

Emilia Wajer

I rok SS2 Zarządzanie
Wydział Ekonomii, Finansów i Zarządzania
Uniwersytet Szczeciński

ROLA ZIELONEGO WODORU W KONCEPCJI EKOSYSTEMU PRZEMYSŁU 4.0 i 5.0

Wstęp

Transformacja energetyczna przemysłu mająca na celu minimalizację emisji CO₂ stanowi jedno z największych wyzwań gospodarki państw Unii Europejskiej¹. Koniecznym stało się poszukiwanie nowych, niskoemisyjnych źródeł energii dla sektorów produkcyjnych i transportowych. Obecnie elektryfikacja stanowi kluczowy kierunek badań i rozwoju pomimo niespełniania wymagań sektorów energochłonnych i transportu ciężkiego, gdzie konieczna jest wysoka gęstość energii i krótki czas jej uzupełniania². Alternatywnym źródłem energii o potencjale uzupełnienia luki w zapotrzebowaniu energetycznym jest tzw. zielony wodór wytwarzany w procesie elektrolizy zasilanej energią odnawialną. W literaturze wskazuje się, że zielony wodór może być wykorzystywany jako: magazyn energii, paliwo oraz surowiec procesowy³.

Wraz z rozwojem transformacji energetycznej następuje rozwój koncepcji czwartej oraz piątej rewolucji przemysłowej w których odnawialne źródła energii stanowią integralny element wdrażanych innowacji. Pomimo rosnącej liczby opracowań dotyczących technologii wodorowych, wciąż brakuje analiz ujmujących ich rolę w zintegrowanym ekosystemie Przemysłu 4.0 i 5.0. W artykule zastosowano analizę literatury przedmiotu oraz analizę raportów branżowych i materiałów konferencyjnych dotyczących technologii wodorowych. Niniejszy artykuł ma na celu określenie miejsca zielonego wodoru w założeniach Przemysłu 4.0 i 5.0. Zaprezentowano również model przepływu zielonego wodoru w ekosystemie przemysłowym, model ten stanowi uzupełnienie

1 H2Szczecin, *Ocena potencjału rozwoju technologii produkcji i wykorzystania zielonego wodoru w województwie zachodniopomorskim*, Szczecin 2024, s. 14-15, https://h2szczecin.pl/archiwum2024/wp-content/uploads/2024/10/Ocena_potencjalu.pdf (dostęp: 05.01.2026).

2 A. Wolnowska, W. Sarosiek, O. Gajo, A. Cimek, *Szanse i zagrożenia stosowania napełdu wodorowego w transporcie drogowym*, materiały konferencyjne H2Szczecin 2025, s. 1, <https://h2szczecin.pl/postery/> (dostęp: 10.01.2026).

3 H2Szczecin, *op. cit.*, s. 7, 20-22.

analizy teoretycznej i pozwala zobrazować funkcjonowanie zielonego wodoru w warunkach Przemysłu 4.0 i 5.0.

