

Andrzej Chodyński

prof. dr hab., Uniwersytet Andrzeja Frycza Modrzewskiego w Krakowie
<http://orcid.org/0000-0003-4962-5143>

Zarządzanie technologiami wodorowymi. Aspekty bezpieczeństwa ekologiczno-energetycznego

Wprowadzenie

W literaturze przedmiotu wskazuje się na zależność między bezpieczeństwem energetycznym a bezpieczeństwem ekologicznym, w nawiązaniu do konieczności zapewnieniu państwu paliw i energii z uwzględnieniem aspektów ochrony środowiska naturalnego, w tym czynników klimatycznych, społecznych i technicznych¹. Podkreśla się znaczenie alternatywnych źródeł energii, także energetyki jądrowej dla zapewnienia zarówno bezpieczeństwa energetycznego, jak i bezpieczeństwa ekologicznego Polski, również w kontekście zmian klimatycznych².

Bezpieczeństwo ekologiczno-energetyczne obejmuje problematykę ochrony środowiska naturalnego (w tym aspekty klimatyczne, związane z emisją gazów cieplarnianych, głównie dwutlenku węgla) i zapewnienia dostaw energii z wykorzystaniem surowców niewywołujących w procesach ich przetwarzania w energię zagrożeń ekologicznych.

Zarządzanie alternatywnymi źródłami energii, ograniczającymi niekorzystne oddziaływania na środowisko naturalne, w tym związane z emisją gazów

¹ M. Jurgilewicz, A. Ovsepyan, *Bezpieczeństwo energetyczne a ochrona środowiska*, „Studia Prawnicze KUL” 2017, nr 2 (70), s. 71–83.

² H. Kruk, *Wykorzystanie źródeł energii a bezpieczeństwo energetyczne i ekologiczne Polski*, „Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni” 2012, nr 72, s. 23–30.

cieplarnianych, odnosi się nie tylko do wyboru tych źródeł, ale bierze pod uwagę dojrzałość dostępnych technologii.

Możliwości wykorzystania technologii powinny być związane z zapewnieniem ciągłości dostaw surowców, najlepiej na bazie zasobów krajowych. Takim źródłem energii jest wodór. Strategie odnośnie do produkcji i dystrybucji wodoru oraz jego zastosowania w przemyśle, transporcie i energetyce są przyjmowane w planach rządowych³. Zwraca się uwagę także na możliwości magazynowania wodoru⁴. Wodór jako nośnik energii może odrywać ważną rolę w dekarbonizacji różnych sektorów gospodarki Unii Europejskiej⁵.

Obecnie wodór jest produkowany przede wszystkim z gazu ziemnego (którego głównym składnikiem jest metan) i węgla⁶, czyli w oparciu o paliwa kopalne. Wodór taki jest określany jako szary⁷. Istotne znaczenie ma fakt, że Polska jest piątym na świecie i trzecim w Europie producentem wodoru⁸. Jest on wytwarzany głównie w przemyśle chemicznym (m.in. rafinerie ropy naftowej, producenci nawozów)⁹. Największym polskim producentem wodoru jest tarnowska Grupa Azoty S.A. (jednostka dominująca w Grupie Kapitałowej Grupa Azoty)¹⁰.

Analizując problemy bezpieczeństwa, warto mieć na uwadze fakt, że w przypadku importu gazu ziemnego i ropy naftowej znaczną jego część stanowią dostawy dla przemysłu chemicznego i petrochemicznego, który wprawdzie produkuje wodór z tych surowców, ale z przeznaczeniem dla celów przemysłowych¹¹.

³ *Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.*, Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Biuletyn Informacji Publicznej, 14.01.2021, <https://bip.mos.gov.pl/strategie-plany-programy/polska-strategia-wodorowa-do-roku-2030-z-perspektywa-do-2040-r/> [dostęp: 11.04.2024].

⁴ S. Singh *et al.*, *Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2015, t. 51, s. 623–633, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115006127> [dostęp: 12.05.2024].

⁵ P. Brusilo, *The EU green industrial policy for hydrogen economy development*, „Ekonomia XXI wieku” 2023, nr 26, s. 17–26.

⁶ K. Cygańczuk, E. Roman, *Strategia wodorowa Polski i Unii Europejskiej w czasie kryzysu energetycznego*, „Przegląd Chemiczny” 2022, t. 101, nr 11, s. 903–911.

⁷ Jest on wytwarzany w procesie reformingu parowego metanu, a także poprzez gazyfikację węgla i ropy, zob. *Mapa rozwoju rynku i technologii dla obszaru technologii wodorowych*, PARP. Grupa PFR, 2022, s. 28–29, https://smart.gov.pl/images/BTR_Technologie-wodorowe-FINAL_16.08.22.pdf [dostęp: 11.04.2024].

⁸ K. Cygańczuk, E. Roman, *op. cit.*

⁹ M. Kobryński, *Jaką przyszłość w Polsce ma zielony wodór?* Rynek Infrastruktury, 9.07.2023, <https://www.rynekinfrastruktury.pl/wiadomosci/biznes-i-przemysl/jaka-przyszlosc-w-polsce-ma-zielony-wodor-86684.html> [dostęp: 21.10.2023].

¹⁰ *Bezpieczeństwo w Grupie Azoty S.A.*, Tarnów 2015, <https://docplayer.pl/69465006-Bezpieczenstwo-w-grupie-azoty-s-a.html> [dostęp: 18.11.2024].

¹¹ J. Kupecki *et al.*, *Analiza potencjału technologii wodorowych w Polsce do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku*, Centrum Technologii Wodorowych, Instytut Energetyki; Wydział Zarządzania, Uniwersytet Warszawski; Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych, [Warszawa 2021], s. 321.

W przypadku nowych technologii energetycznych o ich sukcesie rynkowym decyduje już nie tylko ekonomika produkcji czy dostępność surowców, ale w znacznym stopniu – wielkość emisji gazów cieplarnianych w cyklu życia produktów wytwarzanych według konkretnej technologii¹².

W związku z agresją Rosji na Ukrainę, dla poprawy bezpieczeństwa energetycznego w powiązaniu z aspektem ekologicznym w pakiecie Fit for 55 Unii Europejskiej dokonano zmian założeń o ograniczeniu emisji gazów cieplarnianych. Aktualizacja podnosi dotychczasowe założenia poziomu redukcji emisji netto do roku 2030 z co najmniej 55% do 57%¹³.

Celem niniejszej pracy jest wykazanie, że bezpieczeństwo ekologiczno-energetyczne z uwzględnieniem strategii wodorowej może być osiągnięte przy zastosowaniu technologii o odpowiednim poziomie dojrzałości. Przy ocenie dojrzałości technologii, w powiązaniu z cyklem życia technologii i LCA (*life cycle assessment* – środowiskowa ocena cyklu życia), należy uwzględnić elementy związane z bezpieczeństwem: niezakłóconą dostępność surowców i materiałów, w tym w odniesieniu do łańcuchów dostaw, a także zapewnienie odpowiedniego poziomu ryzyka pojawienia się awarii w systemach dostaw, produkcji i dystrybucji, jako elementu dojrzałości tych technologii.

Pytania badawcze związane z zarządzaniem technologiami są następujące: 1. jaki jest stan dojrzałości technologii wodorowych spełniających wymagania niskiej emisyjności wobec zmian klimatycznych, oraz 2. jaka jest możliwość wykorzystania technologii tradycyjnych, bazujących na paliwach kopalnych, do produkcji wodoru.

