



PRZEGLĄD AKTUALNEGO STANU GOSPODARKI WODOROWEJ I JEJ TECHNOLOGII W POLSCE

SZCZECIN , 2024

Spis treści

Wprowadzenie	3
Łańcuch wartości gospodarki wodorowej w Polsce	5
Polska Strategia Wodorowa jako wyznacznik rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce	7
Gospodarka wodorowa w Polsce - stan obecny	14
Produkcja wodoru w łańcuchu wartości	14
Otoczenie technologiczne produkcji wodoru w Polsce	17
Magazynowanie wodoru jako ogniwo łańcucha wartości gospodarki wodorowej w Polsce	22
Transport wodoru	28
Zastosowanie wodoru w polskiej gospodarce	33
Podsumowanie	37
Bibliografia	39

Wprowadzenie

Zmiany klimatyczne wywołane emisją gazów cieplarnianych zmuszają ludzkość do przyspieszenia procesów dekarbonizacji w gospodarce światowej praktycznie we wszystkich dziedzinach. Jednym z tych procesów jest transformacja energetyczna zmierzająca do zastąpienia kopalnych źródeł energii odnawialnymi, które dostarczają tzw. zielonej energii. Może ona pochodzić z wykorzystywania siły wiatru, wody, słońca, biomasy oraz zielonego wodoru (Łacka, 2023). Unia Europejska jako pierwsze ugrupowanie gospodarcze najszybciej zdecydowała rozpocząć wdrażanie zaleceń zapisanych w rezolucji ONZ pt. Agenda 2030 (UN, 2015). Komisja Europejska w 2019 r. w ramach polityki ochrony klimatu ogłosiła założenia Europejskiego Zielonego Ładu (EC, 2019). Od tego momentu dekarbonizacja w krajach członkowskich UE uległa gwałtownemu przyspieszeniu. W ramach strategii Zielonego Ładu w kolejnych latach podjęto wiele istotnych decyzji i działań, które najpierw mają doprowadzić w UE do 2030 r. do zmniejszenia o 55% emisji CO₂, a docelowo zapewnić neutralność klimatyczną Wspólnoty do 2050 r. Wśród tych działań znalazło się m.in. przyjęcie unijnej strategii wodorowej w 2020 r. (EC, 2020), a także przedstawienie propozycji aktów prawnych zawartych w dokumencie *Fit for 55* w 2021 r. (EC, 2021). Zawiera on zapisy, które mają dostosować unijne prawo do ambitnej polityki w zakresie ochrony klimatu. Wymagają przeprowadzenia we wszystkich krajach członkowskich zmian regulacyjnych, organizacyjnych i technologicznych nie tylko w energetyce, ale także w innych dziedzinach gospodarki, w tym w przemyśle, transporcie, ciepłownictwie, budownictwie czy rolnictwie.

3

Wszystkie kraje, które podpisały pakiet legislacyjny *Fit for 55* są świadome, że dla osiągnięcia ambitnych celów klimatycznych UE niezbędny jest rozwój alternatywnych form wytwarzania i magazynowania energii. Jednym z rozwiązań okazuje się wodór, który może służyć zmniejszeniu m.in. emisyjności hutnictwa i przemysłu chemicznego, w których redukcja CO₂ przy dostępnych obecnie metodach jest utrudniona ze względów technicznych.

Napaść Rosji na Ukrainę w lutym 2022 r. i światowy kryzys energetyczny uświadomiły wszystkim mieszkańcom Europy, że zależność ich gospodarek od paliw kopalnych (ropy i gazu) zagraża nie tylko klimatowi, ale także bezpieczeństwu narodowemu. Zmieniona

sytuacja geopolityczna, a w konsekwencji ekonomiczna ujawniły potrzebę przyspieszenia procesów transformacji energetycznej w krajach członkowskich UE z wykorzystaniem nowych rozwiązań w zakresie zielonej energii, w tym opartych na technologiach wodorowych (Łacka, Wojdyła, 2022). Jak wskazuje M. Sobolewski wodór „może zastępować paliwa kopalne w transporcie i przemyśle, jak również służyć do magazynowania energii elektrycznej pozyskiwanej ze źródeł odnawialnych” (Sobolewski 2022). Upowszechnienie wykorzystania wodoru w Europie pozwoliłoby zmniejszyć import paliw kopalnych (ropy i gazu ziemnego, węgla kamiennego i brunatnego), a tym samym poprawić bezpieczeństwo energetyczne przez stabilizację systemu energetycznego. Jest to szczególnie ważne dla krajów, które były dotychczas bardzo uzależnione od importu ropy, gazu ziemnego i węgla kamiennego z Rosji. Choć po rozpoczęciu wojny między Rosją a Ukrainą zmieniły strukturę dostaw nośników energii, to nadal ich mix energetyczny wskazuje na silne uzależnienie od węglowodorów i zbyt mały udział odnawialnych źródeł energii w całkowitej konsumpcji energii. Takim krajem jest Polska, stąd też konieczność dokonania w tym kraju transformacji energetycznej. Z jednej strony jest to podyktowane potrzebą dekarbonizacji gospodarki zgodnie z założeniami Europejskiego Zielonego Ładu i dokumentu *Fit for 55*, a z drugiej wynika z naturalnej potrzeby bezpieczeństwa energetycznego i narodowego w zakresie dostępu do energii w sytuacji, gdy jej zużycie stale rośnie wraz ze wzrostem i rozwojem gospodarczym, a dotychczasowy wieloletni dostawca (Rosja) stał się zagrożeniem.

4

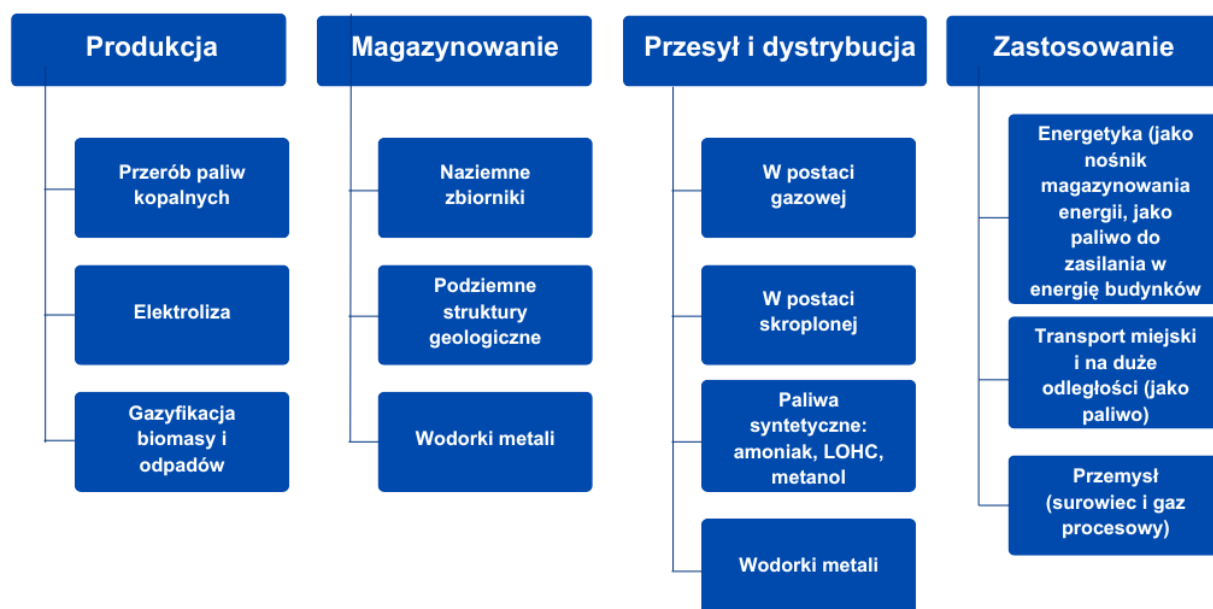
Szansą na uwolnienie się Polski od wykorzystywania paliw kopalnych jest, poza znanymi już i od pewnego czasu rozwijanymi w naszym kraju źródłami energii odnawialnej z konwencjonalnych źródeł (słońce, wiatr, woda, biogaz), wodór pozyskiwany w ekologiczny sposób. Jak wskazują autorzy raportu *Zielony wodór z OZE w Polsce* „Aby jednak wodór spełnił swoje zadanie w procesie dekarbonizacji europejskich gospodarek konieczne jest zapewnienie dostępu do bezemisyjnych technologii jego wytwarzania. W polskich warunkach kluczową rolę w produkcji czystego wodoru powinny odegrać przede wszystkim źródła odnawialne, których praca dzięki właściwościom wodoru pozwalającym na magazynowanie energii będzie w jeszcze lepszy sposób stabilizować Krajowy System Elektroenergetyczny” (Brodacki i in., 2021, s. 25).

Łańcuch wartości gospodarki wodorowej w Polsce

Złożoność obszaru technologii wodorowych i samej gospodarki wodorowej wymaga z jednej strony właściwego jej zdefiniowania z wykorzystaniem koncepcji łańcucha wartości gospodarki wodorowej. Można się nią posłużyć podczas opisu procesów, technologii i wyzwań związanych z tworzeniem i rozwojem tej gałęzi przemysłu w polskiej gospodarce. Korzystając z przywoływanej przez ekspertów Polskiej Agencji Rozwoju Przemysłu definicji możemy wyjaśnić, że „gospodarka wodorowa to łańcuch wartości związany z wytwarzaniem, przesyłem, magazynowaniem i zastosowaniem wodoru we wszystkich obszarach aktywności człowieka, w szczególności w głównych działach gospodarki – transporcie, energetyce, ciepłownictwie, a przede wszystkim w przemyśle” (PARP, 2022, s. 12). Takie ujęcie gospodarki wodorowej wraz z analizą technologii niezbędnych do realizacji poszczególnych etapów przepływu wartości wraz z ujęciem pozycji rynkowej poszczególnych ogniw łańcucha wartości umożliwia identyfikację i ocenę polskiego potencjału wodorowego. Odpowiada ono podejściu stosowanemu przez zespół ekspertów pod kierunkiem G. Tchorka, którzy przygotowali kompleksowy raport pt. *Łańcuch wartości gospodarki wodorowej w Polsce* (Tchorek i in. 2023a). Na rysunku 1 znajduje się przykładowy łańcuch wartości gospodarki wodorowej, który może posłużyć do dalszych analiz w tym zakresie.

5

Rysunek 1. Łańcuch wartości gospodarki wodorowej



Źródło: opracowanie własne na podstawie: PARP (2022); Sobolewski (2022).

Jak stwierdził G. Tchorek Unia Europejska bardzo precyzyjnie zdefiniowała warunki produkcji i cechy wodoru, który może być uznany za niskoemisyjny, a tym samym określiła które projekty wodorowe mogą uzyskać dofinansowanie. Wskazują, że tylko produkcja wodoru oparta na elektrolizie z wykorzystaniem energii uzyskanej z OZE (wiatr, słońce lub atom) spełnia taksonomię UE, tzn. wiąże się z emisją 3 t CO₂ na 1 t H₂. „Reforming parowy metanu (+CCS), reforming parowy biogazu oraz przerób odpadów (+CCS) wymagałyby dodatkowej redukcji na etapie magazynowania i transportu dla osiągnięcia tego limitu. Pozostałe metody: gazyfikacja węgla (+CCS), reforming parowy metanu, przerób odpadów, gazyfikacja węgla i elektroliza za pomocą energii sieciowej nie zostaną uznane za niskoemisyjne przez Unię” (Tchorek i in., 2023a).

