

# WODÓR W ENERGETYCE



**prof. dr hab. inż.  
Tadeusz Chmielniak**

Autor i współautor ponad 330 prac naukowych, w tym kilkunastu monografii i książek poświęconych istotnym problemom rozwoju energetyki. W latach 2010–2018 był przewodniczącym Komitetu Problemów Energetyki PAN. Członek rzeczywisty PAN oraz wielu rad naukowych i komitetów redakcyjnych czasopism naukowych. [tadeusz.chmielniak@polsl.pl](mailto:tadeusz.chmielniak@polsl.pl)

## Czy i jakie technologie? Czyli wszystko, co trzeba wiedzieć o nowym globalnym źródle energii.

**Tadeusz Chmielniak**

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki  
Politechniki Śląskiej w Gliwicach

**C**ały system energetyczny podlega istotnym zmianom technologicznym. Dotyczy to wszystkich jego podstawowych modułów (podsystemów). Począwszy od struktury wykorzystywanej energii pierwotnej (miks paliw kopalnych, jądrowych i źródeł energii odnawialnej), przez technologie jej konwersji do końcowych użytkowych w postaci energii (elektryczności, ciepła, nowych paliw, chłodu, energii mechanicznej), a skończywszy na technologiach jej przesyłu, rozdziału i użytkowania u odbiorców końcowych. Kryteria optymalizacyjne procesu transformacji obok podstawowych techniczno-ekonomicznych

(sprawności, kosztów wytwarzania) powinny spełniać funkcje wynikające z wyzwań ekologicznych (ochrony klimatu, zmniejszenia zanieczyszczeń atmosfery, ochrony zasobów paliwowych i innych).

## Obecna polityka klimatyczna Unii Europejskiej

Konsekwencją porozumienia paryskiego (COP 21, Paryż 2015), wskazującego na konieczność ograniczenia w obecnym stuleciu globalnego ocieplenia w granicach 2 st. C (z dążeniem do 1,5 st. C) powyżej poziomu sprzed epoki przemysłowej, było zaplanowanie odpowiednich przedsięwzięć zapewniających dekarbonizację przemysłu i transportu oraz osiągnięcie przez UE neutralności klimatycznej do 2050 roku. Przypomnijmy, że UE przyjęła następujące cele: redukcję gazów cieplarnianych o co najmniej 20 proc. (2020), 40 proc. (2030), 80 proc. (2050) w porównaniu z poziomami



WIRESTOCK CREATORS/SHUTTERSTOCK.COM

z 1990 roku oraz osiągnięcie co najmniej 32-proc. udziału źródeł odnawialnych w zużyciu finalnym energii brutto, a także wzrost efektywności energetycznej o 32,5 proc. i ukończenie budowy wewnętrznego rynku energii UE. Na posiedzeniu z 10 i 11 grudnia 2020 roku Rada Europejska zatwierdziła nowy cel UE, zakładający ograniczenie w UE emisji netto gazów cieplarnianych do 2030 roku o co najmniej 55 proc. w porównaniu z poziomem z 1990 roku. Wezwała przy tym swoich członków do uwzględnienia tego nowego celu we wniosku dotyczącym europejskiego prawa o klimacie i do jego szybkiego przyjęcia. Fakt ten stanowi istotne wyzwanie dla wszystkich krajów Unii, dla Polski w szczególności. Złożoność tego wyzwania jest dodatkowo pogłębiona koniecznością utrzymania dostatecznego bezpieczeństwa systemu energetycznego, w którym rośnie udział mocy źródeł odnawialnych z natury rzeczy mających charakter źródeł losowych.

## Rola wodoru

W poszukiwaniach racjonalnych rozwiązań tego problemu intensywnie dyskutuje się o roli wodoru w procesach dekarbonizacji gospodarki i transportu, w decentralizacji wysokosprawnego wytwarzania i zasilania w finalne postacie energii, a także w inicjacji zmian

w wielu gałęziach przemysłu. Powszechnie dziś mówimy o gospodarce wodorowej lub w węższym niecosensie – o energetyce wodorowej. Pod tym pojęciem rozumiemy zespół procesów i modułów technologicznych obejmujących etap wytwarzania wodoru (wodór nie jest paliwem czerpalnym wprost z zasobów przyrody), jego magazynowania, transportu i konwersji do pożądaných postaci energii (głównie elektryczności i energii mechanicznej oraz nowych paliw). Wszystkie z nich są istotne dla końcowej efektywności techniczno-ekonomicznej i ekologicznej. Szczegółowiej rzecz biorąc, z energetyką (gospodarką) wodorową identyfikuje się następujące obszary, w których konieczne jest poszukiwanie rozwiązań techniczno-ekonomicznych, ekologicznych i społeczno-organizacyjnych:

- wytwarzanie wodoru z różnych nośników energii, w tym z węgla i innych paliw węglowodorowych oraz energii jądrowej,
- nowe technologie wytwarzania wodoru z odnawialną energią napędową: elektrolityczne, termicznego rozkładu wody (takie jak termoliza, cykliczne procesy termochemiczne, hybrydowe termochemiczne procesy rozkładu), fotokatalityczne,
- wodór jako paliwo napędowe środków transportu,

- wysokosprawne ogniwa paliwowe,
- systemowy wpływ wodoru na strukturę technologiczną i sposób zarządzania energetyką oraz na zmianę infrastruktury przemysłowej – integracja energetycznych technologii wodorowych z energetyką wielkoskalową paliw węglowodorowych,
- społeczno-polityczne warunki bezpieczeństwa inwestycyjnego w gospodarce wodorowej.

## Perspektywy

Obserwujemy ciągle wzrost zapotrzebowania na wodór. Między 1975 a 2018 rokiem jego zużycie na świecie wzrosło z mniej więcej 29 mln do 115 mln t rocznie. Należy oczekiwać, że w związku z powstaniem nowych obszarów zastosowania wodoru (np. w transporcie) będzie intensywnie wzrastała jego produkcja. Po stronie substratów (2018) w dedykowanej produkcji czystego wodoru (73 mln t) największy udział miał gaz ziemny (196 Mtoe, toe – tona oleju ekwiwalentnego =  $41,86 \cdot 10^9$  J), następnie węgiel (75 Mtoe), inne to ropa (2 Mtoe) i elektryczność (2 Mtoe). Pozostałe zapotrzebowanie na wodór pokrywa produkcja w procesach, w których ten gaz jest produktem ubocznym. Wodór jest głównie wykorzystywany do produkcji amoniaku, metanolu i w procesach rafinacji.

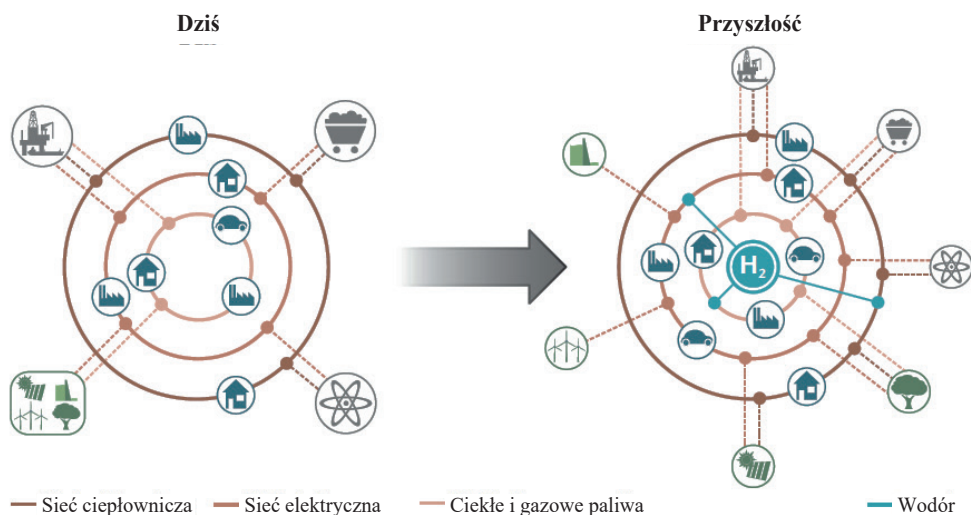
Współcześnie przekonanie o istotnej roli wodoru w transformacji energetyki jest powszechne. Potwierdzeniem jest wiele przeprowadzonych studiów, analiz i programów opracowywanych w wielu krajach. Według scenariusza przedstawionego w *Hydrogen scaling up. A sustainable pathway for the global energy transition* udział wodoru w końcowym zapotrzebowaniu na energię w 2050 roku będzie wynosić 18 proc., umożliwiając eliminację emisji 6 Gt dwutlenku węgla przez zastosowanie odpowiednich technologii jego utylizacji w różnych działach gospodarki i transportu (rys. 1, 2). Dynamika upowszechnienia technologii