Jako metody badawcze zastosowano krytyczną analizę literatury przedmiotu, analizę różnych dokumentów oraz częściowo skorzystano z obserwacji. Zastosowano podejście dedukcyjno-indukcyjne, a także pragmatyczne, nastawione na uzyskanie efektów praktycznych.

Perspektywy pozyskiwania wodoru

Możliwości pozyskiwania wodoru odnawialnego i niskoemisyjnego podano w tabeli 1.

W strategii Unii Europejskiej wodór ma osiągnąć poziom 13–14-proc. udziału w miksie energetycznym UE do roku 2050¹⁴. Najbardziej proekologiczny, tzw.

¹² D. Rogowska, *Opracowanie modelu obliczania emisji GHG w cyklu życia biowodoru produkowanego w technologii (bio)metan do wodoru i węgla*, „Nafta-Gaz 2022”, nr 6, s. 468–478.

¹³ P. Rapacka, *Unia Europejska przyjmuje nową dyrektywę o OZE i rozporządzenie ReFuelUE*, TerazŚrodowisko.pl, 11.10.2023, <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/Dyrektywa-RED-III-zmiany-Lotnictwo-emisje-cele-OZE-14050.html> [dostęp: 4.11.2024].

¹⁴ *Zielony wodór z OZE w Polsce. Wykorzystanie energetyki wiatrowej i PV do produkcji zielonego wodoru jako szansa na realizację założeń Polityki Klimatyczno-Energetycznej UE*

zielony wodór stanowi zaledwie ok. 1% globalnej produkcji¹⁵. Wykorzystanie zielonego wodoru wyprodukowanego z wykorzystaniem energii elektrycznej z instalacji OZE poprzez elektrolizę wody traktowane jest jako jedna ze ścieżek prowadzących do dekarbonizacji gospodarek i uzyskania neutralności klimatycznej. Jedną z przeszkód w stosowaniu zielonego wodoru są koszty produkcji i cena tego surowca: do 6,6 euro/kg, podczas gdy wodór pochodzący z paliw kopalnych kosztuje około 2 euro/kg¹⁶. Warto zwrócić uwagę, że problemem przy produkcji zielonego wodoru z wykorzystaniem energii elektrycznej wytwarzanej przez farmy wiatrowe i źródła fotowoltaiczne jest nieregularność pracy tych instalacji¹⁷. Równocześnie zakłada się możliwość umieszczania elektrolizerów do produkcji wodoru blisko morskich farm wiatrowych¹⁸.

Dla wytwarzania bezemisyjnego, zielonego wodoru rozważane są technologie wysokotemperaturowej elektrolizy pary wodnej (o wyższej sprawności niż w rozwiązaniach opartych na elektrolizie wody) z udziałem OZE, z wykorzystaniem elektrowni jądrowych (tzw. wodór fioletowy) czy małych modułowych reaktorów jądrowych (SMR, *small modular reactor*)¹⁹. Metody (technologie) produkcji wodoru charakteryzują się różną emisyjnością gazów cieplarnianych²⁰. Wodór zielony, bardzo czysty, może być jest przetwarzany w energię elektryczną w ogniwach paliwowych, wykorzystywany w środkach transportu, w syntezach chemicznych, w produkcji syntetycznego metanu czy stanowić domieszki do paliwa gazowego²¹. W literaturze przedmiotu omawiane są aspekty technologiczno-ekonomiczne wytwarzania i zastosowań wodoru²².

w Polsce, Dolnośląski Instytut Studiów Energetycznych, Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, Wrocław 2021, s. 40, <https://disc.org.pl/Raport-Zielony-Wodor-z-OZE.pdf> [dostęp: 10.11.2024].

¹⁵ *Globalny wyścig o zielony wodór...*, *op. cit.*

¹⁶ B. Kupiec, *op. cit.*

¹⁷ *Czy produkcja zielonego wodoru może być opłacalna?*, <https://www.itpe.pl/blog/2023/06/14/czy-produkcja-zielonego-wodoru-moze-byc-oplaczalna/> [dostęp: 21.10.2024].

¹⁸ R. Tarkowski, *Wodór jako paliwo przyszłości. Wyzwania dla polskiej geologii*, „Przegląd Geologiczny” 2021, t. 69, nr 4, s. 210–217.

¹⁹ M. Kobryński, *op. cit.*

²⁰ Wysoka emisyjność jest związana z produkcją wodoru szarego w procesie reformingu parowego węglowodorów (metanu). Wynosi ona ok. 9–12 kg CO₂/kg H₂. Reforming parowy służy do pozyskiwania wodoru oraz gazów syntezowych do produkcji metanolu i amoniaku. Tak wytwarzany wodór znajduje zastosowanie głównie w przemyśle rafineryjnym (petrochemia), spożywczym, azotowym oraz metalurgicznym. Zerową emisyjnością charakteryzuje się wytwarzanie wodoru zielonego w procesie elektrolizy z wykorzystaniem energii elektrycznej ze źródeł odnawialnych, zob. *9 kolorów wodoru – poznaj ich znaczenie, zastosowanie i potencjał wykorzystania*, Powermeetings.eu, <https://powermeetings.eu/kolory-wodoru-znaczenie-zastosowanie-potencjal/> [dostęp: 21.10.2024].

²¹ K. Cygańczuk, Ł. Roman, *op. cit.*

²² M. Yue *et al.*, *Hydrogen energy systems: a critical review of technologies, applications, trends and challenges*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2021, t. 146, 111180, <https://hal.science/hal-03221850/document> [dostęp: 12.05.2024].

Tabela 1. Wykorzystanie wodoru odnawialnego (zielonego) oraz niskoemisyjnego (fioletowego)

