatrowe. W kontekście instalacji wodorowej w Odolanowie niski poziom OPEX dla fotowoltaiki sprzyja stabilizacji ekonomicznej projektu, podczas gdy wyższe koszty eksploatacyjne energetyki wiatrowej, wynikające głównie z konieczności specjalistycznego serwisu mechanicznego, wymagają większej dyscypliny finansowej.

Analiza uwzględniająca lokalne warunki klimatyczne wykazała jednak, że obszar Odolanowa sprzyja energetyce wiatrowej pod względem wielkości produkcji energii, która osiąga poziom około 1750 MWh rocznie. Wynika to z korzystnych warunków wietrzności, szczególnie na wysokościach przekraczających 80 metrów. Pomimo stosunkowo wysokiego nasłonecznienia w regionie, to właśnie turbina wiatrowa zapewnia lepsze dopasowanie do potrzeb ciągłego procesu elektrolizy wodoru, ponieważ może efektywnie pracować zarówno w godzinach nocnych, jak i w okresie zimowym. Przeprowadzona analiza potwierdziła również, że wybór optymalnej technologii nie może opierać się wyłącznie na jednym parametrze. Choć fotowoltaika wykazuje przewagę ekonomiczną dzięki niższym nakładom inwestycyjnym i kosztom eksploatacyjnym, to warunki klimatyczne czynią energetykę wiatrową rozwiązaniem bardziej wydajnym pod względem technologicznym.

Zgodnie z przyjętą tezą, dopiero kompleksowe uwzględnienie nakładów inwestycyjnych, kosztów operacyjnych oraz uwarunkowań lokalnych prowadzi do wniosku, że najbardziej efektywnym rozwiązaniem dla zasilania instalacji wodorowej w miejscowości Odolanów w województwie Wielkopolskim jest zastosowanie turbiny wiatrowej.

8. Literatura

- [1] Góralczyk, I., & Tytko, R. (2015). *Fotowoltaika: urządzenia, instalacje fotowoltaiczne i elektryczne*. Wydawnictwo i Drukarnia Towarzystwa Słowaków w Polsce.
- [2] Wolańczyk, F. (2021). *Elektrownie wiatrowe* (wyd. 3). Wydawnictwo KaBe.
- [3] Jastrzębska, G. (2007). *Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne*. WNT.
- [4] Tytko, R. (2011). *Odnawialne źródła energii*. OWG.
- [5] Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy. (2026). *Atlas energetyki solarnej dla Polski (AES-PL) oraz atlas małej energetyki wiatrowej (AMEW-PL)*. IMGW-PIB
- [6] Rzeczpospolita Polska. (2024). *Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii*, Dz.U. 2024 poz. 1361.
- [7] Jastrzębska, G. (2021). *Energia ze źródeł odnawialnych i jej wykorzystanie*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.
- [8] Instytut Energetyki Odnawialnej. (2024). *Rynek fotowoltaiki w Polsce 2024*. IEO.
- [9] Boczar, T. (2008) *Energetyka wiatrowa aktualne możliwości*

- ści wykorzystania. Wydawnictwo Pomiar Automatyka Kontrola
- [10] Lewandowski, W. M. (2020). *Proekologiczne odnawialne źródła energii* (4. wyd. uaktual.). Wydawnictwa Naukowo-Techniczne.
- [11] Paska, J. (2005). *Wytwarzanie energii elektrycznej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.
- [12] SOLEO PV. (b.d.). *Jak działa instalacja fotowoltaiczna?* <https://soleopv.pl/blog/jak-dziala-instalacja-fotowoltaiczna> (dostęp 30.03.2026)
- [13] ONDE Flow. (b.d.). *Turbiny wiatrowe – budowa, zasada działania, eksploatacja oraz uszkodzenia*. <https://onde-flow.pl/artykuly/turbiny-wiatrowe-budowa-zasada-dzialania-eksploatacja-oraz-uszkodzenia> (dostęp 30.03.2026)
- [14] Energetyka wiatrowa w Polsce. Raport 2025. (2025). *Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej*. <https://www.psew.pl/wp-content/uploads/2025/06/Wind-energy-in-Poland-Report-2025.pdf> (dostęp 30.03.2026)
- [15] *Ustawa z dnia 20 maja 2016 r. o inwestycjach w zakresie elektrowni wiatrowych*, Dz.U. 2024 poz. 317.
- [16] Ministerstwo Klimatu i Środowiska. (2021). *Polska strategia wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.* <https://www.gov.pl/web/klimat/polska-strategia-wodorowa-do-roku-2030>
- [17] International Renewable Energy Agency. (2020). *Green hydrogen cost reduction: Scaling up electrolysers to meet the 1.5°C climate goal*. IRENA. <https://www.irena.org/publications/2020/Dec/Green-hydrogen-cost-reduction> (dostęp 30.03.2026)
- [18] IRENA (2025), *Renewable power generation costs in 2024*, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi. <https://www.irena.org/Publications/2025/Jun/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2024> (dostęp 30.03.2026)