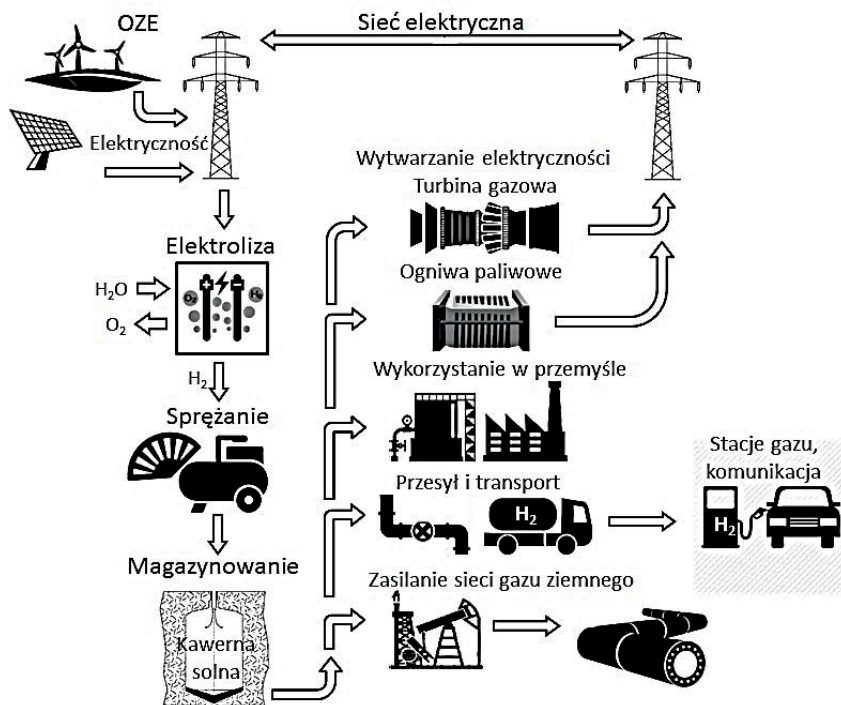
wodorowych według rozpatrywanego scenariusza będzie największa w dekadzie 2040–2050. Między 2015 a 2050 rokiem roczne zapotrzebowanie na energię z wodoru powinno wzrosnąć mniej więcej 10-krotnie – z 8 do 78 EJ, a między 2040 a 2050 rokiem przewidziano wzrost z 28 do 78 EJ (1 Eksadżul  $\approx$  277,8 TWh). Struktura technologiczna wykorzystania wodoru w 2050 roku obejmuje zużycie 10 EJ w obszarach gospodarki, w których jest wykorzystywany obecnie, 9 EJ w nowych procesach przemysłowych (CCU, bezpośrednia redukcja rudy żelaza – DRI), 11 EJ w gospodarce komunalnej i mieszkalnictwie, 16 EJ w przemysłowej gospodarce energetycznej, 22 EJ w transporcie i 9 EJ w procesach wytwarzania elektryczności (takich jak buforowanie, rezerwa strategiczna, magazynowanie). Wskazuje to na duży potencjał technologii wodorowych w dekarbonizacji transportu i doskonaleniu procesów przemysłowych. Wszystkie scenariusze są optymistyczne, należy je traktować jako określenie możliwego potencjału. Wynika z nich także, że czas transformacji może obejmować całe dekady. Wprowadzenie bowiem do systemu energetycznego (gospodarczego) wodoru komplikuje system (rys. 1, 2), wymaga wprowadzenia nowych technologii, w tym technologii magazynowania energii i technologii informatycznych optymalizujących funkcje systemu z dużym udziałem źródeł odnawialnych o losowym charakterze generacji elektryczności.