Opis ogólny	Definicje/pozyskiwanie wodoru
<p>Założenia:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Dyrektywa Unii Europejskiej dotycząca energii odnawialnej (RED III) z 2023 r. zakłada wykorzystanie zielonego wodoru na poziomie 5,7% zapotrzebowania na paliwa w UE do 2030 r.^[1]. – Komisja Europejska stawia za cel wyprodukowanie do 10 milionów ton wodoru zielonego do 2030 r. Planuje zainstalowanie do jego produkcji do 2030 r. elektrolizerów o mocy co najmniej 40 GW, zasilanych energią z OZE (odnawialne źródła energii)^[2]. – Zielony wodór powinien stanowić 42% tego surowca zużywanego w przemyśle EU do 2030 r. i 60% do 2035 r.^[3]. – Polska Strategia Wodorowa z grudnia 2021 r. zakłada nakłady inwestycyjne do 2030 r. na poziomie ok. 11 mld zł, z czego ok. 9 mld zł ma być przeznaczane na instalacje do produkcji wodoru zarówno nisko- (o emisjach poniżej 5,8 kg CO₂ na kg H₂), jak i zeroemisyjnego. Źródła niskoemisyjne mają pokryć 99,4% zapotrzebowania na wodór w gospodarce narodowej^[4]. 	<ul style="list-style-type: none"> – Przewidywane definicje (regulacje) UE: 1. Wodór odnawialny (tzw. wodór zielony), wytwarzany z wykorzystaniem energii ze źródeł odnawialnych innych niż biomasa, który zapewnia 70-proc. redukcję emisji gazów cieplarnianych w porównaniu z wodorem pochodzącym z paliw kopalnych. 2. Wodór niskoemisyjny (tzw. wodór niebieski) wytwarzany z energii ze źródeł nieodnawialnych spełnia próg ograniczenia emisji gazów cieplarnianych o 70% w porównaniu z wodorem pochodzącym z paliw kopalnych^[5]. – Wodór niebieski jest produkowany z węglowodorów (paliw kopalnych) z wykorzystaniem metod wychwytu CO₂. Wodór turkusowy, o dużej czystości, pochodzi z pirolizy metanu^[6]. – Wodór czarny pozyskuje się z syntetycznego gazu z węgla kamiennego, a brązowy – z węgla brunatnego. Wodór różowy (inaczej: fioletowy, purpurowy, czerwony) jest wytwarzany w procesie elektrolizy zasilanej energią jądrową, zaś wodór żółty – także w tym procesie, ale z wykorzystaniem energii słonecznej i nanotechnologii; występuje też wodór naturalny (biały)^[7]. – Zeroemisyjny wodór (RFNBO – <i>renewable fuels of non-biological origin</i>), „zielony”, nie generuje emisji CO₂ w procesie produkcji, transportu i wykorzystania. Ocena redukcji emisji gazów cieplarnianych (ponad 70%) wykorzystuje metodykę obliczania emisji w cyklu życia RFNBO. Wodór niskoemisyjny, charakteryzuje się emisjami CO₂ poniżej 3 ton CO₂ na tonę H₂ w całym cyklu życia^[8].
<p>Aspekty technologiczne:</p> <ul style="list-style-type: none"> – Reforming parowy metanu, dominująca aktualnie technologia produkcji wodoru w Polsce, charakteryzuje się najniższym kosztem wytwarzania, spowodowanym niższym poziomem emisji CO₂ niż przy przerobieniu węgla oraz wysokim stopniem komercjalizacji rynkowej technologii^[9]. 	<ul style="list-style-type: none"> – Polska Strategia Wodorowa z grudnia 2021 r. zakłada^[10], że wodór niskoemisyjny będzie wytwarzany przez procesy elektrolizy, reforming parowy biogazu i biometanu, jak i węglowodorów w powiązaniu z technologiami CCS (<i>carbon capture and storage</i>, wychwyt i składowanie dwutlenku węgla) i CCU (<i>carbon capture and utilization</i>, wychwyt i wykorzystanie dwutlenku węgla)^[11]. Zakłada się także zgazowanie, fermentację oraz pirolizę biomasy i odpadów, a także technologię zgazowania węgla w powiązaniu z CCS i CCU oraz technologię IGCC (<i>integrated gasification combined cycle</i>) stanowiącą cykl gazowo-parowy ze zgazowaniem paliw stałych (węgla, biomasy, odpadów). Rozważana jest także technologia

Opis ogólny	Definicje/pozyskiwanie wodoru
	wykorzystującą część wychwyconej emisji gazów ze spalania do produkcji energii znana jako IGFC (<i>integrated gasification fuel cell</i>), w której pozyskiwany gaz syntezowy, zawierający wodór, po oczyszczeniu jest spalany i używany do napędu turbin gazowo-parowych ^[12] .

^[1] *Globalny wysięg o zielony wodór nabiera tempa. Polska jak na razie zostaje w tyle*, KierunekChemia.pl, 7.08.2023, <https://www.kierunekchemia.pl/artukul.99487,globalny-wysieg-o-zielony-wodor-nabiera-tempa-polska-jak-na-razie-zostaje-w-tyle.html> [dostęp: 27.10.2024]. ^[2] B. Kupiec, *Zielony wodór w świetle nowelizowanej dyrektywy RED II*, ZielonaGospodarka.pl, 29.01.2023, <https://zielonagospodarka.pl/zielony-wodor-w-swietle-nowelizowanej-dyrektywy-red-ii-6516> [dostęp: 21.10.2024]. ^[3] *100 GW nowych mocy w OZE rocznie – nadciąga Dyrektywa RED III*, GLOBenergia, 20.06.2023, <https://globenergia.pl/100-gw-nowych-mocy-w-oze-rocznie-nadciaga-dyrektywa-red-iii> [dostęp: 4.11.2024]. ^[4] T. Elźbiaciak, *Jakie elektrolizery wyprodukują zielony wodór w Polsce?*, WysokieNapięcie.pl, 16.02.2023, <https://wysokienapiecie.pl/82287-elektrolizery-wyprodukują-wodor-w-polsce> [dostęp: 21.10.2024]. ^[5] Zob. Mapa rozwoju rynku i technologii dla obszaru technologii wodorowych, PARP. Grupa PFR, 2022, s. 28–29, https://smart.gov.pl/images/BTR_Technologie-wodorowe_FINAL_16.08.22.pdf [dostęp: 11.04.2024]. ^[6] *Ibidem*. ^[7] Zob. *9 kolorów wodoru – poznaj ich znaczenie, zastosowanie i potencjał wykorzystania*, Powermeetings.eu, <https://powermeetings.eu/kolory-wodoru-znaczenie-zastosowanie-potencjal/> [dostęp: 21.10.2024]. ^[8] A. Czulaak, *Plan rozwoju technologii wodorowych w Małopolsce do 2030 roku*, Małopolska Innowacyjna, Kraków 2023, s. 14, <https://www.malopolska.pl/aktualnosci/biznes-i-gospodarka/malopolska-ma-plan-na-wodor> [dostęp: 18.11.2024]. ^[9] J. Kupecki, *et al.*, *op. cit.*, s. 243–244. ^[10] T. Elźbiaciak, *op. cit.* ^[11] Zob. hasła: *Sekwestracja dwutlenku węgla (CCS); Technologia CCU, Słownik ochrony środowiska*, Teraz-środowisko.pl, <https://www.teraz-srodowisko.pl/sownik-ochrona-srodowiska> [dostęp: 21.10.2024]. ^[12] *Japońskie technologie „czystego węgla” w zainteresowaniu Polski*, „Dziennik Gazeta Prawna”, 19.12.2017, <https://www.gazetaprawna.pl/wiadomosci/artykuly/1093111,japonskie-technologie-czystego-wegla-w-zainteresowaniu-polski.html> [dostęp: 10.11.2024].

Źródło: opracowanie własne.

W analizie ryzyka należy zwrócić uwagę także na niebezpieczeństwa wynikające z cech wodoru: m.in. palności, wybuchowości, przenikalności czy powodowania kruchości wodorowej materiałów. Wykorzystanie wodoru jako nośnika energii (konwertowanej lub magazynowanej) może stwarzać zagrożenie pożarowe i wybuchowe w instalacjach technicznych²³. Największy polski producent wodoru – Grupa Azoty S.A. – jest zakładem o dużym ryzyku wystąpienia poważnej awarii przemysłowej, choć w dokumencie „Bezpieczeństwo w Grupie Azoty S.A.” nie wymienia się wodoru jako głównej substancji niebezpiecznej²⁴.

Zarządzanie technologiami

W literaturze przedmiotu toczy się dyskusja o rozumieniu pojęcia technologii i zarządzania technologiami. W niniejszym artykule prezentowane będzie podejście praktyczne, traktujące technologie jako działania i procesy dla osiągnięcia

²³ *Bezpieczne wykorzystanie wodoru jako paliwa w komercyjnych zastosowaniach przemysłowych*, Publikacja informacyjna 11/I, Polski Rejestr Statków, Gdańsk 2021, s. 38–43, https://prs.pl/wp-content/uploads/2024/03/p11i_pl.pdf [dostęp: 27.10.2024].