Polska Strategia Wodorowa jako wyznacznik rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce

Polska włączyła się w rozwój gospodarki wodorowej w Europie poprzez przyjęcie w 2021 r. strategii wodorowej pt. *Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do roku 2040* (Monitor Polski, 2021). To najważniejszy dokument strategiczny nawiązujący do założeń europejskiej strategii wodorowej, a także globalnych, unijnych i krajowych działań zmierzających do stworzenia gospodarki niskoemisyjnej. W tej strategii (określanej w skrócie jako PSW) określono główne cele rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce oraz kierunki interwencji państwa, które są niezbędne do osiągnięcia tych celów. Zawarto w niej rozbudowaną (w porównaniu z zaprezentowaną na rysunku 1) formę łańcucha wartości gospodarki wodorowej. Stanowi ona projekt bardziej złożonego łańcucha wartości gospodarki wodorowej, który uwzględnia w czterech ogniwach łańcucha nowe, dotychczas nie funkcjonujące w polskiej gospodarce, technologie, mogące się rozwijać w najbliższych latach i tworzące możliwości pozyskiwania wartości. W tabeli 1 przedstawiono tę nową perspektywiczną wizję łańcucha wartości rozwiniętej gospodarki wodorowej w Polsce. Każdy z elementów łańcucha wartości gospodarki wodorowej ujętych na rysunku 1 i w tabeli 1 wiąże się z wykorzystaniem różnych technologii, które charakteryzują się innymi miarami emisyjności CO₂, wysokością przeciętnego kosztu wytworzenia 1 kg wodoru (H₂) oraz stopniem gotowości technologicznej (TRL).

7

Tabela 1. Proponowany przyszły łańcuch wartości gospodarki wodorowej w Polsce

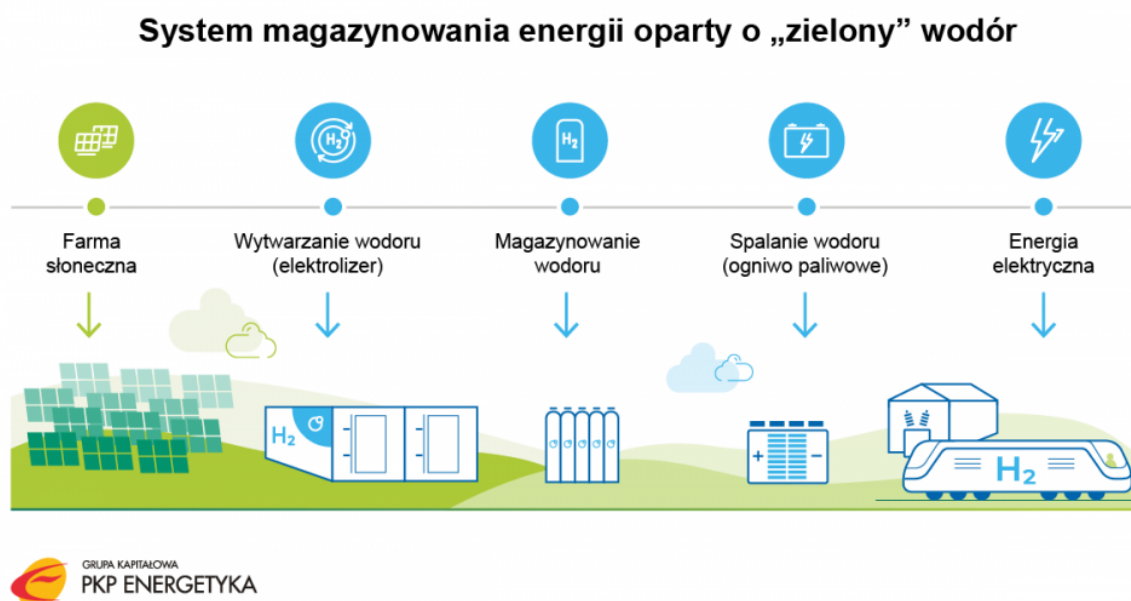
Technologie wodorowe i ich zastosowania	Ogniwa łańcucha wartości gospodarki wodorowej			
	Produkcja	Magazynowanie	Przesył i dystrybucja	Zastosowanie
	Elektroliza	Magazynowanie podziemne – wyeksploatowane złoża ropy naftowej i gazu, kawerny solne	Przesył za pomocą sieci gazowych	Stabilizacja sieci OZE i krajowych sieci energetycznych
	Reforming parowy biometanu	Magazynowanie naziemne – zbiorniki ciśnieniowe	Transport morski	Przemysł energochłonny (ciężki, chemiczny, rafineryjny, nawozowy)
	Zgazowanie, fermentacja lub piroliza biomasy	Magazynowanie chemiczne	Przewóz gazowego i skroplonego wodoru cysternami	Paliwo w układach kogeneracyjnych i poligeneracyjnych

	Reforming parowy biogazu	Magazynowanie ciekłego wodoru	Stacje tankowania i bunkrowania wodoru	Paliwo w środkach transportu drogowego (miejskiego i na duże odległości), kolejowego, wodnego, powietrznego i intermodalnego
	Zgazowanie, piroliza i termiczne przetwarzanie odpadów	Zatłaczanie wodoru do sieci gazowej		Magazynowanie energii
	Reforming parowy węglowodorów z CCS/CCU			Wsparcie łączenia sektorów gospodarki
	Zgazowanie węgla z CCS/CCU			
	Produkt uboczny w procesach rafineryjnych			
	Separacja gazu koksowniczego			
	HTR			

Źródło: opracowanie własne na podstawie: Monitor Polski (2021).

Twórcy Polskiej Strategii Wodorowej przyjęli, że w Polsce gospodarka wodorowa będzie rozwijana w oparciu o model Power-to-X. Jego koncepcja opiera się na wzroście zużycia odnawialnej energii do produkcji wodoru, a następnie jego wykorzystania w kolejnych sektorach gospodarki, co pozwoli zmniejszyć ich emisyjność. Przykładowy sposób wykorzystywania „zielonego” wodoru w transporcie kolejowym ukazuje rysunek 2.

Rysunek 2. Od produkcji niskoemisyjnego wodoru do napędzania pociągu



Źródło: Elżbieciak (2023).

W dokumencie strategicznym dotyczącym gospodarki wodorowej w Polsce zapisano następujące cele szczegółowe:

- wdrożenie technologii wodorowych w energetyce, ciepłownictwie i transporcie,
- wsparcie dekarbnizacji przemysłu, i wysoce energochłonnych działów gospodarki, w których elektryfikacja jest zbyt kosztowna lub niemożliwa,
- produkcja wodoru w nowych instalacjach,
- sprawny bezpieczny przemysł, dystrybucja i magazynowanie wodoru,
- możliwości przekwalifikowania kadry z sektorów zagrożonych redukcją, takich jak górnictwo węgla kamiennego i brunatnego, na potrzeby rozwoju gospodarki wodorowej,
- stworzenie stabilnego otoczenia regulacyjnego.

W strategii wodorowej przyjęto bardzo ambitne plany realizacji wskazanych celów, w tym m.in. (Monitor Polski, 2021):

- osiągnięcie do 50 MW do 2025 r. , a 2 GW do 20230 r. mocy instalacji do produkcji niskoemisyjnego wodoru,
- wykorzystywanie w transporcie miejskim 100-250 do 2025 r. i 800-1000 autobusów wodorowych,

- zorganizowanie co najmniej 5 dolin wodorowych,
- stworzenie co najmniej 32 stacji tankowania wodoru do 2025 r.

PSW została zatwierdzona i przyjęta do realizacji w czasie rządów Zjednoczonej Prawicy, która planowała przeznaczyć na wymienione powyżej cele około 11 mld zł (Pilszyk i in., 2023). Potencjalnymi źródłami finansowania tych inwestycji miały być m.in. Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW). Za finansowanie prac badawczych związanych z technologiami wodorowymi Narodowe Centrum Badań i Rozwoju (NCBiR). Poza źródłami krajowymi strategia wskazywała konieczność wykorzystania środków unijnych, m.in. Krajowego Planu, programu Horizon Europe, konkursów *Important Project of Common European Interest* (IPCEI) Funduszu Odbudowy (ang. Next Generation EU) czy *Just Transition Mechanism*.

Ówczesny rząd planował przeznaczyć na realizację zamierzeń PSW środki z różnych źródeł publicznych i prywatnych, w tym środków z Krajowego Planu Odbudowy (KPO). Z tego źródła 800 mln euro miało być przeznaczone na dotacje dla sektora prywatnego na projekty związane z wykorzystywaniem wodoru jako paliwa w transporcie i przemyśle. Długotrwały konflikt rządu Zjednoczonej Prawicy z Komisją Europejską w sprawie praworządności uniemożliwił pozyskanie środków unijnych z KPO i tym samym przeznaczenie ich części na rozwój gospodarki wodorowej.

10

Wskazany poziom niezbędnych nakładów inwestycyjnych realizacji celów PSW od początku był zaniżony. Eksperti wskazywali, że w rozwój gospodarki wodorowej w Polsce do 2025 r. należało zainwestować 2 mld zł, a do 2030 r. około 17 mld zł. Ze względu na zmienione od 2022 r. (wojna w Ukrainie) uwarunkowania geopolityczne i ekonomiczne w kolejnych latach nie udało się spełnić założonego przez państwo poziomu wsparcia publicznego i inwestycji sektora prywatnego w tak długookresowe i ryzykowne przedsięwzięcia wodorowe (Kryczka, 2021; Mierwiński, 2022; Łacka, Wojdyła, 2022).

Poza problemami finansowania rozwoju gospodarki wodorowej od początku we wdrażaniu założeń PSW pojawiły się trudności natury regulacyjnej. W ramach przygotowania stabilnego

otoczenia regulacyjnego do rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce strategia ustaliła, że (Wyszkowski i in., 2022):

- w III kwartale 2021 r. zostaną stworzone ramy regulacyjne funkcjonowania wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie,
- w IV kwartale 2021 r. nastąpi opracowanie legislacyjne pakietu wodorowego.

Pakiet regulacji, powszechnie znany jako prawo wodorowe miał objąć nowelizację takich ustaw, jak: ustawa o prawie energetycznym, ustawa o elektromobilności i paliwach alternatywnych, ustawa o odnawialnych źródłach energii oraz ustawa o biokomponentach i biopaliwach ciekłych. Do tego zamierzano wprowadzić m.in. ramy prawne uwzględniające międzysektorowe możliwości zastosowania wodoru, systemowe mechanizmy wsparcia dla prowadzenia działalności badawczo-rozwojowej dla projektów z zakresu technologii wodorowych, powołać krajowego operatora sieci wodorowych, określić przepisy w zakresie oddziaływania i korzystania ze środowiska inwestycji wodorowych oraz znowelizować przepisy prawa budowlanego w zakresie stacji wodoru, przy uwzględnieniu instalacji do ich oczyszczania (Wyszkowski i in., 2022).

11

Niestety, pomimo przyjętego harmonogramu działań legislacyjnych, od początku występowały opóźnienia we wprowadzaniu regulacji w zakresie technologii wodorowych i ich wsparcia w Polsce. Utrudniały one z jednej strony przyspieszenie rozwoju technologii wodorowych, a z drugiej strony pozyskiwanie środków finansowych na prace badawczo-rozwojowe w tym zakresie oraz rozwijanie technologii i ich komercjalizację. Już w 2022 r. przedstawiciele sektora prywatnego wskazywali na występowanie zaniedbań w zakresie działań regulacyjnych niezbędnych do rozwijania gospodarki wodorowej w Polsce. Podkreślali potrzebę stworzenia odpowiednich definicji wodoru, uproszczenia i skrócenia procedur administracyjnych niezbędnych podczas dokonywania inwestycji wodorowych. Przedsiębiorcy oczekiwali, że tego rodzaju inwestycje lokalizowane w dolinach wodorowych będą mogły liczyć na większą opiekę ze strony administracji publicznej.