1. Ekosystem Przemysłu 4.0 i 5.0

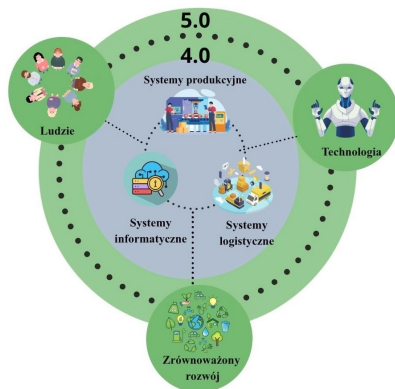
Koncepcja Przemysłu 4.0 skoncentrowana została na cyfryzacji, automatyzacji i integracji systemów. Głównym jej założeniem jest maksymalizacja produktywności i efektywności poprzez wykorzystanie nowoczesnych technologii (IoT, AI, BigData itp.) oraz połączenie ich w jedną wspólną sieć. Rozwiązanie to umożliwia podejmowanie decyzji w czasie rzeczywistym oraz ograniczenie ingerencji człowieka w powtarzalne czynności (podatne na błędy wynikające z rutyny). Czwarta rewolucja przemysłowa wprowadziła koncepcję tworzenia inteligentnych fabryk opartych na powtarzalnych, szybszych, tańszych procesach obciążonych minimalną ilością błędów, w której człowiek pełni rolę nadzorcą.⁴ Piąta rewolucja przemysłowa uzupełnia poprzednika o wymiary humanistyczne i ekologiczne. Modyfikuje podejście do człowieka w organizacji i kładzie nacisk na jego współpracę z technologią, maszynami a nawet cobotami. W tej koncepcji uwagę zwrócono również na dobrostan pracowników, bezpieczeństwo pracy, rozwój kompetencji oraz personalizację produktów. Wyróżnione zostały również aspekty takie jak istotność zrównoważonego rozwoju, efektywności energetycznej i ograniczenie negatywnego wpływu na środowisko. Poza inteligencją oraz odpornością na zakłócenia systemów w przedsiębiorstwach Przemysł 5.0 wskazuje na istotność budowania zrównoważonych i odpowiedzialnych społecznie oraz ekonomicznie modeli funkcjonowania.⁵ Poddana krytyce ze względu na dehumanizację procesów, wzrost bezrobocia oraz lekceważenie środowiska naturalnego, czwarta rewolucja przemysłowa⁶ została uzupełniona o aspekty społeczne, oraz środowiskowe. Jednoczesne całościowe podejście mające na celu maksymalizację efektywności, redukcję kosztów, automatyzację procesów (Przemysł 4.0) umożliwiając kooperację człowieka z technologią, zrównoważonym rozwojem, odpornością systemów oraz odpowiedzialnością społeczną (Przemysł 5.0) stanowi nowy model rozwoju przedsiębiorstw- Ekosystem Przemysłu 4.0 i 5.0 (rys. 1) w celu utrzymania konkurencyjności, sprostania oczekiwaniom klientów oraz podmiotów regulujących.

4 A. Michna, J. Kaźmierczak, *Przemysł 4.0 w organizacjach*, CeDeWu, Warszawa 2020, s. 30–31.

5 N. Jefroy, M. Azarian, H. Yu, *Moving from Industry 4.0 to Industry 5.0: What Are the Implications for Smart Logistics*, „Logistics”, 2023, vol. 7, nr 2, s. 3–5, 13, <https://www.mdpi.com/2305-6290/6/2/26> (dostęp: 12.01.2026); Komisja Europejska, *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2021, s. 13-14, <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/468a892a-5097-11eb-b59f-01aa75ed71a1/> (dostęp: 09.01.2026).

6 N. Jefroy, *op. cit.*, s. 3-4.

Ekosystem Przemysłu 4.0 i 5.0



Rysunek 1. Ekosystem Przemysłu 4.0 i 5.0

Źródło: Opracowanie własne.

Podjęcie powyższe ukazuje komplementarny charakter aspektów niezbędnych do utrzymania przedsiębiorstwa na rynku. Współczesne przedsiębiorstwa implementujące rozwiązania z zakresu Ekosystemu Przemysłu 4.0 i 5.0 borykają się ze wzrostem zużycia energii obciążonej jednocześnie regularnym wzrostem cen w szczególności pochodzących z nieodnawialnych źródeł⁷. Przedsiębiorstwa napotykają istotne ograniczenia rozwojowe. Z jednej strony chcą się rozwijać, implementować nowoczesne technologie i korzystać z możliwości innowacyjnych koncepcji- natomiast z drugiej strony stają przed barierą powiększających się kosztów spowodowanych wzrostem poboru energii oraz podwyżkami jednostkowych cen energii. Transformacja energetyczna staje się więc niezbędnym aspektem transformacji cyfrowej.

2. Zielony wodór i jego funkcje

Mianem zielonego wodoru określa się wodór, którego produkcja polega na wykorzystaniu energii elektrycznej pochodzącej z odnawialnych źródeł energii (np. słonecznej czy wiatrowej) w procesie elektrolizy wody.⁸ W procesie wytwarzania zielonego wodoru elektrolizer (zasilany energią OZE) rozdziela cząsteczkę wody (H₂O) na tlen (O₂) i wodór (H₂). Ten sposób wytwarzania

⁷ H2Szczecin, *op. cit.*, s. 44.