²⁴ *Bezpieczeństwo w Grupie Azoty S.A.*, *op. cit.*

wymiernych efektów biznesowych związanych z realizacją procesów wytwórczych produktów lub/i usług. Technologia jest procesem obejmującym szereg działań realizowanych w ściśle określony sposób i w określonej kolejności, prowadzących do przetworzenia dóbr wejściowych w gotowe produkty²⁵. W literaturze przedmiotu występuje wiele klasyfikacji technologii, w tym wpływających na konkurencyjność przedsiębiorstw, jak: krytyczne, wspierające i strategiczne lub bazowe (podstawowe, dojrzałe), kluczowe oraz wschodzące (embrionalne, wyłaniające się)²⁶.

W oparciu o szeroki przegląd literatury dotyczący zarządzania technologiami, z punktu widzenia nauk o organizacji i zarządzania przyjęto, że dotyczy ono planowania i rozwoju, ale także wdrażania możliwości technologicznych dla realizacji celów organizacji (zarówno strategicznych, jak i taktycznych). Podkreśla się znaczenie wykorzystywania innowacji, a także nakładanie się zarządzania technologiami, zarządzania innowacjami²⁷ i zarządzania wiedzą²⁸. Pięć głównych działań wskazanych przez M.J. Gregory'ego w ramach procesu zarządzania technologiami obejmuje ich identyfikację, selekcję (wybór), nabywanie (pozyskiwanie), eksploatację oraz ochronę, dotyczącą zdobytej wiedzy i doświadczeń²⁹. Wychodząc z założeń teorii systemowej, Jerzy Łunarski zwraca uwagę na znaczenie w zarządzaniu technologiami elementów związanych z zarządzaniem jakością, środowiskiem, informacją, a także bezpieczeństwem³⁰.

W ramach zarządzania strategicznego uwzględnia się istotną rolę oceny i analizy bieżącego stanu technologii. Na szczególną uwagę zasługują działania związane z poziomem gotowości technologicznej (TRL – Technology Readiness Level, dotyczy dojrzałości technologii) i ograniczaniem ryzyka niepowodzenia jej dalszego rozwoju.

Można przyjąć, że poziomy dojrzałości 1 do 3 dotyczą koncepcji, oznaczają niski poziom gotowości technologicznej, poziomy 4 do 6 dotyczą testowania (średni poziom gotowości technologicznej), 7 do 8 dotyczą demonstrowania, zaś 9 – komercjalizacji technologii. W oparciu o indeks gotowości technologicznej opracowano klasyfikację stopni dojrzałości nowej technologii (SDT), wprowadzając dodatkowy, dziesiąty poziom, związany z uzyskaniem certyfikatów zgodności produktu z odpowiednimi normami.

²⁵ E. Krawczyk-Dembicka, *Model zarządzania technologiami w przedsiębiorstwie klastrowym*, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Zarządzania, 2018, s. 11.

²⁶ K. Halicka, *Prospektywna analiza technologii – metodologia i procedury badawcze*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2016, s. 25.

²⁷ D. Cetindamar, R. Phaal, D.R. Probert, *Technology management as a profession and the challenges ahead*, „Journal of Engineering and Technology Management” 2016, t. 41, s. 2.

²⁸ A.E. Gudanowska, *Metodyka mapowania technologii w badaniach foresight*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2021, s. 24.

²⁹ M.J. Gregory, *Technology management: a process approach*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture” 1995, t. 209, nr 5, s. 350.

³⁰ J. Łunarski, *Kluczowe procesy w systemowym zarządzaniu technologią*, „Technologia i Automatyka Montażu” 2009, nr 1, s. 4–8.

Metody TRL i SDT wykorzystują wyłącznie jedno kryterium – dojrzałości technologii. Metodą wykorzystującą to kryterium, służącą badaniu stanu technologii, jest także analiza cyklu życia (analiza krzywej S). W prostokątnym układzie współrzędnych obserwuje się zmiany wydajności technologii lub jej efektywności w czasie. Etapy cyklu życia obejmują fazę narodzin (technologia wylaniająca się, już po testach technicznych), fazę rozwoju (technologia kluczowa, rozwojowa), fazę dojrzałości (technologia bazowa) oraz fazę schyłku (technologia przestarzała). Technologia kluczowa, o wysokiej efektywności, staje się źródłem generowania zysków.

Obok klasyfikacji TRL wykorzystywany jest też wskaźnik CRI (Commercial Readiness Index, Indeks gotowości do komercjalizacji) opracowany przez Australijską Agencję Energii Odnawialnej (ARENA – Australian Renewable Energy Agency). Poziomy CRI od 2 do 5 wskazują że technologia i/lub analiza biznesowa projektu zostały poddane komercyjnemu testowaniu na małą lub dużą skalę, lecz nie są one jeszcze dojrzałe technologicznie. Poziom 6 oznacza dojrzałość technologii, związaną z możliwością uzyskania finansowania z banków. Poziom 1 w CRI odpowiada poziomom 2 do 7 w TRL³¹.

Przy ocenie technologii bierze się pod uwagę szereg kryteriów: innowacyjność, konkurencyjność, a w odniesieniu do organizacji: związek ze strategią, aspekty dotyczące znaczenia, zastosowań oraz doświadczeń organizacji i dostawców, problematykę marketingową, techniczną oraz technologii produkcyjnych, a także ochrony patentowej oraz aspektów społecznych, etycznych i ekologicznych³². Chcę zwrócić uwagę że w tych propozycjach nie jest rozpatrywany kontekst bezpieczeństwa.

Kontekst społeczny analizowany jest w oparciu o prognozy społeczne, tendencje i możliwe wydarzenia wpływające na społeczeństwo. Rozpatrywany jest wpływ interesariuszy na rozwój technologii, brani są pod uwagę także interesariusze, którzy mogą być odbiorcami tych technologii, rozpatrywany jest wpływ technologii na społeczeństwo³³. W przypadku technologii wodorowych analizowano m.in. ich akceptację przez interesariuszy reprezentujących organizacje non-profit z różnych krajów³⁴.

Mając na uwadze aspekty ekologiczne rozwiązań technologicznych, nastawionych na utrzymanie optymalnej jakości środowiska naturalnego, wykorzystać można technikę oceny zagrożeń środowiskowych w zarządzaniu środowiskowym – oceną cyklu życia (LCA – *life cycle assessment*). Zakłada ona, że cykl życia stanowi system

³¹ J. Kupecki *et al.*, *op. cit.*, s. 467–469.

³² K. Kłincewicz, A. Manikowski, *Ocena, rankingowanie i selekcja technologii*, Wydawnictwo Naukowe Wydziału Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2013, s. 78–79.

³³ J.F. Coates, *Technology assessment as guidance to governmental management of new technologies in developing countries*, „Technological Forecasting and Social Change” 1998, t. 58, nr 1–2, s. 40.

³⁴ C. Parente, F. Teixeira, J. Cerdeira, *Stakeholders’ perceptions of hydrogen and reflections on energy transition governance*, „Energy, Sustainability and Society” 2024, t. 14, nr 15, <https://energusustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-023-00429-w> [dostęp: 5.05.2024].

zawierający procesy technologiczne w różnych etapach produkcji, tj. od wydobycia surowców, poprzez wytwarzanie i wykorzystanie produktu, produkcję materiałów pomocniczych i urządzeń, aż do składowania zużytego wyrobu, materiałów pomocniczych i urządzeń. W metodzie Eco-indicator 99 rozpatrywane kategorie dotyczą zdrowia, jakości ekosystemu oraz zużycia zasobów. Wynik końcowy uzyskuje się w ekopunktach Pt.³⁵.