Wśród dostrzeganych od przyjęcia przez rząd PSW barier przedstawiciele sektora prywatnego wskazywali również niestabilne otoczenie regulacyjne oraz nadmierną

biurokrację, brak rozwiązań systemowych (m.in. przeszkolenia urzędników z wydawania decyzji środowiskowych w zakresie technologii wodorowych) i uznaniowość decyzji urzędniczych, brak dokładnych regulacji przy planowaniu, realizacji czy eksploatacji inwestycji wodorowych. Utrudniało to przedsiębiorcom oszacowanie czasu i kosztu potrzebnego do realizacji projektu. Za destymulanty rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce uznawano także problemy z przyłączaniem urządzeń OZE do sieci energetycznej, brak spójnego systemu certyfikacji wodoru odnawialnego, brak zasad bezpieczeństwa człowieka i ochrony środowiska naturalnego w związku z eksploatacją wodoru oraz brak opisu gospodarki wodorowej od strony technicznej (Wyszkowski i in., 2023).

Jednak od 2023 r. w opinii autorów raportu *Łańcuch wartości gospodarki wodorowej w Polsce* „polskie otoczenie regulacyjne dla wodoru i pochodnych zaczyna się stopniowo rozwijać w odpowiedzi na bardzo dużą dynamikę regulacyjną na poziomie europejskim” (Tchorek i in., 2023a, s. 24).

Wybuch wojny w Ukrainie, gwałtowny wzrost cen gazu, kryzys energetyczny w Unii Europejskiej, przyjęcie planu REPowerEU, podwyższenie celów klimatycznych UE i rozwój technologiczny, spowodował konieczność zweryfikowania zapisów PSW. W lutym 2024 r. nowy przewodniczący Rady Koordynacyjnej ds. Gospodarki Wodorowej na spotkaniu wskazał na „potrzebę nowelizacji Polskiej Strategii Wodorowej do roku 2030, z perspektywą do roku 2040 (PSW), z uwagi na dynamicznie zmieniające się potrzeby w zakresie energetyki i klimatu, w tym unijne wymogi obligujące do większego wykorzystania wodoru odnawialnego. Podkreślił, że rozwój gospodarki wodorowej nie jest już tylko alternatywą, lecz koniecznością, a wodór odnawialny znajdzie zastosowanie w wielu sektorach, w tym w energetyce, przemyśle, transporcie i ciepłownictwie” (VIII posiedzenie Rady Koordynacyjnej ds. Gospodarki Wodorowej, 6 lutego 2024).

W opinii ekspertów (Smoleń i in., 2023) Polska Strategia Wodorowa koncentruje się na rozwoju rodzimego rynku wodoru i w zasadzie nie uwzględnia aspektów związanych z globalnym rynkiem wodoru oraz międzynarodową konkurencyjnością produkcji wodoru w Polsce. Biorąc pod uwagę bardzo mało rozwinięty polski rynek niskoemisyjnego wodoru

należy się zastanowić nad potrzebą importu tego typu surowca energetycznego w początkowych etapach rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce, przy zachowaniu odpowiedniego poziomu dywersyfikacji dostaw. Jednym z celów unijnego planu strategicznego przygotowanego w odpowiedzi na napaść Rosji na Ukrainę pt. *REPower EU* opublikowanego w 2022 r. (EC, 2022) jest zdywersyfikowanie dostaw energii przy założeniu jak najszybszego przejścia na czystą energię. Wskazuje na potrzebę importowania gazu i wodoru w ramach UE i z państw trzecich (kontrahentów Wspólnoty Energetycznej), do czego ma służyć powołana bezpieczna internetowa platforma zakupowa dla importu LNG i wodoru (EU Energy Platform). Jeżeli globalny rynek niskoemisyjnego wodoru (lub amoniaku) rzeczywiście się rozwinie, Polska może być skłonna do importowania zielonego wodoru z przyczyn ekonomicznych. Jak wskazują Smoleń z zespołem niezbędne nawiązanie regionalnej współpracy energetycznej, która umożliwiłaby stabilizację i bezpieczeństwo systemu energetycznego. W zależności od kierunku rozwoju technologii może to oznaczać rozwój transgranicznych gazociągów wodorowych, które pozwalałyby Polsce na przesył wodoru w obu kierunkach (import i eksport).

Gospodarka wodorowa w Polsce - stan obecny

Produkcja wodoru w łańcuchu wartości

W 2024 r. Polska w porównaniu do innych państw Unii Europejskiej znajduje się na wstępnym etapie wdrażania i rozwoju gospodarki wodorowej i nie zdołała osiągnąć zamierzony do 2025 r. celów PSW. W trzeciej dekadzie XXI w. Polska jest trzecim, po Niemczech i Holandii, producentem wodoru „szarego” w Europie w procesach wytwórczych przemysłu petrochemicznego i chemicznego, który pochodzi przede wszystkim z procesu reformingu parowego węglowodorów. Jest wytwarzany w zakładach przemysłowych, w których jest też wykorzystywany na potrzeby przemysłu chemicznego, rafineryjnego, spożywczego i metalurgicznego. W 2022 r. Polska wytworzyła 1,3 mln t wodoru, przy czym powstał wyłącznie z paliw kopalnych (Sobolewski, 2022; Pilszczyk i in. 2023). Stanowiło to ponad 13% rocznej unijnej produkcji tego surowca. W Polsce są planowane inwestycje w gospodarce wodorowej, które zakładają produkcję wodoru „zielonego” z OZE (obecnie działają jedynie projekty pilotażowe), ale w dużej mierze działania inwestycyjne mają się koncentrować również na wytwarzaniu wodoru „niebieskiego” (pozyskiwanego z użyciem metod wychwytywania i składowania CO₂). Z jednej strony wskazane działania mogą wykorzystać szansę wynikającą z dużego krajowego popytu na wodór niskoemisyjny („zielony”). Polska stanowi perspektywiczny rynek wodoru z powodu znacznego potencjalnego zapotrzebowania na niego ze względu na dużą liczbę ludności, uzależnienie energetyki i ciepłownictwa oraz transportu od paliw kopalnych, a także rozwinięty przemysł. Z drugiej strony obecne technologie wodorowe prowadzące do wytwarzania „szarego” wodoru stanowią obciążenie dla gospodarki (Antas i in. 2021) ze względu na emisyjność tego rodzaju wodoru. „Szary” wodór będzie musiał być stopniowo zastępowany odnawialnym i niskoemisyjnym wodorem.

Z danych Europejskiego Obserwatora Wodorowego w Polsce wynika, że w 2022 r. zapotrzebowanie krajowe na wodór wynosiło ponad 784 tys. t rocznie. W ponad 96% był on zużywany w procesie rafinacji ropy naftowej i produkcji amoniaku. Popyt na wodór do produkcji innych chemikaliów wynosił 14 tys. t rocznie. Natomiast zużycie wodoru do

produkcji ciepła przemysłowego i na inne cele stanowiło kolejno 9 tys. i 6 tys. t rocznie. Sektor transportu (mobilność) wykorzystywał jedynie 13,8 t (około 0,014 tys. t) wodoru w ciągu roku (Pilszyk i in. 2023).

Eksperti Polskiego Instytutu Ekonomicznego podali, że w 2023 r. w Polsce były 74 podmioty związane z inwestycjami wodorowymi. Charakteryzowały się różną wielkością, formą własności i przynależnością do różnych sektorów gospodarki (PIE, 2023). Należały do nich małe jednostki dysponujące stacjami tankowania wodoru, instytuty badawcze i największe podmioty na polskim rynku paliwowo-energetycznym. Najliczniej były reprezentowane te, które działały w przemyśle i ciepłownictwie (24), produkcji (14) oraz edukacji (14). Wśród podmiotów zaangażowanych w rozwój gospodarki wodorowej w Polsce można znaleźć koncerny motoryzacyjne, energetyczne, porty, spółki gazowe, spółki węglowe, organizacje otoczenia biznesu (np. klastry, parki technologiczne, izby przemysłowe i gospodarcze), uczelnie wyższe, instytuty badawcze i instytucje administracji publicznej. Ich działalność skoncentrowana jest w dolinach wodorowych, które powstały w ciągu kilku ostatnich lat. Z informacji Agencji Rozwoju Przemysłu S.A. wynika, że w 2024 r. w Polsce działa jedenaście projektów dolin wodorowych. Osiem z nich było konsultowanych lub powstało z inicjatywy tej spółki, która aktywnie angażuje się w rozwój ekosystemu gospodarki wodorowej w Polsce. W założeniu doliny wodorowe mają wesprzeć proces dekarbonizacji energochłonnego przemysłu, lokować demonstratory technologii w parkach przemysłowych i specjalnych strefach ekonomicznych oraz budować polski łańcuch dostaw przy wsparciu biznesu, nauki i administracji lokalnej (ARP S.A., 2024). Na rysunku 3 przedstawiono lokalizację dolin wodorowych w Polsce.

Rysunek 3. Doliny wodorowe w Polsce w 2024 r.



Źródło: ARP. S.A. (2024).

Największym producentem wodoru w Polsce jest Grupa Azoty S.A. (produkcja nawozów mineralnych i chemikaliów). Znaczne ilości wodoru konwencjonalnego (z gazu ziemnego) powstają też w PKN Orlen, koksowni Przyjaźń, która należy do Jastrzębskiej Spółki Węglowej. Pokazuje to, że wodór w Polsce produkują duże przedsiębiorstwa należące do skarbu państwa i zużywają go przede wszystkim na własne potrzeby bez większych możliwości jego odsprzedaży. Jak wskazują Komorowska i in. (2023) trudno dziś mówić o rynku wodoru w Polsce – musi się on dopiero rozwinąć. Na rysunku 4 pokazano wielkości produkcji wodoru poszczególnych producentów w Polsce w 2021 r. Należy pamiętać, że w 2022 r. nastąpiła fuzja PKN Orlen z Grupą Lotos, więc obecnie na rynku jako dostawca wodoru z sektora paliwowo-rafineryjnego występuje tylko PKN Orlen.

Rysunek 4. Producenci wodoru w Polsce i ich udziały w rynku



Źródło: Elżbieciak T. (2023).

Produkowany w Polsce wodór jest wykorzystywany głównie w przemyśle chemicznym do wytwarzania amoniaku, służącego do produkcji nawozów sztucznych. Poza tym używa się go w przemyśle petrochemicznym w procesach reformingu (służącym podniesieniu jakości paliwa), hydrotorafinacji (obniżającej zawartość siarki, azotu i tlenu) i hydrokrakingu (przerobie ciężkich frakcji ropy naftowej na oleje lekkie i benzynę). Większość wodoru jest wykorzystywana przez produkujące go przedsiębiorstwa, a tylko niewielka część podlega obrotowi na rynku. Zarówno wytwórnie wodoru, jak i wykorzystujące je instalacje przemysłowe, znajdują się zwykle w tej samej lokalizacji. Wynika to z technicznych trudności związanych z transportem wodoru.