⁸ *Ibidem*, s. 20, 44.

wodoru charakteryzuje się minimalną emisją gazów cieplarnianych⁹. Zielony wodór pełni w ekosystemie przemysłowym cztery podstawowe funkcje. Pierwsza z nich to magazyn energii z OZE polegająca na możliwości magazynowania nadwyżek energii z odnawialnych źródeł charakteryzujących się okresową zmiennością podaży. Energia OZE zostaje wykorzystana do zasilania elektrolizerów, umożliwiając utworzenie zielonego wodoru, będącego chemicznym nośnikiem energii możliwym do długotrwałego magazynowania oraz transportowania na znaczne odległości stanowiąc tym samym korzyść dla obszarów korzystających z OZE¹⁰. Następną postać zielonego wodoru to paliwo technologiczne pod wpływem spalania w turbinach gazowych lub przetworzeniu w ogniach paliwowych. Generowana w ten sposób energia nie wykazuje bezpośrednio emisji CO₂ a produktem ubocznym przeprowadzanych procesów jest woda.

Przetwarzany wodór może stanowić zasilanie obiektów przemysłowych w sposób niskoemisyjny, czyli najbardziej pożądaną w najnowszych celach UE oraz zgodnie z założeniami piątej rewolucji przemysłowej dodatkowo wspierając przedsiębiorstwa w zakresie odporności energetycznej¹¹. Jako trzecią funkcję wskazuje się możliwość wykorzystania zielonego wodoru jako surowca chemicznego. Dotychczas tzw. szary wodór (wytwarzany z gazu ziemnego) stanowił znaczący element przemysłu chemicznego i rafineryjnego, bez możliwości substytucji. Zielony wodór okazał się korzystną alternatywą pozwalającą na znaczne ograniczenie śladu węglowego realizowanych procesów bez konieczności inwestycji w całkowicie nową infrastrukturę. Zastąpienie wodoru szarego, zielonym możliwe jest dzięki modyfikacjom istniejącej już infrastruktury obsługującej procesy z udziałem wodoru szarego. Możliwość zastąpienia wodoru konwencjonalnego wodorem zielonym sprawia, że technologia ta stanowi istotne narzędzie dekarbonizacji przemysłu ciężkiego i sektorów trudnych do elektryfikacji¹². Czwartą wykazywaną w literaturze funkcją zielonego wodoru jest stosowanie go jako paliwo transportowe. Możliwość implementacji ogni w paliwowych zasilanych wodorem w pojazdach ciężarowych, autobusach, jednostkach portowych oraz wózkach magazynowych. Cechuje się krótkim czasem tankowania oraz dużym potencjałem energetycznym umożliwiającym transport dalekobieżny oraz niemalże ciągłą pracę w obszarach

9 *Ibidem*, s. 44-47.

10 *Ibidem*, s. 7, 44-47.

11 W. Musiał, E. Wajer, *Wyzwania transformacji energetycznej dla Przemysłu 4.0 i 5.0*, materiały konferencyjne H2Szczecin 2025, Szczecin 2025, s. 1, <https://h2szczecin.pl/wp-content/uploads/2025/11/H2Szcz-2025-nr-9.pdf> (dostęp: 20.12.2025).

12 H2Szczecin, *op. cit.*, s. 5, 21.

magazynowych. Napęd wodorowy uzupełnia więc kolejną lukę elektryfikacji niezwykle istotną dla funkcjonowania oraz rozwoju transportu oraz gospodarki magazynowej przedsiębiorstw¹³. Ponadto, wskazuje się, że możliwa jest integracja elektrolizerów służących do produkcji zielonego wodoru z systemami zarządzania energią (EMS) umożliwiając tym samym elastyczne bilansowanie produkcji i popytu energii¹⁴.