W ocenie technologii bierze się pod uwagę w szczególności jej konkurencyjność, opartą na ocenie efektywności. Rozpatrywany jest rachunek kosztów cyklu życia technologii, który obejmuje koszty: nabycia technologii, eksploatacji oraz dywystycji technologii. Ocena efektywności wykorzystuje iloczyn czterech parametrów: 1. dostępności technologii, związanej z czasem wykorzystania w procesie produkcji, uwzględnia się m.in. czas przestoju, wynikających z usterek bądź innych zdarzeń; 2. niezawodności technologii, związanej z prawdopodobieństwem bezawaryjnego działania, odnoszonej do redukcji częstotliwości awarii technologii w określonym czasie; 3. utrzymania technologii, co wiąże się z czasem potrzebnym na usunięcie zaistniałych awarii; 4. zdolności wytwórczych technologii, rozumianych jako relacja rzeczywistych efektów do efektów, które są osiągnięte przy pełnym wykorzystaniu potencjału technicznego określonego rozwiązania technologicznego³⁶.

Warto zauważyć, że w ocenie efektywności technologii brane są pod uwagę aspekty bezpieczeństwa odnoszone do wystąpienia awarii. Rozbudowa tej tematyki wiązać się może z uwzględnieniem kosztów skutków zagrożenia środowiska naturalnego oraz środowiska pracy (bezpieczeństwa pracy).

Technologie wodorowe, ich gotowość technologiczna, cykl życia i LCA

W analizie wpływu czynników ekonomicznych na rozwój gospodarki wodorowej w Polsce (metodą PESTEL) uwzględnia się sześć kategorii: polityczne, ekonomiczne, społeczne, technologiczne, środowiskowe oraz prawne. Wśród czynników technologicznych będących przedmiotem zainteresowania niniejszego artykułu wymienia się m.in. dojrzałość technologii, a także ich rynkową dostępność. W grupie czynników społecznych wymienia się m.in. społeczną odpowiedzialność biznesu (CSR), raportowanie niefinansowe przedsiębiorstw oraz strategię ESG (E – środowisko, S – społeczna odpowiedzialność, G – ład korporacyjny). Podkreśla się, wśród czynników ekonomicznych, wpływ wzrostu cen uprawnień emisyjnych³⁷. Zwracam uwagę, że według współczesnych koncepcji w aspekcie społeczno-ekologicznym powinno się raczej

³⁵ J. Kulczycka *et al.*, *Opracowanie metodyki LCA dla oceny projektów infrastrukturalnych*, Pracownia Badań Strategicznych, IGSMiE PAN, Kraków 2008, s. 55–60.

³⁶ M. Wierziński, *Istota rachunku kosztów cyklu życia technologii*, „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu” 2014, nr 335, s. 231–239.

³⁷ J. Kupecki *et al.*, *op. cit.*, s. 442–446.

uwzględnić ECSR (ekologiczną społeczną odpowiedzialność biznesu) w miejsce CSR³⁸. Zakres pojęcia „technologie wodorowe” obejmuje cały łańcuch wartości gospodarki wodorowej, na który składają się: produkcja wodoru, jego przesył i magazynowanie, aż po różne obszary zastosowania³⁹. Gotowość technologiczną poszczególnych technologii wytwarzania wodoru podano w tabeli 2.

Dojrzałość technologii produkcji i łańcuchów dostaw zielonego wodoru została już szczegółowo opisana⁴⁰. Technologie wodorowe mogą być oceniane według dojrzałości technologii/produktu, biorąc pod uwagę cztery odrębne etapy dojrzałości: 1. prototyp, 2. etap wczesny, 3. dojrzałość oraz 4. etap końcowy, czyli schyłek⁴¹. W analizie cyklu życia technologii należy brać pod uwagę koszty produkcji wodoru, ze szczególnym uwzględnieniem przewidywanego wzrostu cen uprawnień do emisji zanieczyszczeń, głównie dwutlenku węgla. Podano także stopień komercjalizacji technologii wodorowych w poszczególnych przemysłach (chemicznym, rafineryjnym, petrochemicznym, hutnictwie) i dla różnych zastosowań (magazynowanie energii, energetyka, transport kołowy, morski i lotniczy)⁴².

Ważną rolę ogrywiają badania LCA technologii pod kątem emisji gazów cieplarnianych. Wykonywano je m.in. dla technologii pozyskiwania wodoru z metanu⁴³. Analizie LCA poddawane są zarówno technologie, jak i produkty w postaci paliwowych i paliwa wodorowego (FCH)⁴⁴, a także odnawialnych źródeł energii⁴⁵. Badania LCA w powiązaniu z wskaźnikami emisji gazów cieplarnianych dotyczące wytwarzania zielonego wodoru z udziałem OZE w procesach elektrolizy wody wskazują, że emisja związana z wytwarzaniem energii elektrycznej osiąga najwyższy poziom podczas produkcji tych instalacji (ok. 70%), a w mniejszym zakresie podczas ich eksploatacji czy demontażu (przetwarzania)⁴⁶.

³⁸ A. Chodyński, *The environmental aspect of ECSR in the concept of organisational improvement in the electric vehicles sector*, [w:] *The Industry of Electric Vehicles: Environmental, Marketing and Social Aspects of Management*, red. A. Chodyński, D. Fatuła, K. Waśniewski, Oficyna Wydawnicza AFM, Krakowska Akademia im. Andrzeja Frycza Modrzewskiego, Kraków 2023, s. 53–70.

³⁹ *Mapa rozwoju...*, *op. cit.*, s. 12.

⁴⁰ J. Rey, F. Segura, J.M. Andújar, *Green hydrogen: Resources consumption, technological maturity, and regulatory framework*, „Energies” 2023, t. 16, nr 17, 6222, s. 1–29, <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/17/6222> [dostęp: 12.05.2024].

⁴¹ *Mapa rozwoju...*, *op. cit.*, s. 40–43.

⁴² *Łańcuch wartości...*, *op. cit.*, s. 12–13.

⁴³ D. Rogowska, *op. cit.*

⁴⁴ *Development of Guidance Manual for LCA application to fuel cells and hydrogen technologies*. Standaryzacja metod pomiaru oddziaływania na środowisko, Komisja Europejska, <https://cordis.europa.eu/article/id/90780-standardisation-of-lifetime-measures-of-environmental-impact/pl> [dostęp: 27.10.2024].

⁴⁵ A. Śliwińska, K. Czaplicka-Kolarz, *Wybrane aspekty metodologii analizy cyklu życia odnawialnych źródeł energii*, „Czasopismo Techniczne” 2009, R. 106, z. 11, „Środowisko” z. 3-Ś, s. 131–145.

⁴⁶ D.M. Ordway, L.W. Kille, *Lifecycle greenhouse gas emissions from solar and wind energy: a critical meta-survey*, „The Journalist’s Resource”, 28.11.2015, [za:] J. Kupecki *et al.*, *op. cit.*, s. 265–266.