Otoczenie technologiczne produkcji wodoru w Polsce

W raporcie analizującym łańcuch wartości gospodarki wodorowej w Polsce (Tchorek i in., 2023a) przedstawiono zalecane przez Unię Europejską ze względu na niską emisję CO₂

i stosowane obecnie metody produkcji wodoru w Polsce. Wśród nich znalazły się takie metody jak: elektroliza z OZE (farmy wiatrowe, fotowoltaika), elektroliza z sieci, elektroliza z energii jądrowej, reforming parowy gazu ziemnego, reforming parowy biogazu, gazyfikacja węgla, pyroliza gazu ziemnego, przerób odpadów, procesy termochemiczne, gazyfikacja biomasy oraz pozostałe metody na etapie rozwoju technologicznego o trudnym do określenia terminie komercjalizacji (membrany do separacji wodoru, fotoliza, ciemna fermentacja biomasy, procesy biologiczne, deoksydacja wody). Ich charakterystyka i ocena możliwości ich stosowania w świetle zapisów dokumentów strategicznych UE i aktów krajowych opiera się na porównaniu wielkości emisji CO₂ w trakcie produkcji wodoru, ustalonym poziomie gotowości technologicznej (TRL) danej metody oraz uśrednionego kosztu wytworzenia wodoru w EUR/1kg H₂ (ang. *Levelized Cost of Hydrogen*, LCOH). Poszczególne metody są bardzo szczegółowo omówione we wspomnianym raporcie, dla tego w tym miejscu zostaną podane jedynie najważniejsze ustalenia w zakresie metod produkcji wodoru w Polsce i ich perspektyw w najbliższych latach. Na wybór stosowanych obecnie i w przyszłości metod produkcji wodoru ma oczywiście wpływ otoczenie regulacyjne, na które składają się dokumenty strategiczne i dyrektywy Unii Europejskiej oraz polskie akty prawne, do których należą:

- Dyrektywa RED wraz z aktami delegowanymi,
- Taksonomia UE wraz z aktem delegowanym
- Nowy Pakiet Gazowy
- REPower EU
- Net Zero Industry Act
- pozostałe: EU ETS, CEEAG
- wybrane akty krajowe.

Na produkcję wodoru w Polsce i jej metody oddziałują także czynniki związane z otoczeniem rynkowym, które określają takie determinanty jak:

- wahania cen gazu ziemnego,
- wahania cen energii elektrycznej,
- koszty produkcji energii elektrycznej z OZE,
- rozwój rynku elektrolizy,

- rozwój rynku *Carbon Capture Storage* (CCS) i *Carbon Capture Utilization* (CCU) – technologii wychwytyjących emisje CO₂ w reformingu gazowym,
- zaistnienie przykładowych wielkoskalowych projektów produkcji wodoru niskoemisyjnego,
- wpływ regulacji państwa na efektywność ekonomiczną projektów wodorowych.

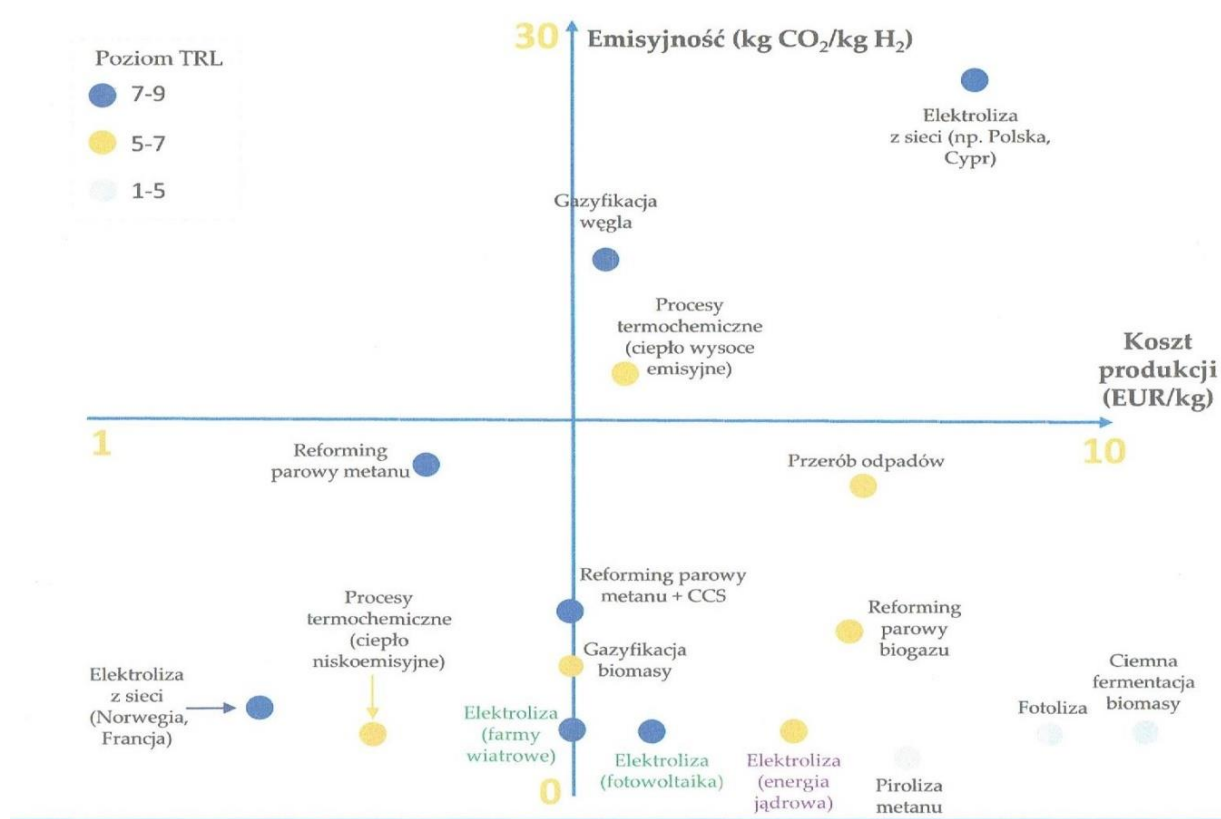
Syntetycznym ujęciem oceny różnych bardziej i mniej zaawansowanych technologii (gotowych technologicznie w skali 1-9) produkcji wodoru ze wskazaniem ich emisyjności oraz średnim kosztem wytwarzania wodoru jest rysunek 5. Poziom gotowości technologicznej TRL obejmuje 9-stopniową klasyfikację do określenia dojrzałości technologiczną procesu (ewentualnie produktu lub usługi) od badań podstawowych (TRL 1-2), poprzez prace koncepcyjne i laboratoryjne, odpowiadające badaniom przemysłowym (TRL 3-6), tworzenie prototypu w ramach prac rozwojowych (TRL 7-8), aż do gotowego rozwiązania (TRL 9), mającego zastosowanie w praktyce.

Rysunek 5 ma dwie osie – pionowa wskazuje wielkość emisji CO₂ podczas wytwarzania wodoru daną metodą, a pozioma określa wielkość uśrednionego kosztu wytwarzania wodoru z wykorzystaniem danej technologii. Poziom gotowości technologicznej (TRL) jest pokazany za pomocą trójkolorowych kółek. Im ciemniejsze kółko, tym bardziej rozwinięta jest dana technologia i gotowa do zastosowania w produkcji wodoru. Bardzo jasno-szary kolor kółka wskazuje na niski TRL oraz trudny do ustalenia czas wprowadzenia danej technologii na rynek i jej wykorzystania w Polsce do produkcji wodoru. Te metody są obecnie na etapie badań podstawowych.

Autorzy raportu wskazali, że gospodarka wodorowa w Polsce powinna się opierać na produkcji wodoru niskoemisyjnego i odnawialnego, co umożliwia stworzenie gospodarki nisko- i zeroemisyjnej. Należy jednak zwrócić uwagę na to, że nie każda ujęta na rysunku 5 metoda (w tym metody preferowane przez dokumenty strategiczne Unii Europejskiej oparte na elektrolizie) może być zastosowana w polskich warunkach w najbliższych latach ze względów ekologicznych (emisyjność), ekonomicznych, utrudnień legislacyjnych lub problemów z poziomem gotowości technologicznej.

Elektroliza z sieci w przypadku Polski jest drogą i wysoce emisyjną metodą produkcji wodoru. To powoduje, że nie powinno się jej wykorzystywać. Gazyfikacja węgla, reforming parowy gazu ziemnego są metodami o wysokim poziomie technologicznym i niezbyt kosztownymi, jednak ze względu na relatywnie wysoką emisyjność powinny być stosowane wraz z urządzeniami do wychwytywania CO₂ (CCS/CCU), aby spełnić wymagania polityki klimatycznej UE. Zalecana przez Komisję Europejską metoda produkcji wodoru oparta na elektrolizie z OZE (farmy wiatrowe i fotowoltaika) ma TRL na poziomie 7-9 i ciągle się rozwija, a jej koszty są nadal optymalizowane. Jej zaletę stanowi bardzo niska emisja CO₂. Natomiast reforming parowy biogazu oraz przerób odpadów są uznawane za obiecujące (nadal się rozwijają) metody uzupełniające, z potencjalnie niskim kosztem produkcji wodoru. Niestety ich wykorzystanie prowadzi do emisji CO₂, które należałoby zredukować w długim okresie.

Rysunek 5. Macierz metod produkcji wodoru



Źródło: Tchorek i in. (2023a), s. 11.

Trudno dziś uznać za możliwą do wykorzystania w Polsce w relatywnie krótkim czasie metodę elektrolizy z energii jądrowej do produkcji tzw. „fioletowego wodoru” ze względu na brak dużych bloków jądrowych i SMR. Choć poziom TRL jest oceniany na 6-7, a emisyjność procesu produkcji wodoru bliska zeru, to brak rozwiniętej energetyki jądrowej i wysokie koszty produkcji wodoru stanowią największe bariery wykorzystania tej metody w Polsce w najbliższych latach.

Autorzy przywoływanego raportu przygotowali pewne wnioski i rekomendacje dla decydentów politycznych, których wdrożenie powinno wspierać gospodarkę wodorową na etapie produkcji. Wśród nich znalazły się następujące stwierdzenia (Tchorek i in. 2023a, s. 39):

- niezbędne jest uruchomienie systemu wsparcia dla produkcji wodoru odnawialnego i pochodnych w Polsce (RFNBO) - w Polsce tylko wodór produkowany z OZE pozwoli zrealizować cele RFNBO;
- konieczne jest umożliwienie realizacji przemysłowych inwestycji OZE z wykorzystaniem linii bezpośredniej;
- państwo powinno dokonać analizy możliwości wprowadzenia ulg w opłatach regulacyjnych i/lub sieciowych dla wytwórców wodoru (powoli to obniżyć koszt wytworzenia wodoru o 1-2 EUR/kg);
- należy promować i wspierać podejście w projektach energetycznych i wodorowych, że instalacja OZE jest elementem systemu produkcji wodoru, a nie niezależnym aktywem, na którym trzeba osiągnąć maksymalny zysk (kupno energii elektrycznej do elektrolizera po cenach hurtowych lub indeksowanych do hurtowych spowoduje, że rynek wodoru odnawialnego jeszcze długo może być nierentowny);
- przedsiębiorstwa przemysłowe wykorzystujące wodór w procesach technologicznych powinny wziąć pod uwagę wpływ zmienionego w 2023 r. systemu handlu emisjami (EU ETS/CBAM) na jednostkowe koszty produkcji 1kg wodoru; mogą one istotnie wzrosnąć do 2030 r. ze względu na wzrost cen uprawnień do emisji CO₂ (160 EUR/t CO₂ w 2030 r.), wejście wodoru do CBAM od 2026 r. i stopniowe odejście od darmowej alokacji,

zaostrenie benchmarków sektorowych w zakresie emisji CO₂ dla produkcji wodoru w EU ETS;

- niezbędne jest strategiczne zaplanowanie przez państwo przyłączenia i budowy instalacji OZE wyłącznie na potrzeby produkcji wodoru w Polsce na poziomie Krajowego planu na rzecz energii i klimatu na lata 2021-2030 (KPEiK) oraz Polityki energetycznej Polski do 2040 r. (PEP2040), a nie na potrzeby elektroenergetyki i sprzedaży energii w hurcie.