## Technologie

Rozwój technologii wodorowych i globalnego, zrównoważonego systemu energetycznego wykorzystującego wodór daje realną możliwość rozwiązania trzech głównych wyzwań stojących przed energetyką światową. Należą do nich: konieczność zaspokojenia rosnącego zapotrzebowania na czyste paliwa gazowe, ciekłe i energię elektryczną; konieczność wzrostu efektywności produkcji paliw i energii oraz minimalizacja

Rys. 1  
Zmiana struktury systemu gospodarczego spowodowana wprowadzeniem wodoru (na podstawie *Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells*, Paryż 2015)





Rys. 2  
Moduły gospodarki wodorowej (na podstawie T. Chmielniak, T.M. Chmielniak, *Energetyka wodorowa*, Warszawa 2020)

emisji szkodliwych substancji do atmosfery, w tym emisji gazów cieplarnianych, na końcowym etapie wykorzystania energii.

Rozwijane technologie grupuje się zwykle według schematów: elektryczność – elektryczność (*power to power*), elektryczność – gaz (*power to gas*: mieszanina  $H_2 + CH_4$ , metanizacja), elektryczność – paliwa ciekłe (*power to liquid*). Są to ścieżki charakterystyczne dla generacji wodoru ze źródeł odnawialnych i jego konwersji do innych postaci energii. Nie wyczerpują one wszystkich możliwości organizacji gospodarki wodorowej. Istnieją bowiem rozwiązania wykorzystania niskoemisyjnych technologii paliw kopalnych (węgla i gazu z separacją dwutlenku węgla) i jądrowych, które mogą okazać się konkurencyjne z technologiami źródeł odnawialnych (w zależności od ich stadiów rozwoju). Powinny one być wzięte pod uwagę w poszukiwaniu optymalnej ścieżki rozwoju technologii wodorowych oraz ich wykorzystania w całej gospodarce i energetyce dla przyjętych kryteriów ekonomicznych i ograniczeń ekologicznych. W dalszej perspektywie główną technologią będzie zapewne rozkład wody na wodór i tlen oraz generacja wodoru w procesach konwersji biomasy i odpadów.

Na skalę przemysłową wodór jest produkowany współcześnie głównie z gazu ziemnego przy wykorzystaniu procesu parowego reformingu metanu (SMR – *steam methane reforming*), który jest obecnie najtańszą opcją produkcji wodoru. Ponadto do komercyjnie dostępnych technologii produkcji wodoru z gazu ziemnego należą: proces częściowego utleniania (POX – *partial oxidation*, lub CPOX – *catalitical partial oxidation*), łączący oba powyższe, reforming autotermiczny (ATR – *autothermal reforming*), katalizy-

tyczna dehydrogenacja, piroliza, elektroliza. W różnym stadium rozwoju są: procesy fotokatalityczne, reforming plazmowy, reaktory membranowe, procesy biologiczne.

Jest dostępnych wiele technologii rozkładu wody w stanie ciekłym lub gazowym na wodór i tlen. Różnią się między sobą rodzajem energii napędowej, a także jej źródłem pochodzenia oraz parametrami i organizacją procesów głównych i pomocniczych. Ogólnie rzecz biorąc, wyróżniamy metody: elektrolityczne, termicznego rozkładu wody (termolizę, cykliczne procesy termochemiczne, hybrydowe termochemiczne procesy rozkładu), fotokatalityczne. W metodach elektrolitycznych głównym rodzajem energii doprowadzonej do procesu jest energia elektryczna (źródło zewnętrzne prądu stałego), w grupie metod termicznego rozkładu energią napędową jest ciepło (zazwyczaj wysokotemperaturowe), z kolei dla metod grupy trzeciej źródłem jest promieniowanie elektromagnetyczne Słońca. Stan zaawansowania poszczególnych grup technologii jest różny. Stan dojrzałości wdrożeniowej w skali przemysłowej osiągnęły metody elektrolityczne wykorzystujące dwa typy elektrolizerów (elektrolizery alkaliczne – średnotemperaturowe, elektrolizery z membraną protonowymienną – niskotemperaturowe). W badaniach pilotowych są elektrolizery z membraną tlenkową (wysokotemperaturowe). W grupie metod termicznego rozkładu wody są analizowane procesy bezpośredniej termicznej dysocjacji wody (temperatura procesu około 2500 st. C), cykliczne procesy termochemiczne i procesy hybrydowe wykorzystujące różne sposoby konwersji (np. elektrolizę z konwersją chemiczną). Znanych jest co najmniej 300 procesów termochemicznych i hybrydowych, które mogą być

realizowane w różnych temperaturach. W ich selekcji dąży się do jak najniższej temperatury i efektywności procesowej. Są często rozpatrywane w kontekście wykorzystania jako źródła ciepła jądrowych reaktorów wysokotemperaturowych i energii słonecznej. Dużo uwagi poświęca się obecnie procesom: siarka – jod i miedź – chlor. Sprawność procesu elektrolizy jest stosunkowo wysoka i wynosi:

- elektrolizery alkaliczne (2018: 63–70 proc., 2030: 65–71 proc., po 2030: 70–80 proc.);
- elektrolizery polimerowe (2018: 56–60 proc., 2030: 63–68 proc., po 2030: 67–74 proc.);
- elektrolizery tlenkowe (2018: 74–81 proc., 2030: 77–84 proc., po 2030: 77–90 proc.).

## Koszty

Koszty wytwarzania wodoru z paliw kopalnych i biomasy potwierdzają fakt największej efektywności termodynamicznej i ekonomicznej technologii reformingu parowego gazu i ropy naftowej. Doskonalenie tej klasy metod wytwarzania wodoru powinno obok zwiększenia efektywności ekonomicznej obejmować redukcję emisji dwutlenku węgla z procesów wytwarzania. Zróżnicowanie kosztów wytwarzania wodoru zależy od regionów geograficznych i krajów oraz zastosowania albo niezastosowania w procesach wytwarzania CCUS (*carbon capture utilisation and storage*). Zróżnicowanie geograficzne wynika głównie z faktu, że głównym składnikiem kosztu jest cena dostępnego paliwa – substratu. I tak np. cena wodoru z reformingu gazu ziemnego bez instalacji CCUS w USA jest równa około 1 USD/kg H<sub>2</sub>, po zastosowaniu wychwytu dwutlenku węgla wzrasta do 1,5 USD/kg H<sub>2</sub>. Odpowiednie ceny dla UE są równe: 1,7 USD/kg H<sub>2</sub> i 2,35 USD/kg H<sub>2</sub>. Dla Chin można przyjąć: 1,75 USD/kg H<sub>2</sub> i 2,4 USD/kg H<sub>2</sub>. W wypadku Rosji i krajów Środkowego Wschodu ceny są porównywalne do cen w USA. Koszty inwestycyjne mieszczą

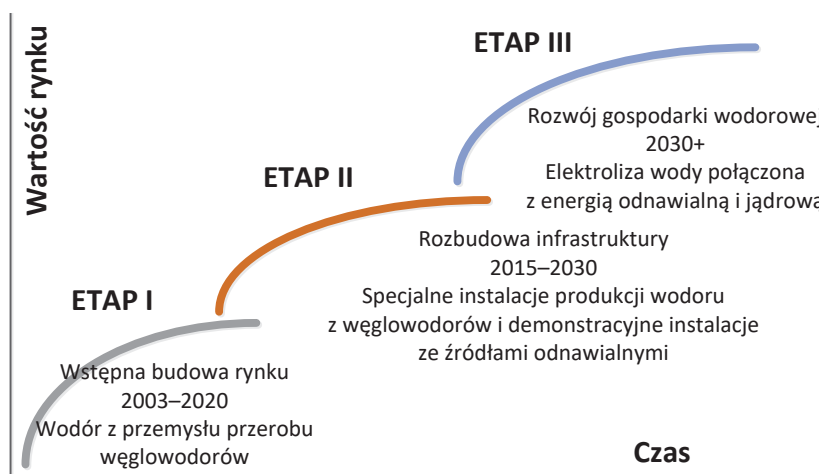
się w granicach 500–900 USD/kW<sub>H<sub>2</sub></sub> dla układów bez CCUS i 900–1600 USD/kW<sub>H<sub>2</sub></sub> dla CCUS. W Polsce cena generacji wodoru drogą reformingu parowego wynosi około 7 zł za 1 kg wodoru przy cenie gazu 1200 zł za 1000 m<sup>3</sup> (bez separacji dwutlenku węgla). Koszt wytwarzania wodoru z węgla zależy od zastosowanej technologii zgazowania, ceny surowca, stosowania lub niestosowania procesu separacji dwutlenku węgla w procesie zgazowania. Dostępne źródła podają wartości z przedziału 0,71–3,13 USD/kg H<sub>2</sub>. Dane z rynku chińskiego i amerykańskiego to wartości: 1,1–1,34 USD/kg H<sub>2</sub> w przypadku bez sekwestracji CO<sub>2</sub> i 1,47–1,63 USD/kg H<sub>2</sub> z sekwestracją dwutlenku węgla. Z polskich analiz przeprowadzanych dla różnych instalacji zgazowania węgla koszt dla układu bez separacji CO<sub>2</sub> wynosi 5,5–6,5 zł/kg H<sub>2</sub>. Jest on porównywany z reformingiem parowym przy cenie gazu z przedziału 930–1100 zł/1000 m<sup>3</sup>.