Tabela 2. Gotowość technologiczna technologii wodorowych i ich emisyjność

Rodzaj technologii ^[1]	Komentarz odnośnie do dojrzałości technologii i jej zastosowań
Podstawowe technologie produkcji wodoru szarego: – gazyfikacja węgla kamiennego lub brunatnego, opanowana komercyjnie, o wysokiej emisyjności; – reforming parowy metanu: opanowana komercyjnie, o średniej emisyjności.	Podstawowe technologie produkcji wodoru szarego: TRL: 9 ^[2] . Rozwiązania dla obniżenia emisji (wychwytywania, magazynowania i wykorzystania) dwutlenku węgla CCS/CCSU dla wytwarzania wodoru niebieskiego znajdują się na zróżnicowanym poziomie gotowości technologicznej. Najczęściej wykorzystywane są instalacje komercyjne z ciekłym rozpuszczalnikiem (tzw. <i>CCS liquid solvent</i>), posiadają TRL na poziomie 7–9 ^[3] .
Przerób odpadów: poprzez produkcję gazu syntezowego, charakteryzuje się średnią emisyjnością.	Przerób odpadów: TRL: 5–7 (wstępny etap komercjalizacji) ^[4] . Produkcja wodoru z biomasy: trudna ocena charakterystyki rynkowej technologii. Produkcja oparta na zgazowaniu i reformingu odpadów oraz materii organicznej (w tym biometanu) – jest na dobrej drodze do komercjalizacji ^[5] .
Procesy termochemiczne (rozkład wody)	Emisyjność zależna od rodzaju dostarczonego ciepła do reakcji. TRL: 5–6, czyli technologie w zaawansowanym etapie badań przedkomercjalizacyjnych ^[6] .
Piroliza gazu ziemnego (metanu): brak emisji dwutlenku węgla, lecz produktem ubocznym jest węgiel.	TRL: 4–5, co oznacza brak opanowania komercyjnego; zostały zrealizowane pierwsze projekty demonstracyjne ^[7] .
Procesy elektrolizy wody: – elektroliza zasilana z sieci krajowej (KSE): rozkład wody pod wpływem napięcia elektrycznego, bardzo zróżnicowana emisyjność; – elektroliza zasilana z OZE (farmy wiatrowe, fotowoltaika) oraz z siłowni jądrowych: bardzo niska emisyjność ^[8] .	Elektroliza zasilana z sieci krajowej: TRL: 7–9. Przy zasilaniu z OZE TRL wynosi 7–9, zaś z wykorzystaniem siłowni jądrowych: 6–7 ^[9] . Biorąc pod uwagę przepisy Unii Europejskiej, wodór produkowany z zastosowaniem fotowoltaiki, energii jądrowej, a także turbin gazowych osiąga cel redukcji emisji dwutlenku węgla wynoszący 70% i mieści się poniżej limitu emisji 3 kg CO ₂ /kg H ₂ ^[10] .
Równoczesna ocena technologii wodorowych metodami TRL i CRI	Technologie najbardziej zaawansowane technologicznie i pod względem komercjalizacji: metody produkcji wodoru z węglowodorów i zgazowanie węgla. Relatywnie wysoki poziom osiągnęły elektrolizery (ALK, PEM i SOFC). W dalszej kolejności: metody produkcji wodoru z udziałem OZE. Najmniej dojrzałe: produkcja wodoru z wykorzystaniem technologii CCS i CCSU oraz produkcja wodoru z udziałem energii jądrowej ^[11] .

^[1] G. Tchorek *et al.*, *Łańcuch wartości gospodarki wodorowej w Polsce. Skróty raportu*, 11 maja 2023 r., Izba Gospodarcza Gazownictwa, [Warszawa], s. 4–6, <https://www.igg.pl/app/uploads/2023/08/Lancuch-wartosci-gospodarki-wodorowej-w-Polsce-2023-skrót-do-Przeglądu-Gazowniczego.pdf> [dostęp: 21.10.2024]. ^[2] *Ibidem*.

^[3] *Mapa rozwoju...*, *op. cit.*, s. 19. ^[4] *Łańcuch wartości...*, *op. cit.*, s. 4–6. ^[5] *Mapa rozwoju...*, *op. cit.*, s. 19, 21.

^[6] *Łańcuch wartości...*, *op. cit.*, s. 4–6. ^[7] *Ibidem*. ^[8] *Ibidem*. ^[9] *Ibidem*. ^[10] *Ibidem*, s. 7. ^[11] J. Kupecki *et al.*, *op. cit.*, s. 471–472.

W związku z brakiem rozwiniętego rynku dla technologii wodorowych obserwujemy następujące zjawiska:

- większość z nich jest na relatywnie początkowym etapie dojrzałości, a ponadto brakuje rozwiniętego łańcucha logistycznego⁴⁷,
- rynek wodoru ma charakter wschodzący, zaś sam wodór często zaspokaja potrzeby własne jego producentów i nie trafia na ten rynek⁴⁸,
- wdrażanie technologii wodorowych wiąże się z wysokimi kosztami w ogniach łańcucha gospodarki wodorowej, zaś innowacyjne rozwiązania w tym zakresie cechuje nieprzewidywalność stóp zwrotu z inwestycji⁴⁹.

Podsumowanie

Na bezpieczeństwo ekologiczno-energetyczne Polski mają wpływ możliwości produkcji wodoru niskoemisyjnego dla potrzeb gospodarki. Stosowane technologie powinny osiągać odpowiedni poziom dojrzałości w zakresie wytwarzania, dostaw i wykorzystania wodoru. W literaturze przedmiotu poziom gotowości technologicznej (faz cyklu życia) ogniów łańcucha wartości niskoemisyjnego wodoru jest rozpatrywany w odniesieniu do produkcji, dostępnej infrastruktury wodorowej (w tym rurociągów, zbiorników i środków transportu), wykorzystania w transformacji paliw, zastosowania wodoru w przemyśle, transporcie, budynkach oraz w energetyce. W grupie niskoemisyjnych technologii produkcji wodoru na poziomie wczesnej adaptacji znajdują się: elektroliza oraz reforming gazu ziemnego z CCSU, zaś na etapie wielkoskalowego prototypu – zgazowanie węgla z CCSU oraz rozszczepienie metanu⁵⁰. Na wczesnym etapie rozwoju znajduje się łańcuch wartości technologii wodorowych, zaś funkcjonujące sieci przesyłowe nie są aktualnie przygotowane do przesyłu wodoru⁵¹. Polska to znaczący producent wodoru, lecz przede wszystkim szarego dla realizacji procesów technologicznych. Zastąpienie go wodorem niebieskim czy zielonym będzie realizowane w ciągu najbliższych 20–30 lat⁵². Warto także zwrócić uwagę na plany województwa małopolskiego w zakresie technologii wodorowych oraz zaangażowanie różnych podmiotów w tym obszarze⁵³. Przyjmując reforming parowy metanu jako dominującą w Polsce metodę (technologię) produkcji wodoru, brać należy pod uwagę możliwości optymalizacji jej kosztów produkcji. Opierać się ona może na dywersyfikacji dostaw i zakładanej obniżce cen gazu ziemnego poprzez rozbudowę

⁴⁷ *Mapa rozwoju...*, *op. cit.*, s. 40.

⁴⁸ *Ibidem*, s. 46–47.

⁴⁹ *Ibidem*, s. 46–47.

⁵⁰ *Ibidem*, s. 41.

⁵¹ *Ibidem*, s. 44.

⁵² *Ibidem*, s. 70.