Magazynowanie wodoru jako ogniwo łańcucha wartości gospodarki wodorowej w Polsce

Na procesy magazynowania wodoru w Polsce oraz stosowane obecnie i przyszłości jego metody wpływa wiele czynników – cechy wodoru i wymagania jego przechowywania, względy technologiczne, regulacyjne i ekonomiczne. Jak wskazują Folentarska i in. (2016) „Ze względu na właściwości wodoru, tzn. niską gęstość energii w porównaniu z paliwami konwencjonalnymi, palność oraz wysoką wybuchowość, materiały magazynujące wodór powinny wyróżniać się wysoką pojemnością magazynowanego wodoru, prostotą technologiczną, efektywnym przebiegiem cykli absorpcji/desorpcji wodoru, niską ceną oraz bezpieczeństwem stosowania” (Folentarska i in., 2016, s. 125).

Magazynowanie wodoru podlega działaniom regulacyjnym, które determinują unijne i krajowe akty prawne, takie jak: akty delegowane do Taksonomii Unii Europejskiej (określające zasady zaliczania inwestycji w magazynowanie wodoru jako zgodnych z Taksonomią i mających istotny wkład w łagodzenie klimatycznych skutków globalnego ocieplenia), Pakiet Dekarbonizacji Rynku Gazu Ziemnego i Wodoru (tzw. Nowy Pakiet Gazowy) oraz krajowe akty prawne dot. produkcji wodoru i ich nowelizacje, w tym Ustawa Prawo Energetyczne, Ustawa Prawo Geologiczne i Górnicze, rozporządzenia w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu wodorowego (Tchorek i in., 2023a).

Wodór to bardzo powszechnie występujący pierwiastek o wysokiej gęstości grawimetrycznej i jednocześnie niskiej gęstości objętościowej. Jest najlżejszym pierwiastkiem we wszechświecie. Wymusza to jego magazynowanie w warunkach pokojowych (w pokojowym

ciśnieniu oraz temperaturze) na bardzo dużych powierzchniach. Jak wskazują Siekierski i in. (2023) ma on w postaci gazowej najwyższą prędkość molekuł, co powoduje wysoką wartość współczynnika dyfuzji oraz najwyższą przewodność cieplną i najniższą lepkość. Wodór cząsteczkowy ma najwyższe ciepło spalania ze wszystkich dotychczas znanych paliw, przy czym nie dochodzi do bezpośredniej emisji dwutlenku węgla.

Gęstość objętościowa wodoru gazowego przy ciśnieniu atmosferycznym otoczenia wynosi około $0,09 \text{ kg/m}^3$. Sprężenie do poziomu 350 bar wywołuje wzrost gęstości objętościowej do wartości 23 kg/m^3 , a sprężanie do poziomu 700 bar powoduje dalszy wzrost gęstości objętościowej do wartości 41 kg/m^3 . Umożliwia to zgromadzenie 5 kg wodoru w 125 litrowym zbiorniku paliwowym. Zbiornik o pojemności 300 l pozwala zmagazynować 13-15 kg wodoru przy ciśnieniu 700 bar. Sprężanie wodoru z poziomu 20 bar (ciśnienie wyjściowe z elektrolizera lub reformera) do ciśnienia 700 bar wymaga do kilku kWh energii elektrycznej na każdy 1 kg wodoru. Zużycie energii w przypadku metody sprężania powoduje utratę energii pierwotnej wodoru na poziomie około do około 10-15%. Jednocześnie należy pamiętać, że wodór skroplony ma wysoką objętościową gęstość energii na poziomie 71 kg/m^3 przy ciśnieniu otoczenia 1 bar. Wartość ta jest prawie dwukrotnie większa niż w przypadku wodoru sprężonego do ciśnienia 700 bar (Tchorek, 2022). Gazowy wodór może zostać sprężony do wysokiego ciśnienia, w celu podwyższenia jego gęstości energii (de Jongh, Adelhelm, 2010).

23

Magazynowanie wodoru może występować na każdym etapie łańcucha wartości gospodarki wodorowej od chwili wyprodukowania wodoru aż do chwili przed jego zastosowaniem. To ogniwo łańcucha wartości pełni istotną rolę w zapewnieniu stabilnych dostaw wodoru do sektora przemysłu, transportu, energetyki i tym samym stabilnego funkcjonowania systemu energetycznego w przypadku zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii w sieciach.

Wodór można przechowywać w formie gazowej, ciekłej i stałej, a proces magazynowania można klasyfikować na dwie kategorie – podziemne (geologiczne) i naziemne (zbiornikowe). Gaz ten może być przechowywany bezpośrednio w formie derywatu (pochodnej wodoru)

oraz w różnych stanach skupienia, co wynika z celu magazynowania i tego, w jakim sektorze wodór ma być zastosowany (tabela 2).

Tabela 2. Metody przechowywania wodoru w różnych formach skupienia

Forma gazowa			Forma ciekła			Forma stała	
Skompresowany wodór	Syntetyczne węglowodory:		Ciekły wodór	Hybrydy chemiczne :	LOHC:	Wodorki metali:	Materiały porowate :
	Skompresowany metan	Ciekły SNG		Amoniak	MCH	Borowodorek	Grafen
		Syntetyczna benzyna		Metanol	DBT	Stopy typu-AB	Aerożel węglowy
		Syntetyczny diesel		Izopropanol	Benzen	Wodorek glinu	Nanorurki węglowe

Źródło: Tchorek i in. (2023).

Metody magazynowania wodoru można także dzielić na fizyczne i materiałowe, co pokazano na rysunku 6. Do fizycznych metod zalicza się sprężanie i skraplanie wodoru. Obecnie te metody są najłatwiejsze do wdrożenia i bardziej powszechne, jednak jak oceniają specjaliści mają wiele niedociągnięć technicznych. Natomiast metody materiałowe opierają się na procesach fizykosorpcji i chemisorpcji, a w opinii ekspertów są niemal pozbawione wad (Mohan et al. 2018). Niestety nadal trwają procesy badawczo-rozwojowe w tym zakresie, co powoduje, że nie można ich obecnie wprowadzić do powszechnego użytku (Kozikowski, Szymlek, 2022).

W przywoływanym już raporcie na temat łańcucha wartości gospodarki wodorowej w Polsce omówiono poszczególne metody magazynowania wodoru w różnych formach skupienia i dwóch wariantach - naziemnym i podziemnym (Tchorek i in., 2023a). Wodór w formie gazowej może być magazynowany pod ziemią w kawernach solnych lub skalnych, w miejscach po wyczerpanych złożach gazu. Natomiast w przypadku składowania tego gazu na ziemi stosuje się zbiorniki ciśnieniowe, co stanowi obecnie najbardziej popularną formę przechowywania wodoru z TRL na poziomie 9, choć pojemność magazynu w postaci zbiornika jest bardzo mała (1,1 t wodoru). Zbiorniki z materiałów kompozytowych lub stalowe

mogą występować w formie stacjonarnej (np. przy instalacjach przemysłowych), lub mobilnej (np. w transporcie intermodalnym).

Każda z podanych metod magazynowania wodoru w Polsce charakteryzuje się różnymi cechami – innym poziomem gotowości technologicznej oraz pojemnością magazynu, a także wymaganiami w zakresie ciśnienia magazynu, stałej objętości gazu w magazynie, a w przypadku składowania wodoru pod ziemią również głębokości magazynu.

Rysunek 6. Klasyfikacja metod magazynowania wodoru



Źródło: Kozikowski, Szymlek (2022), s. 16.

Polska dysponuje dużym potencjałem magazynowania wodoru w postaci kawern solnych zlokalizowanych na lądzie, które cechują się większą elastycznością w stosunku do magazynów po wyczerpanych złożach gazu i solankowych warstwach wodonośnych. Wiąże się to z możliwością wykonania w nich kilku cykli załadowania i wycofywania w ciągu roku, co pozwala reagować na zmiany sytuacji rynkowej. Kawerny niedaleko wybrzeża (do 50 km od brzegu) mogłyby być używane jako magazyny wodoru importowanego. Do atutów tej metody magazynowania należy to, że kawerny solne mają wysoki poziom gotowości technologicznej (TRL wynosi 8-9), niskie ryzyko zanieczyszczenia wodoru i wysoką wydajność magazynowania (98%) oraz dużą pojemność magazynową (300-120 000 t wodoru).

W przypadku magazynowania wodoru w formie ciekłej i stałej za najbardziej powszechne i rozwinięte metody uznaje się przechowywanie ciekłego wodoru (TRL wynosi 7-9) oraz amoniaku (TRL wynosi 9). To dojrzałe technologie zbiornikowe dla małej i średniej skali magazynowania w przypadku ciekłego wodoru i dużej skali dla amoniaku. Mają one jednak pewne wady, w tym palność przechowywanej substancji i wysokie dla ciekłego wodoru i średnie dla amoniaku zużycie energii. Pewnym atutem tych metod jest średnia elastyczność systemu magazynowania, co może być przydatne w sytuacjach zmian zapotrzebowania na wodór. Znacznie większymi zdolnościami do elastycznego reagowania na zmiany rynkowe cechuje się metoda magazynowania ciekłego wodoru (LOHC) w zbiornikach. Wymaga zagospodarowania węgla, niskiego zużycia energii, ale jej wadą jest również palność magazynowanej substancji. Obecnie ta metoda ma średni poziom gotowości technologicznej i komercjalizacji (TRL wynosi 6-8), co utrudnia jej dostępność w Polsce. Podobny problem występuje w przypadku metody wykorzystującej wodorek glinu. Choć ta metoda magazynowania chroni przed palnością substancji, to charakteryzuje się jeszcze niższym poziomem gotowości technologicznej i komercyjnej oraz małą elastycznością systemu magazynowania.

Średnio- i długookresowe magazynowanie wodoru i zawartej w nim energii wskazuje się jako jeden z najważniejszych celów rozwoju gospodarki wodorowej w każdym kraju członkowskim UE. Rosnące zużycie wodoru na cele energetyczne wymusi konieczność nie tylko jego wytwarzania, ale także magazynowania. To z kolei przyczynia się do konieczności działań inwestycyjnych w infrastrukturę wodorową. Jak wskazują eksperci nakłady inwestycyjne w infrastrukturę magazynowania wodoru mogą wynosić nawet 30% całkowitych kosztów infrastrukturalnych łańcucha wartości gospodarki wodorowej (IEA, 2023). Rozwój rynku wodoru będzie sprzyjał pojawianiu się podmiotów oferujących usługi podziemnego magazynowania wodoru w krajach dysponujących lepszymi warunkami geologicznymi. Stanowi to szansę dla Polski, która ma znaczny potencjał magazynowania z wykorzystaniem kavern solnych. Metoda ta oferuje najniższe uśrednione koszty magazynowania 1 kg wodoru przy dużym potencjale magazynu.

Z analiz ekspertów wynika, że największym potencjałem przechowywania wodoru charakteryzują się wyczerpane złoża gazu, jednak w chwili obecnej jest to najmniej dojrzała z analizowanych technologii. Należy też pamiętać, że wykorzystywanie poszczególnych dostępnych metod jest determinowane planowanym okresem magazynowania wodoru. Na cele sezonowego przechowywania dużych ilości wodoru mogą służyć wyczerpane złoża gazu. W przypadku okresów miesięcznych można użytkować kawerny solne i zbiorniki amoniaku. W celu przechowywania wodoru w skali tygodnia lub dni proponowane są magazyny w postaci zbiorników ciśnieniowych oraz zbiorników na ciekły wodór. Natomiast jako metodę pośrednią wskazuje się magazynowanie w wyłożonych kawernach skalnych, które mogą służyć kilkumiesięcznemu przechowywaniu wodoru, ale mają średnią pojemność (Tchorek i in., 2023a).