3. Potencjał Zielonego wodoru w Przemysle 4.0 i 5.0

Rozwój koncepcji czwartej oraz piątej rewolucji przemysłowej wpłynął na zmianę sposobu postrzegania energii. Kojarzona dotychczas głównie z kosztem dla organizacji stała się elementem strategicznym, możliwym do planowania, kontrolowania i optymalizowania. Zielony wodór uwzględniając jego kluczowe funkcje staje się więc swoistym narzędziem integrującym energetykę, produkcję i logistykę a jego potencjał analizować można nie tylko pod względem technologicznym ale i systemowym w kontekście cyfrowych i zrównoważonych ekosystemów przemysłowych.¹⁵ Zielony wodór wpisuje się zatem w aspekty koncepcji Przemysłu 4.0 poprzez:

1. możliwość integracji elektrolizerów z systemami zarządzania energią (EMS) pozwalając na dynamiczne bilansowanie produkcji,
2. potencjał monitorowania wykorzystania zielonego wodoru przez systemy MES/SCADA umożliwiające predykcyjne utrzymanie ruchu i optymalizację zużycia energii¹⁶,
3. integrację zużycia wodoru jako paliwa dla pojazdów FCEV z systemami zarządzającymi flotą, umożliwiając optymalne zarządzanie trasami floty¹⁷,
4. połączenie energetyki, przemysłu oraz transportu możliwe dzięki wspólnej infrastrukturze wodorowej stanowiącej cyfrowo koordynowany system przepływów integrujący sektor.

Powyższe możliwości zielonego wodoru wpasowują go w główne założenia koncepcji Przemysłu 4.0 opartej na cyfryzacji, automatyzacji oraz integracji danych w czasie rzeczywistym. Analizując koncepcję rewolucji przemysłowych jako całości, Ekosystemu Przemysłu 4.0 i 5.0, dalszej analizie poddano aspekty łączące zielony wodór z Przemysłem 5.0 rozszerzającym poprzednika o aspekty zrównoważenia, odporności oraz wymiar społeczny ukazując, że:

13 A. Wolnowska, W. Sarosiek, O. Gajo, A. Cimek, *op. cit.*, s. 1.

14 W. Musiał, E. Wajer, *op. cit.*, s. 1.

15 H2Szczecin, *op. cit.*, s. 5, 7, 21-22.

16 *Ibidem*, s. 47.

17 A. Wolnowska, W. Sarosiek, O. Gajo, A. Cimek, *op. cit.*, s. 1.

5. zastąpienie wodoru szarego zielonym wpisuje się w aspekt zrównoważenia poprzez wpływ na redukcję emisji CO₂ w transporcie oraz przemyśle bez konieczności całkowitej przebudowy instalacji (w przypadku przedsiębiorstw przemysłowych),
6. lokalna produkcja wodoru zielonego wspiera aspekty odporności oraz wymiaru społecznego poprzez zwiększenie bezpieczeństwa energetycznego zakładów przemysłowych i regionów,
7. rozwój regionalnych ekosystemów związanych z produkcją oraz wykorzystywaniem zielonego wodoru np. West Pommeranian Hydrogen Valley¹⁸ umożliwia współpracę pomiędzy przemysłem, nauką i samorządami aktywizując lokalne społeczeństwo oraz kształtując nowe możliwości pracy.

Zielony wodór wpisuje się zatem w logikę koncepcji czwartej oraz piątej rewolucji przemysłowej poprzez potencjał rozwiązań w obszarach jego produkcji, przemysłu chemicznego, energetyki, transportu ciężkiego, logistyki przemysłowej i ekosystemu regionalnego przedstawionych w tabeli poniżej (tabela 1).