⁵³ A. Czulak, *op. cit.* Przykładowo przedsiębiorstwo Orlen Południe S.A. produkuje w zakładach w Trzebinie wysokiej czystości wodór dla branży automotive, s. 54–55.

terminalu LNG w Świnoujściu, Baltic Pipe, a także terminalu FSRU (Floating Storage Regasification Unit) w Gdańsku, w powiązaniu z redukcją kosztów i zwiększeniu efektywności systemów CCS/CCU⁵⁴. Ważną rolę odgrywają plany budowy w Polsce 2000 km nowych gazociągów do 2030 r.⁵⁵. Problematykę bezpieczeństwa można rozważać, biorąc pod uwagę fakt, że wodór jako uniwersalny nośnik energii może pomóc w dywersyfikacji jej dostaw i zmniejszyć zależność od paliw kopalnych⁵⁶.

Bibliografia

- 9 kolorów wodoru – poznaj ich znaczenie, zastosowanie i potencjał wykorzystania, Powermeetings.eu, <https://powermeetings.eu/kolory-wodoru-znaczenie-zastosowanie-potencjal> [dostęp: 21.10.2024].
- 100 GW nowych mocy w OZE rocznie – nadciąga Dyrektywa RED III, GLOBenergia, 20.06.2023, <https://globenergia.pl/100-gw-nowych-mocy-w-oze-rocznie-nadciaga-dyrektywa-red-iii> [dostęp: 4.11.2024].
- Bezpieczeństwo w Grupie Azoty S.A., Tarnów 2015, <https://docplayer.pl/69465006-Bezpieczenstwo-w-grupie-azoty-s-a.html> [dostęp: 18.11.2024].
- Bezpieczne wykorzystanie wodoru jako paliwa w komercyjnych zastosowaniach przemysłowych, Publikacja informacyjna 11/I, Polski Rejestr Statków, Gdańsk 2021, s. 38–43, https://prs.pl/wp-content/uploads/2024/03/p11i_pl.pdf [dostęp: 27.10.2024].
- Brusilo P., *The EU green industrial policy for hydrogen economy development*, „Ekonomia XXI wieku” 2023, nr 26, s. 17–26.
- Cetindamar D., Phaal R., Probert D.R., *Technology management as a profession and the challenges ahead*, „Journal of Engineering and Technology Management” 2016, t. 41, s. 1–13.
- Chodyński A., *The environmental aspect of ECSR in the concept of organisational improvement in the electric vehicles sector*, [w:] *The Industry of Electric Vehicles: Environmental, Marketing and Social Aspects of Management*, red. A. Chodyński, D. Fatuła, K. Waśniewski, Oficyna Wydawnicza AFM, Krakowska Akademia im. Andrzeja Frycza Modrzewskiego, Kraków 2023, s. 53–70.
- Coates J.F., *Technology assessment as guidance to governmental management of new technologies in developing countries*, „Technological Forecasting and Social Change” 1998, t. 58, nr 1–2, s. 35–46.
- Cygańczuk K., Roman Ł., *Strategia wodorowa Polski i Unii Europejskiej w czasie kryzysu energetycznego*, „Przegląd Chemiczny” 2022, t. 101, nr 11, s. 903–911.
- Czulak A., *Plan rozwoju technologii wodorowych w Małopolsce do 2030 roku*, Małopolska Innowacyjna, Kraków 2023, <https://www.malopolska.pl/aktualnosci/biznes-i-gospodarka/malopolska-ma-plan-na-wodor> [dostęp: 18.11.2024].
- Czy produkcja zielonego wodoru może być opłacalna?, <https://www.itpe.pl/blog/2023/06/14/czy-produkcja-zielonego-wodoru-moze-byc-oplaczalna> [dostęp: 21.10.2023].
- Development of Guidance Manual for LCA application to fuel cells and hydrogen technologies. Standardyzacja metod pomiaru oddziaływania na środowisko*, Komisja Europejska, <https://cordis>.

⁵⁴ J. Kupecki *et al.*, *op. cit.*, s. 243–244.

⁵⁵ *Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030. Założenia i cele oraz polityki i działania*, Projekt – w. 3.1 z 04.01.2019, s. 37, Ministerstwo Energii, <https://www.gov.pl/web/klimat/krajowy-plan-na-rzecz-energii-i-klimatu-na-lata-2021-2030---wersja-2019-r> [dostęp: 12.05.2024].

⁵⁶ J. Kupecki *et al.*, *op. cit.*, s. 72.

- europa.eu/article/id/90780-standardisation-of-lifetime-measures-of-environmental-impact/pl [dostęp: 27.10.2024].
- Elźbiaciak T., *Jakie elektrolizery wyprodukują zielony wodór w Polsce?*, WysokieNapięcie.pl, 16.02.2023, <https://wysokienapiecie.pl/82287-elektrolizery-wyprodukujaja-wodor-w-polsce/> [dostęp: 21.10.2024].
- Globalny wyciąg o zielony wodór nabiera tempa. Polska jak na razie zostaje w tyle*, KierunekChemia.pl, 7.08.2023, <https://www.kierunekchemia.pl/arttykul,99487,globalny-wycig-o-zielony-wodor-nabiera-tempa-polska-jak-na-razie-zostaje-w-tyle.html> [dostęp: 27.10.2024].
- Gregory M.J., *Technology management: a process approach*, „Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture” 1995, t. 209, nr 5, s. 347–356.
- Gudanowska A.E., *Metodyka mapowania technologii w badaniach foresight*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2021.
- Halicka K., *Prospektywna analiza technologii – metodologia i procedury badawcze*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Białostockiej, Białystok 2016.
- Japońskie technologie „czystego węgla” w zainteresowaniu Polski*, „Dziennik Gazeta Prawna”, 19.12.2017, <https://www.gazetaprawna.pl/wiadomosci/arttykuly/1093111,japonskie-technologie-czystego-wegla-w-zainteresowaniu-polski.html> [dostęp: 10.11.2024].
- Jurgilewicz M., Ovsepyan A., *Bezpieczeństwo energetyczne a ochrona środowiska*, „Studia Prawnicze KUL” 2017, nr 2 (70), s. 71–83.
- Klincewicz K., Manikowski A., *Ocena, rankingowanie i selekcja technologii*, Wydawnictwo Naukowe Wydziału Zarządzania Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa 2013.
- Krajowy plan na rzecz energii i klimatu na lata 2021–2030. Założenia i cele oraz polityki i działania*, Projekt – w. 3.1 z 04.01.2019, Ministerstwo Energii, <https://www.gov.pl/web/klimat/krajowy-plan-na-rzecz-energii-i-klimatu-na-lata-2021-2030---wersja-2019-r> [dostęp: 12.05.2024].
- Krawczyk-Dembicka E., *Model zarządzania technologiami w przedsiębiorstwie klastrowym*, rozprawa doktorska, Politechnika Poznańska, Wydział Inżynierii Zarządzania, 2018.
- Kruk H., *Wykorzystanie źródeł energii a bezpieczeństwo energetyczne i ekologiczne Polski*, „Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni” 2012, nr 72, s. 23–30.
- Kupiec B., *Zielony wodór w świetle nowelizowanej dyrektywy RED II*, ZielonaGospodarka.pl, 29.01.2023, <https://zielonagospodarka.pl/zielony-wodor-w-swietle-nowelizowanej-dyrektywy-red-ii-6516> [dostęp: 21.10.2024].
- Łunarski J., *Kluczowe procesy w systemowym zarządzaniu technologią*, „Technologia i Automatyzacja Montażu” 2009, nr 1, s. 4–8.
- Mapa rozwoju rynku i technologii dla obszaru technologii wodorowych*, PARP. Grupa PFR, 2022, https://smart.gov.pl/images/BTR_Technologie-wodorowe_FINAL_16.08.22.pdf [dostęp: 11.04.2024].
- Kobryński M., *Jaką przyszłość w Polsce ma zielony wodór?* Rynek Infrastruktury, 9.07.2023, <https://www.rynekinfrastruktury.pl/wiadomosci/biznes-i-przemysl/jaka-przyszlosc-w-polsce-ma-zielony-wodor-86684.html> [dostęp: 21.10.2023].
- Kulczycka J. et al., *Opracowanie metodyki LCA dla oceny projektów infrastrukturalnych*, Pracownia Badań Strategicznych, IGSMiE PAN, Kraków 2008.
- Kupecki J. et al., *Analiza potencjału technologii wodorowych w Polsce do roku 2030 z perspektywą do 2040 roku*, Centrum Technologii Wodorowych, Instytut Energetyki; Wydział Zarządzania, Uniwersytet Warszawski; Instytut Ekologii Terenów Uprzemysłowionych, [Warszawa 2021].
- Parente C., Teixeira F., Cerdeira J., *Stakeholders’ perceptions of hydrogen and reflections on energy transition governance*, „Energy, Sustainability and Society” 2024, t. 14, nr 15, <https://>