Biorąc pod uwagę plusy i minusy różnych metod magazynowania, dotychczasowy rozwój technologii w tym zakresie oraz potencjał geologiczny Polski można wskazać następujące wnioski i zalecenia w odniesieniu do tego ogniwa łańcucha wartości gospodarki wodorowej w Polsce (Tchorek i in., 2023a):

- barierami rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce w najbliższych latach stanie się konieczność zapewnienie odpowiedniej liczby i wielkości magazynów dla wodoru, a także zagwarantowanie wystarczających ilości energii elektrycznej pochodzącej z odnawialnych źródeł energii dla produkcji wodoru odnawialnego i niskoemisyjnego;
- niezbędne jest stymulowanie przez państwo rozwoju zarówno wielkoskalowych magazynów wodoru w strukturach geologicznych, jak i mniejszych magazynów naziemnych; każdy z tych rodzajów magazynów musi pełnić inne role, więc oba rodzaje są potrzebne dla rozwoju gospodarki wodorowej;
- istotne znaczenie dla rozwoju przyszłej infrastruktury transportowej opartej na energii z wodoru ma dostępność i rozlokowanie magazynów na terenie kraju; ma to szczególne znaczenie w kontekście lokalizacji sieci przesyłowych wysokiego napięcia i wielkoskalowych magazynów w strukturach geologicznych;
- wprowadzane przez państwo polityki strategiczne i regulacyjne powinny uwzględniać, zwiększenie od 2030 r. obowiązków prawnych w zakresie wykorzystania wodoru

odnawialnego; wymusi to posiadanie rezerw wodoru w Polsce, a jednocześnie przyczyni się do zapewnienia niezależności i bezpieczeństwa strategiczno-przemysłowego kraju;

- konieczne jest wykorzystanie korzystnych uwarunkowań geologicznych Polski i jej znacznego w skali europejskiej potencjału magazynowania wodoru w kawernach solnych; umożliwi to zwiększenie niezależności w przechowywaniu wodoru w kraju, ale także stanowi szansę dla świadczenia usług magazynowania wodoru dla innych odbiorców (z krajów unijnych).

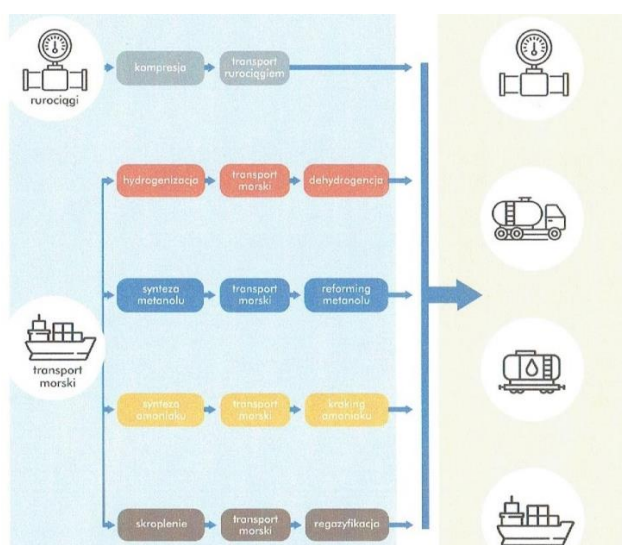
Transport wodoru

Kolejne ogniwo łańcucha wartości gospodarki wodorowej w Polsce należy rozpatrywać w kontekście oddziaływania uwarunkowań technologicznych, regulacyjnych i rynkowych. To one determinują nie tylko wybór określonego sposobu transportu wodoru, inwestycje związane z rozwojem infrastruktury transportowej, ale także efektywność tego procesu ze względu na przeciętny koszt transportu 1 kg wodoru.

28

Główne elementy łańcucha wartości transportu wodoru oraz ich wykorzystanie w zależności od odległości, które wódór musi pokonać (powyżej lub poniżej 500 km) przedstawiono na rysunku 7.

Rysunek 7. Rodzaje transportu wodoru



Źródło: Tchorek i in. (2023b), s. 18.

Długodystansowy transport różnych postaci wodoru - w odległości do i powyżej 500 km - może odbywać się rurociągami, albo z wykorzystaniem transportu morskiego. W przypadku tego ostatniego sposobu należy brać pod uwagę dalsze procesy przetwarzania poszczególnych przewożonych postaci wodoru, aby można było kontynuować jego dystrybucję na mniejsze niż 500 km odległości (rurociągami, transportem drogowym, cysternami, transportem kolejowym i morskim, intermodalnym).

Wymienione technologie transportu wodoru mają różny poziom gotowości technologicznej, co szczegółowo omówiono w przywoływanym raporcie. Jego autorzy (Tchorek i in., 2023b) wskazują, że TRL różni się w zależności od skali infrastruktury. W przypadku wielkoskalowego transportu (> 1000 t H_2 dziennie) żadna ze wskazanych metod nie osiągnęła poziomu TRL 9 w całym łańcuchu. Najbardziej zaawansowana technologicznie w przypadku transportu morskiego jest obecnie metoda transportu wodoru pod postacią amoniaku w sytuacji zwiększenia skali jednostek morskich służących do jego przewozu. Najniższy poziom przygotowania technologicznego występuje w przypadku transportu morskiego wodoru w postaci LOHC oraz metanolu. Konkurencyjność metanolu i amoniaku jako nośników wodoru jest ograniczona wskutek konieczności rekonwersji w celu uzyskania ponownie wodoru, która wymaga zużycia znacznych ilości energii. Jednak usunięcie potrzeby rekonwersji i wykorzystanie bezpośrednio ciekłych form wodoru poprawia atrakcyjność tych metod transportu (Tchorek i in., 2023a).

29

W przypadku transportu rurociągami poziom gotowości technologicznej jest relatywnie wysoki, choć różni się w zależności od metody. W przypadku wykorzystywania dedykowanego rurociągu TRL wynosi 8-9, ale istniejąca technologia wymagałaby zwiększenia skali transportu wodoru i wykorzystania rur o większej przepustowości. Ten sam poziom gotowości technologii występuje w przypadku retrofitu gazociągu, ale jeżeli miałby ta metoda służyć do transportu wodoru, to niezbędne będzie zastosowanie trzy razy mocniejszych sprężarek. Technologia zatłaczania amoniaku ma TRL równe 8 i wymaga zastosowania w większej skali dla potrzeb transportu wodoru w dużych ilościach. Natomiast sam transport amoniaku rurociągami jest dojrzałą technologią (TRL wynosi 8-9) i służy potrzebom wyspecjalizowanych odbiorców z przemysłu.

Do transportu wodoru na odległość mniejszą niż 500 km mogą być wykorzystywane rurociągi ze sprężonym wodorem (dedykowane / retrofit sieci gazowej), ale także transport intermodalny wodoru w formie sprężonej i ciekłej. Uwzględniając specyfikę technologiczną i wrażliwość infrastruktury na różne nieprzewidywalne zdarzenia (katastrofy przyrodnicze, zamachy, działania militarne) transport wodoru w postaci ciekłej rurociągami nie jest obecnie rozwiązaniem do zastosowania na większą skalę. Jednak można zauważyć, że im większa odległość przesyłu wodoru oraz narastające potrzeby związanymi ze zwiększaniem wolumenu dostarczanego wodoru, tym większa atrakcyjność transportu rurociągami względem transportu intermodalnego, a zwłaszcza drogowego. Transport sprężonego wodoru umożliwia zwiększenie elastyczności transportu ze względu na możliwości zastosowania rozwiązań intermodalnych dzięki wykorzystywaniu kontenerów. Uwzględniając większą gęstość wodoru w transporcie ciekłym metoda ta staje się bardziej konkurencyjna wraz ze wzrostem odległości i ilości transportowanego wodoru (Tchorek i in., 2023a).

Rozważając wykorzystywanie różnych rodzajów transportu wodoru w Polsce należy brać pod uwagę również koszty jego przesyłu lub przewozu. Eksperci wskazują, że metody i koszty transportu wodoru są związane ze skalą rynku wodorowego (roczną wielkością produkcji, ewentualną wielkością i kierunkami importu wodoru i zagęszczeniem rynków zbytu). Im większa jest skala tego rynku, tym niższe przeciętne koszty transportu wodoru. W celu szczegółowej kalkulacji kosztów transportu dla polskiego rynku wodoru należałoby przyjąć konkretne dane dla wybranego przypadku przedsięwzięcia biznesowego. Wynika to z faktu, że koszty transportu wodoru przy wczesnym stadium rozwoju rynku są mocno zróżnicowane w zależności od wielkości inwestycji i jej otoczenia infrastrukturalnego (Tchorek, 2022).

Naukowcy zajmujący się rozwojem gospodarki wodorowej w Polsce uważają, że na początku rozwoju rynku wodorowego z małymi wielkościami produkcji wodoru najtańszym sposobem jego transportu przy krótkich dystansach poniżej 200-300 km będzie przewóz wodoru gazowego w cysternach. Wraz pojawianiem się bardziej dojrzałego i rozwiniętego rynku efektywne pod względem kosztów staną się takie sposoby transportu jak przewóz w cysternach średnich wolumenów produkcji wodoru skroplonego na odległość 300–500 km,

w ramach kilku województw oraz transport rurociągowy dużych ilości wodoru w odległości powyżej 300 km, w ramach kilku województw lub transgranicznie (Tchorek, 2022).

Wykorzystanie przez Polskę metody transportu morskiego wodoru jest obecnie bardzo kosztowne. Koszt jednostkowy transportu wodoru tym sposobem jest około 6 razy droższy od transportu LNG. W przypadku dążenia do używania transportu morskiego niezbędne będzie zwiększenie skali działalności, aby móc korzystać z efektów skali dla optymalizacji kosztowej. Będzie to niezbędne w sytuacji importu wodoru, jednak dla obsługi wymiany handlowej wodoru Polska musi stworzyć odpowiednią infrastrukturę – zbudować terminal wodorowy (na wzór terminala LNG). Ekspert wskazuje również, że istnieją możliwości technologiczne obsługi dostaw LNG i wodoru w ramach jednego gazoportu (Tchorek, 2022).

W ramach rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce poza transportem wodoru należy pamiętać o konieczności stworzenia właściwej infrastruktury do zasilania środków transportowych wodorem jako paliwem alternatywnym. Reguluje to rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady Europy w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych (AFIR) (THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION, 2023). AFIR zastępuje Dyrektywę Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/94/UE z dnia 22 października 2014 r. w sprawie rozwoju infrastruktury paliw alternatywnych. Nowe przepisy wejdą w życie 13 kwietnia 2024 r. Rozporządzenie to stanowi element pakietu *Fit for 55* i określa konkretne etapy tworzenia infrastruktury ładowania pojazdów alternatywnych, w tym zasilanych wodorem. Wskazuje, że powinny być to stacje ładowania energią elektryczną pojazdów drogowych BEV oraz jednostek pływających w portach i samolotów na lotniskach, tankowania pojazdów drogowych FCEV wodorem, tankowania pojazdów drogowych skroplonym metanem. Za punkt wyjścia w tym rozporządzeniu przyjęto Transeuropejską sieć transportową TEN-T, która jest uznawana za sieć kompleksową i obejmuje główne autostrady transeuropejskie oraz 424 węzły miejskie. Przyjęto że do 2030 roku na drogach głównych sieci bazowej TEN-T będzie przynajmniej 1 punkt tankowania wodoru w węźle miejskim co 200 km. Minimalna przepustowość (efektywność punktu) powinna wynosić 1 t wodoru dziennie pod ciśnieniem 700 bar. Poza tym infrastruktura tankowania wodoru powinna umożliwiać doraźne tankowanie, płatność

elektroniczną i jasno informować o wariantach płatności. Oznacza to, że w Polsce do 2030 roku musi powstać w sumie 49 stacji tankowania wodoru – 30 stacji w węzłach miejskich i 19 stacji przy drogach sieci bazowej TEN-T. Stanowi to duże wyzwanie dla polskiej gospodarki wodorowej.