Tabela 1. Efekty wdrożenia rozwiązań z zakresu Ekosystemu Przemysłu 4.0 i 5.0 w wybranych obszarach

Obszar	Powiązanie z Przemysłem 4.0	Powiązanie z Przemysłem 5.0	Efekt wdrożenia rozwiązań z zakresu Ekosystemu 4.0 i 5.0
Produkcja wodoru	Cyfrowo sterowane elektrolizery	Lokalna samowystarczalność energetyczna	Stabilizacja systemu energetycznego
Przemysł chemiczny	Monitorowanie procesów przy pomocy MES/SCADA	Redukcja emisji CO ₂	Dekarbonizacja bez konieczności zmiany infrastruktury (modyfikacja istniejącej)
Energetyka	Integracja z EMS	Odporność na wahania cen energii	Magazynowanie nadwyżek OZE
Transport ciężki	Kontrola nad zużyciem zielonego wodoru	Zeroemisyjna mobilność	Redukcja emisji CO ₂ w transporcie dalekobieżnym

¹⁸ West Pomeranian Hydrogen Valley (Zachodniopomorska Dolina Wodorowa) to regionalna inicjatywa współpracy przemysłu, nauki, administracji publicznej oraz sektora energetycznego, której celem jest rozwój technologii produkcji, magazynowania, dystrybucji i wykorzystania wodoru w gospodarce regionu.

Tabela 1. cd.

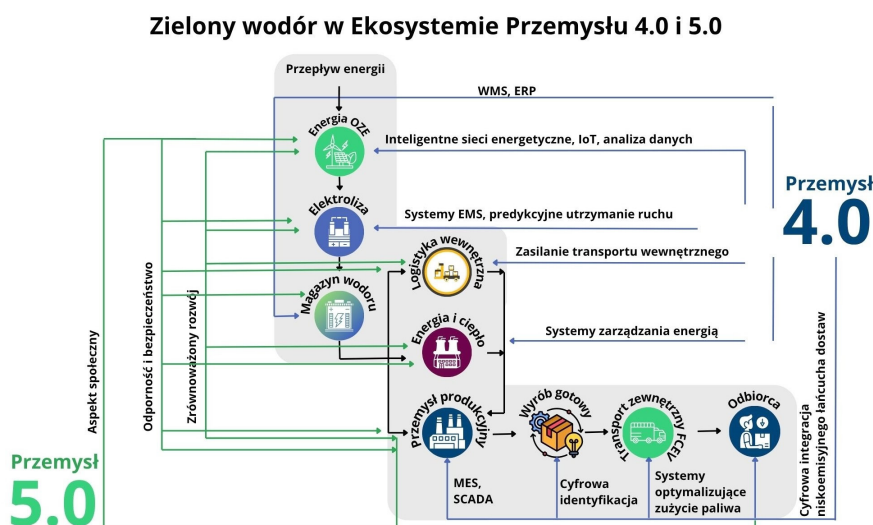
Logistyka przemysłowa	Integracja z WMS/ ERP	Zrównoważone magazyny	Eliminacja przestojów i emisji
Ekosystem regionalny	Integracja sektorowa	Rozwój klastrów i „dolin wodorowych”	Efekt synergii infrastrukturalnej

Źródło: Opracowanie własne.

Przedstawione powyżej obszary ukazują, że zielony wodór stanowi strategiczny element transformacji współczesnego przemysłu oraz regionów.

4. Model przepływu Zielonego Wodoru w Ekosystemie Przemysłu 4.0 i 5.0

W warunkach wdrażania Ekosystemu Przemysłu 4.0 i 5.0 kluczowy element stanowi transformacja energetyczna. Szczególne znaczenie ma zatem integralność zielonego wodoru z procesami przemysłowymi i logistycznymi. Poniższy model przedstawia systemowy przepływ zielonego wodoru w ekosystemie przemysłowym, ukazując jego rolę jako elementu integrującego energetykę, produkcję i logistykę w warunkach transformacji cyfrowej i zrównoważonego rozwoju (rysunek 2).



Rysunek 2. Zielony Wodór w Ekosystemie Przemysłu 4.0 i 5.0

Źródło: Opracowanie własne.