- energysustainsoc.biomedcentral.com/articles/10.1186/s13705-023-00429-w [dostęp: 5.05.2024].
- Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r.*, Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Biuletyn Informacji Publicznej, 14.01.2021, <https://bip.mos.gov.pl/strategie-plany-programy/polska-strategia-wodorowa-do-roku-2030-z-perspektywa-do-2040-r/> [dostęp: 11.04.2024].
- Rapacka P., *Unia Europejska przyjmując nową dyrektywę o OZE i rozporządzenie ReFuelUE*, Teraz Środowisko.pl, 11.10.2023, <https://www.teraz-srodowisko.pl/aktualnosci/Dyrektywa-RED-III-zmiany-Lotnictwo-emisje-celc-OZE-14050.html> [dostęp: 4.11.2024].
- Rey J., Segura F., Andújar J.M., *Green hydrogen: Resources consumption, technological maturity, and regulatory framework*, „Energies” 2023, t. 16, nr 17, 6222, s. 1–29, <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/17/6222> [dostęp: 12.05.2024].
- Rogowska D., *Opracowanie modelu obliczania emisji GHG w cyklu życia biowodoru produkowanego w technologii (bio)metanu do wodoru i węgla*, „Nafta-Gaz” 2022, nr 6, s. 468–478.
- Singh S., Jain S., Venkateswaran P.S., Tiwari A.K., Nouni M.R., Pandey J.K., Goel S., *Hydrogen: A sustainable fuel for future of the transport sector*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2015, t. 51, s. 623–633, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032115006127> [dostęp: 12.05.2024].
- Standaryzacja metod pomiaru oddziaływania na środowisko, Komisja Europejska, <https://cordis.europa.eu/article/id/90780-standardisation-of-lifetime-measures-of-environmental-impact/pl> [dostęp: 27.10.2024].
- Śliwińska A., Czaplicka-Kolarz K., *Wybrane aspekty metodologii analizy cyklu życia odnawialnych źródeł energii*, „Czasopismo Techniczne” 2009, R. 106, z. 11, „Środowisko” z. 3-Ś, s. 131–145.
- Tarkowski R., *Wodór jako paliwo przyszłości. Wyzwania dla polskiej geologii*, „Przegląd Geologiczny” 2021, t. 69, nr 4, s. 210–217.
- Tchorek G. et al., *Łańcuch wartości gospodarki wodorowej w Polsce. Skrót raportu*, 11 maja 2023 r., Izba Gospodarcza Gazownictwa, [Warszawa], <https://www.igg.pl/app/uploads/2023/08/Lancuch-wartosci-gospodarki-wodorowej-w-Polsce-2023-skrót-do-Przeglądu-Gazowniczego.pdf> [dostęp: 21.10.2024].
- Wierzbiński M., *Istota rachunku kosztów cyklu życia technologii*, „Prace Naukowe Uniwersytetu Ekonomicznego we Wrocławiu” 2014, nr 335, s. 231–239.
- Yue M., Lambert H., Pahon E., Jemei S., Hissel D., *Hydrogen energy systems: a critical review of technologies, applications, trends and challenges*, „Renewable and Sustainable Energy Reviews” 2021, t. 146, 111180, <https://hal.science/hal-03221850/document> [dostęp: 12.05.2024].
- Zielony wodór z OZE w Polsce. Wykorzystanie energetyki wiatrowej i PV do produkcji zielonego wodoru jako szansa na realizację założeń Polityki Klimatyczno-Energetycznej UE w Polsce*, Dolnośląski Instytut Studiów Energetycznych, Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej, Wrocław 2021, <https://disc.org.pl/Raport-Zielony-Wodor-z-OZE.pdf> [dostęp: 10.11.2024].

Zarządzanie technologiami wodorowymi. Aspekty bezpieczeństwa ekologiczno-energetycznego

Streszczenie

Bezpieczeństwo ekologiczno-energetyczne wiąże się z zapewnieniem dostaw nośników energii, których wykorzystanie wiąże się z ograniczeniem emisji gazów cieplarnianych, w szczególności CO₂. Mamy do czynienia z odchodzeniem od paliw kopalnych na rzecz paliw alternatywnych, w szczególności wodoru, biorąc m.in. pod uwagę

działania legislacyjne Unii Europejskiej. Warunkiem realizacji tego podejścia jest posiadanie przez przedsiębiorstwa dostępu do nowych technologii o wysokim stopniu dojrzałości, z uwzględnieniem aspektów ekologicznych (LCA, *life cycle assessment*) oraz kosztów cyklu życia technologii (*life cycle of technology*), obejmujących nabycie technologii, jej eksploatację oraz dywestycje. Podano podstawy metod oceny dojrzałości technologii: TRL, SDT i CRI. Omówiono znaczenie zarządzania technologiami. W artykule odniesiono się do dwóch pytań badawczych dotyczących zarządzania technologiami: 1. jaki jest stan dojrzałości technologii wodorowych spełniających wymagania niskiej emisyjności wobec zmian klimatycznych, oraz 2. jaka jest możliwość wykorzystania technologii tradycyjnych, bazujących na paliwach kopalnych, do produkcji wodoru.

Słowa kluczowe: zarządzanie technologiami, dojrzałość technologii wodorowych, bezpieczeństwo ekologiczno-energetyczne

Management of hydrogen technologies: aspects of ecological and energy security

Abstract

Ecological and energy security is associated with ensuring the supply of energy carriers, the use of which is associated with the limitation of greenhouse gas emissions, in particular CO₂. There is a move away from fossil fuels to alternative fuels, particularly hydrogen, taking into account, among other things, the legislative actions of the European Union. A prerequisite for the implementation of this approach is for companies to have access to new technologies with a high degree of maturity, taking into account environmental aspects (LCA, life cycle assessment) and the life cycle costs of technology covering the acquisition of technology, its operation and divestment. The basics of technology maturity assessment methods TRL, SDT and CRI are given. The importance of technology management is discussed. The article addresses two research questions about technology management: 1. what is the state of maturity of hydrogen technologies meeting the requirements of low emissions in the face of climate change, and 2. what is the possibility of using traditional technologies based on fossil fuels for hydrogen production.

Keywords: technology management, hydrogen technology maturity, ecological and energy security