Uwzględniając poziom rozwoju dostępnych technologii transportu wodoru, wymagania regulacyjne i uwarunkowania rynkowe (relacje popytu i podaży na rynku wodoru, średni koszt transportu 1 kg wodoru w zależności od metody transportu) można sformułować następujące wnioski i zalecenia dla tego ogniwa łańcucha wartości gospodarki wodorowej w Polsce:

- niedostateczna podaż wodoru dla potrzeb krajowego popytu na to źródło energii i niemożność zapewniania samowystarczalności w tym zakresie podczas transformacji sektora gazowego, przy niedostatecznych ilości odnawialnych źródeł energii wymusi określenie przez państwo rozmiarów niezbędnego importu wodoru i możliwych jego kierunków,
- niezbędne będą odpowiednie plany rozwoju sieci infrastruktury portowej w związku z potrzebami przyszłego transportu morskiego wodoru oraz jego derywatów; wcześniej trzeba będzie określić krajowe potrzeby w zakresie obecnego i prognozowanego wykorzystania wodoru, co bezpośrednio wpłynie nie tylko na wielkość dostaw, ale też na wybór środka transportu przy imporcie wodoru ze względu na możliwość bezpośredniego wykorzystania derywatu w niektórych sektorach gospodarki (np. rafineryjnym, petrochemicznym, nawozowym);
- zaleca się stworzenie dedykowanego systemu wsparcia dla importu zielonego wodoru i jego pochodnych, a jako przykład dobrej praktyki w tym zakresie wskazuje się rozwiązanie stosowane przez Niemcy (platforma H2Global) oraz Niderlandy;
- retrofiting sieci gazowych i przekształcanie ich w sieci wodorowe, pomimo największej atrakcyjności kosztowej, mogą być ograniczone z powodu konieczności dostosowania infrastruktury u odbiorców umożliwiających wykorzystanie wodoru,
- barierą w transporcie wodoru może stać jego dystrybucja do odbiorcy końcowego, co będzie uwarunkowane wysokością kosztów dystrybucyjnych; ich obniżenie może nastąpić dzięki tworzeniu lokalnych centrów bilansujących zapotrzebowanie ze zdolnościami wytwórczymi;

- na obniżenie kosztów dystrybucji i zmniejszenie ceny wodoru u odbiorcy końcowego wodoru powinno pozytywnie wpłynąć funkcjonowanie dolin wodorowych; przyczynią się one także do ograniczenia śladu węglowego dostarczanego wodoru.

Zastosowanie wodoru w polskiej gospodarce

Wodór obecnie znajduje zastosowanie w takich sektorach jak: przemysł chemiczny, rafineryjny, petrochemiczny, przemysł stalowy i hutnictwo oraz przemysł spożywczy. Sektor chemiczny wykorzystuje wodór w procesie produkcji nawozów sztucznych (przede wszystkim amoniaku), metanolu, wody utlenionej, a w dalszej kolejności również metanolu, kaprolaktamu (produkcja tworzyw sztucznych) czy alkoholi oxo (produkcja detergentów, rozpuszczalników, plastifikatorów i farb, plastikowych opakowań). Działanie sektora chemicznego opiera się na syntezie amoniaku, co wymaga reakcji między wodorem a azotem. Do produkcji amoniaku jest wykorzystywany przede wszystkim wodór szary, który pochodzi z reformingu parowego gazu ziemnego. W Polsce przemysł chemiczny mógłby znacznie zredukować emisję CO₂ używając mniej emisyjnych rodzajów wodoru (niebieskiego, fioletowego i zielonego). Ekspertiści wskazują, że zastosowanie paliw RFNBO (zielony wodór) i niskoemisyjnych może wpłynąć na istotne ograniczenie emisyjności sektora chemicznego w Polsce (EY, 2023).

33

W przypadku przemysłu rafineryjnego wodór jest wykorzystywany m.in. w procesach usuwania siarki, azotu oraz innych zanieczyszczeń z ropy naftowej i gazu ziemnego. Jest również surowcem w procesie hydrokrakingu, podczas którego stosowany jest do konwersji cięższych frakcji ropy naftowej na lżejsze produkty, takie jak benzyna i oleje napędowe. Do tego procesu wykorzystuje się wodór szary z reformingu parowego gazu ziemnego lub wodór odpadowy z procesów technologicznych. Wodór może być również stosowany w produkcji tzw. paliw syntetycznych jako nowych produktów rafineryjnych (Brodacki i in., 2021; Tchorek in. in., 2023b). W Polsce zastosowanie w procesach rafineryjnych paliw RFNBO i niskoemisyjnego wodoru umożliwiłoby zmniejszenie emisji CO₂ sektora i zmniejszenie podatności jego podmiotów na rosnące ceny uprawnień do emisji.

Przemysł petrochemiczny do produkcji chemikaliów organicznych i polimerów (m.in. nafty, gazu, etanu, LPG, gazu ziemnego) wykorzystuje węglowodory. Jak wskazują Tchorek i in. (2023) zielony wodór może być wykorzystany w petrochemii jako surowiec w krakerach parowych lub nośnik energii w procesach wysokotemperaturowych (np. palnik krakera), zmniejszając emisyjność tego procesu. Sugerują, że podczas produkcji chemikaliów organicznych będzie można używać odnawialny metanol (forma wodoru). Poza tym sektor petrochemiczny mógłby wykorzystywać także paliwa niskoemisyjne uzyskiwane z wodoru odpadowego z zastosowaniem technologii CCS. Global Hydrogen Council wskazuje, że globalne wykorzystanie odnawialnego wodoru w sektorze petrochemicznym może doprowadzić do redukcji emisji CO₂ o co najmniej 30% do 2050 r. (Global Hydrogen Council, 2017). Tym samym również w Polsce można oczekiwać redukcji emisji CO₂ po zwiększeniu wykorzystania paliw RFNBO.

Współcześnie wodór ma również zastosowanie w metalurgii, szczególnie przy produkcji stali. Chcąc zmniejszyć emisyjność sektora hutniczego należałoby zastosować paliwa RFNBO. Proces wzbogacania rud żelaza wodorową redukcją stanowi potencjalną alternatywę dla tradycyjnych metod, co może przyczynić się do zmniejszenia emisji CO₂ o 70-90% w porównaniu z konwencjonalnymi procesami produkcji stali (EC, 2018).

W przemyśle spożywczym używa się wodoru do procesów przemysłowej produkcji żywności oraz jako gazu opakowaniowego. Stosuje się go m.in. do hydrogenacji tłuszczów roślinnych, która umożliwia stworzenie tłuszczów stałych o określonych właściwościach, takich jak margaryna czy tłuszcze do smażenia. Proces ten pozwala na uzyskanie produktów o pożądanej konsystencji i dłuższym okresie przydatności do spożycia. Poza tym wodór wykorzystywany jest często jako gaz ochronny w pakowaniu żywności (ochrona produktów spożywczych przed utlenianiem oraz wydłużenie ich trwałości). Stosowany jest też do wydłużenia świeżości niektórych produktów, takich jak mięso i owoce morza (hamowanie wzrostu bakterii).

W przyszłości wodór może być użytkowany w Polsce jako nośnik i magazyn energii, co umożliwi stabilizowanie systemu elektroenergetycznego i jego bilansowanie ,gdy wzrośnie

udział energii odnawialnej w miksie energetycznym. Zadania te będą realizowane przede wszystkim w modelu długoterminowym (sezonowym), a rzadziej krótkoterminowym (godzinowym/dniowym). Konkurencyjną technologią wobec wykorzystywania wodoru w magazynowaniu energii będą systemy bateryjne, zwłaszcza dla potrzeb krótkookresowych.

Kolejnym obszarem wykorzystywania wodoru w Polsce w przyszłości będą takie sektory oparte na jednostkach gazowych jak: energetyka, ciepłownictwo i chłodnictwo. Wymagania regulacyjne w zakresie ograniczenia emisyjności zmuszą jednostki gazowe do stosowania mieszanek z gazem niskoemisyjnym i odnawialnym lub dostosowania ich do pracy z urządzeniami wykorzystującymi technologię CCS.

Oczywistym obszarem zastosowania wodoru w Polskiej gospodarce jest lekki i ciężki transport kołowy, a także transport morski i lotniczy. Obecnie w Polsce testuje się wykorzystanie napędu wodorowego w autobusach komunikacji miejskiej w Poznaniu i Krakowie. Technologie zasilania wodorem małych pojazdów (osobowych lub małych dostawczych) są już opanowane i stopniowo komercjalizowane w innych krajach, np. w Niemczech (taksówki w Hamburgu). Rozwój transportu drogowego opartego na wodorze wymaga budowy infrastruktury tankowania według zaleceń rozporządzenia AFIR.

Komercjalizacja zastosowania paliw RFNBO w przypadku lekkich pojazdów może nastąpić już w 2025 r. Nieco później, bo w latach 2025-2030 sugerowane jest wprowadzenie na rynek technologii zasilania zielonym wodorem ciężkiego transportu kołowego (ciężarówki, autobusy, kolej). Wodór i pochodne stanowią dobre źródło napędu w przypadku długich dystansów, konieczności ciągłej pracy i krótkiego czasu tankowania oraz maksymalizacji dopuszczalnej masy przewożonego ładunku.

W przypadku wykorzystywania wodoru w transporcie morskim i lotniczym eksperci wskazują, że komercjalizacja zastosowania może nastąpić dopiero w latach 2030-2035. Dekarbonizacja tych sektorów gospodarki w średnio- i długoterminowej perspektywie będzie

dokonywana przy użyciu pochodnych wodoru, tzn. odnawialnego amoniaku, odnawialnego metanolu, paliw syntetycznych, np. e-kerozyny.

Analizując potencjalne kierunki zastosowania wodoru w polskiej gospodarce Tchorek z zespołem (Tchorek i in., 2023) sformułowali następujące wnioski i zalecenia:

- niezbędne jest szczegółowe uwzględnienie paliw RFNBO w polityce energetycznej Polski (PEP 2040, KPEiK) jako czynników umożliwiających zmniejszenie emisyjności sektorów trudnych do bezpośredniej elektryfikacji (m.in. przemysł chemiczny, rafineryjny, hutnictwo, transport ciężki, morski, lotniczy).
- najważniejszym czynnikiem zapewnienia opłacalnego wykorzystania paliw RFNBO będzie optymalizacja kosztów pozyskania energii elektrycznej; wymusza to przeprowadzenie liberalizacji rynku energii w Polsce (linia bezpośrednia, rozpowszechnienie umów PPA, ulgi w opłatach regulacyjnych i sieciowych dla dolin wodorowych, magazynowanie energii),
- wsparciem dla zwiększonego zużycia zielonego wodoru będzie polityka UE - jej regulacje stopniowo eliminują z rynku paliwa kopalne i jednocześnie wspierają ich substytucję z zastosowaniem paliw RFNBO,
- odpowiedzią na zwiększone zużycie wodoru musi być większa podaż wodoru niskoemisyjnego i zeroemisyjnego, a to wymaga wprowadzenia regulowanego systemu wsparcia, który będzie pokrywać lukę finansową między kosztem paliwa RFNBO a ceną jego bezpośredniego nośnika referencyjnego (np. gaz ziemny lub olej napędowy); eksperci sugerują, że w pierwszych fazach rozwoju rynku (gdy nie występuje rynek hurtowy), system wsparcia powinien zapewniać łączenie producentów i odbiorców wodoru, co zmniejszy ryzyko braku zbilansowania systemowego;
- wykorzystywanie paliw RFNBO w polskiej gospodarce umożliwi dekarbonizację gospodarki polskiej i zmniejszenie ekspozycji Polski na EU ETS, w tym rosnące ceny uprawnień do emisji CO₂.