Koszty wytwarzania wodoru w procesach elektrolizy i termolizy są oceniane pod kątem kosztów poszczególnych modułów instalacji. Trudno je zwerifikować praktycznie ze względu na brak wyników eksploatacji instalacji dużych mocy. W 2019 roku moc pracujących elektrolizerów alkalicznych przekraczała 45 MW, a moc elektrolizerów typu PEM 38 MW (tej klasie elektrolizerów towarzyszy w ostatnim okresie największe zainteresowanie). Sumaryczna moc instalacji z elektrolizerami SOEC (*solid oxide electrolysis cell*) nie sięgnęła 1 MW. Łączna liczba instalacji przekroczyła wartość 180. Średnia moc pojedynczej instalacji uruchamianej w latach 2015–2018 wynosiła około 1 MW. Prowadzone są liczne studia możliwości budowy instalacji o mocach 5 i 100 MW wykorzystujących stopy elektrolizerów alkalicznych i PEM (w Australii jest przygotowywana budowa układu produkcji wodoru zintegrowanego z farmą wiatrową i solarną o łącznej mocy 400 MW. Instalacja będzie zdolna produkować przez elektrolizę wody około 20 t wodoru dziennie. Jednym z kierunków zastosowania

Energia z wodoru  
zastosowana  
w gospodarstwie domowym



ALEXANDER KIRCH/SHUTTERSTOCK.COM



Rys. 3  
Możliwe scenariusze rozwoju gospodarki wodorowej (na podstawie: M. Ściążko, A. Sobolewski, W. Nowak, *Bezemisyjna przyszłość energetyki*, „Energetyka Ciepła i Zawodowa”, 5/2018)

tego gazu jest produkcja amoniaku jako magazynu energii i ewentualnie paliwa, znaczną część przeznaczając się na eksport, w szczególności do Japonii).

Wykorzystując wyniki uzyskane w badaniach instalacji demonstracyjnych i zakładając wysoki stopień upowszechnienia tej klasy technologii, ocenia się, że w 2030 roku koszt generacji wodoru drogą elektrolizy zasilanej elektrycznością z sieci będzie w Europie wynosić 4,84 USD/kg H<sub>2</sub> (koszt emisji CO<sub>2</sub> 40 USD/t CO<sub>2</sub>), w przypadku wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych 2,87 USD/kg H<sub>2</sub> (koszt energii odnawialnej 40 USD/MWh). Konkurencyjność w porównaniu z reformingiem parowym gazu ziemnego mogłaby zostać osiągnięta przy cenie elektryczności mniejszej niż 40 USD/MWh i przy cenie uprawnień około 50 USD/t CO<sub>2</sub>. Obecnie koszt wytwarzania jest wysoki, co wymaga wysiłków w doskonaleniu wszystkich modułów jego wytwarzania i konsekwencji w polityce klimatycznej.