Konstrukcja przedstawionego modelu została skoncentrowana na założeniu, że zielony wodór nie stanowi jedynie alternatywnego nośnika energii, lecz element integrujący procesy energetyczne, produkcyjne i logistyczne (zgodnie z wcześniejszymi rozważaniami) w przedsiębiorstwie i jego otoczeniu. Model uwzględnia fizyczne przepływy energii wraz z warstwą cyfrową umożliwiającą jej monitorowanie, optymalizację oraz sterowanie w czasie rzeczywistym. Punktem wyjścia są odnawialne źródła energii, których produkcja charakteryzuje się zmiennością wynikającą z warunków pogodowych. Wymaga to zastosowania inteligentnych sieci energetycznych, technologii IoT oraz analizy danych, umożliwiających prognozowanie produkcji i efektywne zarządzanie energią. Energia z OZE zasila elektrolizery, w których w procesie elektrolizy powstaje zielony wodór. Integracja elektrolizerów z systemami zarządzania energią pozwala dostosowywać produkcję do nadwyżek energii odnawialnej, zwiększając efektywność energetyczną systemu oraz jego niezawodność dzięki predykcyjnemu utrzymaniu ruchu. Magazynowanie wodoru pełni funkcję bufora stabilizującego system energetyczny. Umożliwia ono długoterminowe przechowywanie energii w postaci chemicznej oraz bilansowanie podaży i zapotrzebowania na energię. Monitorowanie parametrów magazynowania oraz integracja danych z systemami produkcyjnymi pozwalają na optymalne zarządzanie zasobami energetycznymi i zwiększenie odporności przedsiębiorstwa na zakłócenia w dostawach energii.

Zmagazynowany wodór może być wykorzystywany w kilku obszarach funkcjonalnych przedsiębiorstwa. W produkcji energii i ciepła umożliwia niskoemisyjne zasilanie obiektów przemysłowych oraz stabilizację bilansu energetycznego zakładu. W procesach produkcyjnych może pełnić funkcję paliwa technologicznego lub surowca procesowego, a jego integracja z systemami MES i SCADA umożliwia monitorowanie procesów oraz optymalizację zużycia energii. Zastosowanie wodoru w produkcji przyczynia się do ograniczenia emisji i poprawy efektywności środowiskowej działalności przedsiębiorstwa. Model uwzględnia także logistykę wewnętrzną, w której wodór może zasilć wózki magazynowe i pojazdy autonomiczne, zwiększając efektywność operacyjną oraz poprawiając warunki środowiskowe pracy. Wytwarzanie wyrobów z wykorzystaniem zielonego wodoru pozwala ograniczyć ślad węglowy produktów, natomiast cyfrowa identyfikowalność procesów umożliwia monitorowanie ich wpływu środowiskowego i energetycznego. W dalszym etapie model obejmuje transport dalekobieżny realizowany z wykorzystaniem pojazdów wodorowych. Integracja pojazdów z systemami zarządzania flotą umożliwia optymalizację tras, kontrolę zużycia paliwa oraz zwiększenie efektywności transportu. Ostatnim elementem jest odbiorca końcowy oraz

integracja niskoemisyjnego łańcucha dostaw, która zwiększa przejrzystość przepływów oraz wspiera rozwój zrównoważonych modeli biznesowych.

Model uzupełniają dwie wzajemnie przenikające się warstwy systemowe. Warstwa Przemysłu 4.0 obejmuje cyfrową integrację procesów poprzez systemy ERP, WMS, MES, SCADA, IoT oraz analitykę danych, umożliwiając monitorowanie i optymalizację przepływów energii i materiałów. Warstwa Przemysłu 5.0 koncentruje się na zrównoważonym rozwoju, odporności energetycznej, bezpieczeństwie pracy oraz społecznym wymiarze transformacji przemysłowej. W ujęciu całościowym model ukazuje zielony wodór jako element integrujący transformację cyfrową z transformacją energetyczną. Jego zastosowanie umożliwia budowę inteligentnych, odpornych i zrównoważonych ekosystemów przemysłowych, w których energia, produkcja i logistyka funkcjonują jako wzajemnie powiązane elementy jednego systemu.

Podsumowanie

Transformacja energetyczna stanowi jeden z kluczowych warunków dalszego rozwoju współczesnego przemysłu, szczególnie w kontekście rosnących wymagań środowiskowych oraz presji kosztowej związanej z energią.