Podsumowanie

Polska jest jednym z liderów produkcji wodoru w Europie i na świecie (3. miejsce w Europie i 5. na świecie). Niestety jest to produkcja wodoru szarego, realizowana głównie na potrzeby własne przedsiębiorstw. Wraz z przyspieszeniem budowy zielonej gospodarki w UE również Polska stanęła przed potrzebą rozwoju gospodarki wodorowej w najbliższych latach. Technologie wodorowe w zakresie całego łańcucha wartości gospodarki wodorowej niewątpliwie obecnie stanowią jeden z głównych priorytetów, zapisanych w unijnych i krajowych dokumentach strategicznych. Są też przedmiotem badań i analiz przedstawicieli środowiska naukowego, biznesowego oraz rządów wielu państw. Nadal jednak to obszar o wciąż stosunkowo niskim stopniu rozwoju, którym stoi przed wieloma barierami. Jest to szczególnie widoczne w Polsce. Wśród najważniejszych barier i wyzwań rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce diagnozowanych w ramach badania ankietowego przeprowadzonego w 2023 r. w grupie 34 podmiotów należących do różnych sektorów związanych z jej łańcuchem wartości, ekspertów, przedstawicieli dolin wodorowych wymieniono (Tchorek i in., 2023):

1. w Polsce brak systemowego wsparcia dedykowanego dla wodoru odnawialnego i pochodnych (pokrycie luki finansowej, długoterminowy off-take),
2. utrudnienia związane z brakiem odpowiednio rozwiniętego i uregulowanego systemu elektroenergetycznego w Polsce (m.in. brak przepisów dla linii bezpośredniej, ubogi rynek PPA, wysoce emisyjny miks energetyczny, problemy sieciowe i przyłączeniowe OZE),
3. brak infrastruktury przesyłowej, dystrybucyjnej, magazynowej i terminalowej, co utrudnia stworzenie płynnego rynku hurtowego i łączenie strony popytowej z podażą,
4. brak odpowiednich regulacji w Polsce dedykowanych dla wodoru odnawialnego i pochodnych (trudność w realizacji inwestycji, w szczególności na poziomie administracyjnym i środowiskowym),
5. brak jasno określonej wizji strategicznej w zakresie rozwoju gospodarki wodorowej (aktualizacja PSW, PEP2040, KPEiK pod kątem wodoru).

Choć badani nie wskazali jako bariery rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce luki kompetencyjnej, to należy stwierdzić, że obecnie polskie społeczeństwo i potencjalne kadry tej gospodarki nie są jeszcze przygotowani do uczestniczenia w tak ogromnej zielonej

transformacji. Jak wskazują eksperci PARP „Konieczne jest uwzględnienie potrzeb polskiej gospodarki w obszarze technologii wodorowych w wytycznych Polskiej Ramy Kwalifikacji. Budowa gospodarki wodorowej wymaga silnie wyspecjalizowanej i interdyscyplinarnej wiedzy. Problemem polskiego rynku technologii wodorowych jest brak systemu kształcenia na wszystkich poziomach Polskiej Ramy Kwalifikacji. Znacząco osłabia to potencjał kraju do realizacji przełomowych projektów B+R, bowiem specjaliści w dużej mierze muszą uczyć się „na żywym organizmie”, tj. podczas samej realizacji prac projektowych.” (PARP, 2022, s. 194).

Bibliografia

1. Antas Ł., Bocian M., Bajek M., Giers M., Bijoś K. (2021). *Wodór w Europie Środkowo-Wschodniej. Perspektywy rozwoju w krajach Grupy Wyszehradzkiej i na Ukrainie*, Esperis, Warszawa.
2. ARP. S.A. (2024). *Doliny wodorowe*, <https://arp.pl/pl/jak-dzialamy/transformacja-energetyczna-doliny-wodorowe/>
3. Brodacki D., Gajowiecki J., Hajduk R., Kocejko P., Kowalski S., Mataczyńska E., Miętkiewicz R., Nowakowski R., Plaskiewicz N., Ruszel M., Sienkiweicz M., Skwierz S., Turowski P., Witkowska A. (2021). *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.
4. de Jongh P.E., Adelhelm Ph. (2010). *Nanosizing and Nanoconfinement: New Strategies*
5. EC. (2018). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE, THE COMMITTEE OF THE REGIONS AND THE EUROPEAN INVESTMENT BANK A Clean Planet for all A European strategic long-term vision for a prosperous, modern, competitive and climate neutral economy, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52018DC0773>
6. EC. (2019). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. The European Green Deal, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52019DC0640>.
7. EC. (2020). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. A hydrogen strategy for a climate-neutral Europe, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0301>.
8. EC. (2021). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS EMPT. 'Fit for 55': delivering the EU's 2030 Climate Target on the way to climate neutrality, Brussels, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN-PL/TXT/?from=EN&uri=CELEX%3A52021DC0550>.
9. EC. (2022). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE EUROPEAN COUNCIL, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS. REPowerEU: Joint European Action for more affordable, secure and sustainable energy, COM(2022) 108 final, Brussels, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/HTML/?uri=CELEX:52022DC0108>
10. Elżbieciak T. (2023). *Jakie elektrolizery wyprodukują zielony wodór w Polsce?*, Wysokie Napięcie.pl, <https://wysokienapiecie.pl/82287-elektrolizery-wyprodukują-wodór-w-polsce/>
11. EY. (2023). *Zielony wodór- rewolucja czy przejściowa moda? Szanse i wyzwania dla polskiej gospodarki*, Warszawa.

12. Folentarska A., Kulawik D., Ciesielski W., Pavlyuk V. (2016). Nowoczesne materiały do przechowywania wodoru jako paliwa przyszłości, *Chemistry. Environment. Biotechnology*, nr 19, s. 125–130.
13. Global Hydrogen Council (2017). Hydrogen Scaling Up: A Sustainable Pathway for the Global Energy Transition, <https://www.h2knowledgecentre.com/content/policypaper1201>
14. IEA. (2023). Energy Technology Perspectives, <https://www.iea.org/reports/energy-technology-perspectives-2023>
15. Komorowska A., Mokrzycki E., Gawlik L. (2023). Hydrogen production in Poland – the current state and directions of development, *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, 26(4), pp. 81-98, <https://doi.org/10.33223/ejp/170913>
16. Kozikowski S., Szymlek K. (2022). Wodór – zielone złoto. Bezpieczne magazynowanie, *Elektroinstalator*, nr 9, s. 14-21.
17. Kryczka D. (red.). (2021). Rozwój gospodarki wodorowej w UE i państwach członkowskich – środowisko regulacyjne i finansowe, *ESPERIS, UN Global Compact*, Warszawa.
18. Łącka I. (2023). The Role of Green Energy in the Economic Growth of the World, in: Bąk I., Cheba K., *Green Energy. Meta-analysis of the Research Results*, Springer, Cham, pp. 41-57.
19. Łącka I., Wojdyła P. (2022). Transformacja energetyczna w cieniu wojny. Finansowanie ze środków unijnych szansą na rozwój technologii wodorowych w Polsce, *Chemia Przemysłowa, Zeszyt 2*, s. 80-88.
20. Łańcuch wartości gospodarki wodorowej w Polsce. (2023). CIRE.pl, <https://www.cire.pl/artykuly/serwis-informacyjny-cire-24/lancuch-wartosci-gospodarki-wodorowej-w-polsce>.
21. Mierwiński R. (2022). Zielone strony biznesu. Wodór na ratunek energetyki, <https://mycompanypolska.pl/artikul/zielone-strony-biznesu-wodor-na-ratunek-energetyki/8304> (dostęp: 12.03.2024).
22. Mohan M., Sharma V.K., Kumar E.A., Gayathri V. (2018). Hydrogen storage in carbon materials—A review, *Energy Storage*, 1:e35, DOI: 10.1002/est2.35.
23. Monitor Polski z dnia 7 grudnia 2021 r., poz. 1138. (2021). Polska strategia wodorowa do roku 20230 z perspektywą do 2040 r. Załącznik do uchwały Rady Ministrów z dnia 2 listopada 2021 (poz. 1138).
24. PARP. (2022). Mapa rozwoju rynku i technologii dla obszaru technologii wodorowych, Warszawa.
25. Pilszyk, M., Juszczak, A., Gonera, Ł. (2023), Wyścig po wodór. Państwa i ich strategie wodorowe, *Policy Paper*, nr 5, Polski Instytut Ekonomiczny, Warszawa.
26. Siekierski M., Majewska K., Mroczkowska-Szerszeń M. (2023). Metody efektywnego i bezpiecznego magazynowania wodoru jako warunek powszechnego jego wykorzystania w transporcie i energetyce, *Nafta-Gaz*, nr 2, s. 114-130.
27. Smoleń M., Żelisko W. (2023). International Dimension of the Polish Hydrogen Strategy: Conditions and Potential for Future Development, *RIFS Discussion Paper*, June 2023, <https://doi.org/10.48481/rifs.2023.019>
28. Sobolewski M. (2022). Gospodarka wodorowa. *Infos*, nr 6(298).
29. Tchorek G. (2022). Rewolucja wodorowa - jak skorzystać?, *Webinarium PARP*, Warszawa 18.10.2022 r., https://www.parp.gov.pl/attachments/article/83293/webinarium_18102022_wodor.pdf

30. Tchorek G., Targowski F., Mikusek P., Grzybowski M., Kupecki J., Hercog J., Skrzypkiewicz M., Niemczyk A., Błesznowski M., Wierzbicki M. (2023a). Łańcuch wartości gospodarki wodorowej w Polsce. Raport, Uniwersytet Warszawski, Instytut Energetyki, Warszawa.
31. Tchorek G., Targowski F., Mikusek P., Grzybowski M., Kupecki J., Hercog J., Skrzypkiewicz M., Niemczyk A., Błesznowski M., Wierzbicki M. (2023b). Łańcuch wartości gospodarki wodorowej w Polsce. Skróć raportu, Uniwersytet Warszawski, Instytut Energetyki, Warszawa.
32. THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. (2023). REGULATION (EU) 2023/1804 OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 13 September 2023 on the deployment of alternative fuels infrastructure, and repealing Directive 2014/94/EU, <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:32023R1804>
- Towards Meeting Hydrogen Storage Goals, ChemSusChem, No. 3, pp. 1332–1348.
33. UN. 2015. Transforming our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development, Geneva, <https://sdgs.un.org/publications/transforming-our-world-2030-agenda-sustainable-development-17981>
34. VIII posiedzenie Rady Koordynacyjnej ds. Gospodarki Wodorowej. (2024), <https://www.gov.pl/web/klimat/viii-posiedzenie-rady-koordynacyjnej-ds-gospodarki-wodorowej>.
35. Wyszowski K., Piwowarek Z., Nowakowska M., Pałejko Z., Kryczka D. (2022). Prawo wodorowe – środowisko regulacyjne wspierające rozwój gospodarki wodorowej, UN Global Compact, Warszawa.

Wszystkie rezultaty wypracowane w ramach niniejszego projektu udostępniane są na zasadzie otwartych licencji (CC BY-SA 4.0 DEED). Można z nich korzystać bezpłatnie i bez ograniczeń. Kopiowanie lub przetwarzanie tych materiałów w całości lub w części bez zgody autora jest zabronione. W przypadku wykorzystania rezultatów niezbędne jest podanie źródła finansowania oraz jego autorów.