Ważnym wyróżnikiem poszczególnych technologii generacji wodoru jest towarzysząca jej emisja dwutlenku węgla. Odnawialnej energii napędowej odpowiada zerowa emisja (tzw. wodór zielony). Wodór szary to wodór generowany w procesach, w których są wykorzystywane paliwa kopalne (zgazowanie węgla to emisja około 20 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>, reforming gazu ziemnego – około 9 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>). Mówimy także o wodorze niebieskim (błękitnym). Powstaje on w technologiach wykorzystujących nieodnawialne źródła energii i surowce, ale z zastosowaniem CCUS (zgazowanie węgla z CCUS – około 2 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>, reforming gazu ziemnego – około 1 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>, dane ważne dla wychwytu 90 proc. dwutlenku węgla). Wytwarzanie wodoru w procesach elektrolizy z wykorzystaniem energii elektrycznej z sieci jest obciążone szczególnie wysoką emisją dwutlenku węgla (przy generacji elektryczności w technologiach gazowych emisja wynosi około 18 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>, w generacji węglowej – około 40 kg CO<sub>2</sub>/kg H<sub>2</sub>). Zasadniczo rzecz biorąc, jesteśmy w epoce wodoru szarego.

Dziś trudno rozstrzygnąć, czy technologie wodoru błękitnego zostaną upowszechnione w dużej skali, czy przejdziemy wprost do epoki technologii wodoru zielonego, co gwarantowałoby osiągnięcie celów polityki klimatycznej i neutralności klimatycznej UE po 2050 roku (rys. 3).

## Zastosowanie

Wodór ma potencjał do zastosowań w średniej i długoterminowej perspektywie w energetyce i wielu gałęziach przemysłu (rys. 2). W energetyce istnieje wiele możliwości wykorzystania wodoru i paliw generowanych z tego gazu. W najbliższej przyszłości jest możliwe współspalanie amoniaku w blokach węglowych. Wodór i amoniak mogą być elastyczną opcją paliwową dla ogniw paliwowych i turbin gazowych. Dla małych obciążeń wodór w cenie około 2,5 USD/kg ma duży potencjał konkurencyjny. Główne opcje konkurencyjne to gaz ziemny z CCUS i biogaz. W dłuższej perspektywie wodór może odgrywać dużą rolę w energetyce wielkoskalowej (turbinach wodorowych) i jako nośnik energii w układach magazynowania energii. Dla upowszechnienia technologii energetycznego wykorzystania wodoru ważne znaczenie ma rozwój ogniw paliwowych. Ich konkurencyjność w transporcie zależy od kosztów ogniw oraz od budowy i eksploatacji stacji ładowania wodoru. Dla samochodów podstawowe znaczenie ma obniżenie kosztów ogniw i zbiornika wodoru w samochodzie. To powinno uczynić je konkurencyjnymi w stosunku do baterii i zapewnić zasięg od 400–500 do nawet 1000 km. Dla ciężarówek kluczowe jest obniżenie ceny dostarczania wodoru. Największe możliwości w krótkiej i średniej perspektywie czasowej zwiększenia zużycia wodoru w ciepłownictwie daje domieszanie wodoru do istniejącej infrastruktury gazowej. W 2030 roku przewiduje się zużycie 4 mln ton wodoru domieszkowego. Potencjał jest szczególnie istotny dla budynków wielorodzinnych i gmachów

publicznych. W dłuższej perspektywie w ciepłownictwie należy oczekiwać zastosowania ogniw paliwowych i kotłów wodorowych. Transport, energetyka, gospodarka komunalna mają potencjał wykorzystania wodoru, jeżeli jego koszty produkcji i utylizacji będą mniejsze niż innych opcji.

Skomplikowana materia rozwoju i rozpowszechnienia technologii wodoru sprawia, że dobrze rozumiana polityka wsparcia może mieć podstawowe znaczenie. Konieczne są dalsze przedsięwzięcia mające na celu doskonalenie elektrolizerów i innych metod wytwarzania wodoru. Ważne znaczenie ma poszukiwanie optymalnych układów wykorzystania wodoru i jego magazynowania. Biorąc pod uwagę fakt, że racjonalna energetyka wodorowa w dużej mierze zależy od lokalnego potencjału źródeł odnawialnych (a także od struktury paliwowej energetyki i transportu), konieczne jest opracowanie krajowych programów rozwoju energetyki wodorowej. Wiele krajów opracowało odpowiednie strategie w tym obszarze i na ich podstawie sformułowano programy badawczo-rozwojowe. Konieczny jest wybór kierunków inwestowania w instalacje pilotowe i demonstracyjne.