W związku z powyższym przeprowadzona analiza literatury pod kątem zielonego wodoru i jego korelacji z systemami Przemysłu 4.0 i 5.0 wykazały, że:

1. zielony wodór stanowi kluczowe uzupełnienie systemu energetycznego,
2. integracja technologii wodorowych z systemami zarządzania energią i rozwiązaniami cyfrowymi wspiera realizację założeń Przemysłu 4.0, natomiast ich wpływ na redukcję emisji CO₂, odporność energetyczna i zrównoważony rozwój wpisuje się w cele Przemysłu 5.0
3. w ujęciu systemowym zielony wodór pełni rolę elementu integrującego energetykę, produkcję i logistykę, umożliwiając budowę niskoemisyjnych, odpornych i zrównoważonych ekosystemów przemysłowych.

Niniejszym przedsiębiorstwa, szczególnie z sektorów energochłonnych i logistycznych, powinny rozważyć stopniową integrację technologii wodorowych z istniejącą infrastrukturą energetyczną i cyfrową, rozpoczynając od obszarów o największym potencjale redukcji emisji i poprawy efektywności energetycznej, takich jak procesy technologiczne, logistyka wewnętrzna oraz transport ciężki.

Bibliografia

H2Szczecin, *Ocena potencjału rozwoju technologii produkcji i wykorzystania zielonego wodoru w województwie zachodniopomorskim*, Szczecin 2024.

- Jefroy N., Azarian M., Yu H., *Moving from Industry 4.0 to Industry 5.0: What Are the Implications for Smart Logistics*, „Logistics”, 2023, vol. 7, nr 2.
- Komisja Europejska, *Industry 5.0: Towards a sustainable, human-centric and resilient European industry*, Publications Office of the European Union, Luxembourg 2021.
- Michna A., Kaźmierczak J., *Przemysł 4.0 w organizacjach*, CeDeWu, Warszawa 2020.
- Musiak W., Wajer E., *Wyzwania transformacji energetycznej dla Przemysłu 4.0 i 5.0*, materiały konferencyjne H2Szczecin 2025, Szczecin 2025.
- Wolnowska A., Sarosiek W., Gajo O., Cimek A., *Szanse i zagrożenia stosowania napędu wodorowego w transporcie drogowym*, materiały konferencyjne H2Szczecin 2025, Szczecin 2025.

Streszczenie

Artykuł analizuje znaczenie zielonego wodoru w procesie transformacji energetycznej przemysłu w warunkach rosnących wymagań środowiskowych i energetycznych. Wskazano ograniczenia elektryfikacji w sektorach energochłonnych i transporcie ciężkim oraz przedstawiono zielony wodór jako rozwiązanie uzupełniające lukę energetyczną. Omówiono jego funkcje jako magazynu energii, paliwa, surowca procesowego i paliwa transportowego. Wykazano, że zielony wodór wspiera realizację założeń Przemysłu 4.0 poprzez integrację z systemami cyfrowymi oraz Przemysłu 5.0 poprzez wzmacnianie zrównoważonego rozwoju i odporności energetycznej. Zaproponowany model przepływu wodoru ukazuje jego rolę jako elementu integrującego energetykę, produkcję i logistykę.

Słowa kluczowe: zielony wodór, transformacja energetyczna, Przemysł 4.0, Przemysł 5.0, logistyka niskoemisyjna

THE ROLE OF GREEN HYDROGEN IN THE CONCEPT OF THE INDUSTRY 4.0 AND 5.0 ECOSYSTEM

Summary

The article examines the role of green hydrogen in the industrial energy transition amid increasing environmental and energy demands. It highlights the limitations of electrification in energy-intensive sectors and heavy transport and presents green hydrogen as a complementary solution to the emerging energy gap. Its functions as energy storage, fuel, industrial feedstock, and transport fuel are discussed. The study shows that green hydrogen supports Industry 4.0 through digital integration and aligns with Industry 5.0 by enhancing sustainability and energy resilience. The proposed hydrogen flow model illustrates its role in integrating energy, production, and logistics systems.

Keywords: green hydrogen, energy transition, Industry 4.0, Industry 5.0, low-emission logistics