## Bariery

Rozwój gospodarki wodorowej może istotnie wspomagać uzyskanie stanu neutralności klimatycznej. W procesie transformacji można jednak zidentyfikować wiele wyzwań i barier. Obok wyzwań techniczno-ekonomicznych ciągle nierozwiązanych jest wiele problemów prawnych i logistycznych. Ważną przeszkodą do szybkiego upowszechnienia technologii wodorowych mogą okazać się niedostateczne zasoby surowcowe. Ogólnie rzecz biorąc, bariery i towarzyszące im wyzwania są następujące:

- Wodór jest obecnie prawie w całości wytwarzany z gazu ziemnego i węgla. Mimo zaawansowania technologicznego ta generacja jest odpowiedzialna za duże ilości emisji dwutlenku węgla. Konieczna jest intensyfikacja prac nad stworzeniem technologii produkcji wodoru z wykorzystaniem energii źródeł odnawialnych, a także wychwytu dwutlenku węgla w procesach wykorzystania paliw kopalnych.
- Produkcja wodoru z wykorzystaniem niskoemisyjnej energii napędowej jest obecnie kosztowna. Mimo że cena wodoru wytwarzanego przy użyciu elektryczności ze źródeł odnawialnych może się zmniejszyć w wyniku spadku kosztów energii odnawialnej i zwiększenia skali produkcji wodoru, to dynamika tego procesu może się okazać niewystarczająca dla zwiększenia konkurencyjności tego sposobu generacji wodoru.
- Rozwój infrastruktury wodorowej jest powolny, co nie sprzyja jego upowszechnieniu. Ma to wpływ na ceny wodoru dla konsumentów, które w dużym

stopniu zależą od liczby stacji tankowania i niezawodności dostaw. Rozwiązanie tego problemu wymaga planowania i koordynacji na szczeblu międzynarodowym i poszczególnych krajów, a także zaangażowania samorządów i władz lokalnych oraz instytucji przemysłowych i inwestorów prywatnych. Prace nad prawem wodorowym trwają także w Polsce.

- Obecne przepisy ograniczają rozwój przemysłu czystego wodoru. Konieczne jest m.in. opracowanie wspólnej międzynarodowej normy bezpieczeństwa transportu i przechowywania dużych ilości wodoru oraz śledzenie wpływu różnych technologii dostaw wodoru na środowisko. W UE i w poszczególnych krajach są prowadzone prace nad standardami i rozwiązaniami normowymi dotyczącymi generacji i użytkowania wodoru.
- Na przeszkodzie szybkiego upowszechnienia technologii wodorowych może stanąć wysoka materiałochłonność instalacji odnawialnych źródeł energii (np. dla przewidywanej w 2050 roku instalacji o mocy 25 TW w energetyce wiatrowej trzeba zużyć powyżej 50 mln Mg miedzi – czterokrotną produkcję miedzi w 2010 roku – oraz 3,6 mln Mg neodymu – 180-krotną obecną roczną produkcję, a także dużych ilości innych substancji, w tym cementu i stali). Znacznie wzrastają także potrzeby na metale szlachetne (będące częścią katalizatorów, elektrod, płyt zbiorczych), stal nierdzewną i inne substancje konieczne do budowy elektrolizerów, ogniw paliwowych, rurociągów i kabli. Wskazuje to na konieczność istotnego rozwoju tych gałęzi przemysłu w celu zabezpieczenia koniecznych potrzeb materiałowych dla przewidywanego upowszechnienia gospodarki wodorowej. Za ważne dla Polski z badawczego punktu widzenia można uznać obecnie:
  - identyfikację badań prowadzonych w różnych obszarach energetyki wodorowej i podjęcie próby ich koordynacji (w tym także w celu określenia planów budowy instalacji pilotażowych),
  - opracowanie założeń programu badawczego obejmującego zagadnienia o dużym potencjale aplikacyjnym dla polskich warunków,
  - równoległe prowadzenie studiów nad rolą wodoru w dekarbonizacji transportu (nad produkcją paliw płynnych, stosowaniem ogniw paliwowych w transporcie) i energetyki (nad układami skojarzonymi z ogniwami paliwowymi, turbinami gazowymi, integracją energetyki wiatrowej i słonecznej z technologiami wytwarzania wodoru, technologiami biomasowymi, rolą paliw kopalnych w rozwoju energetyki wodorowej) oraz możliwością i celowością jego metanizacji (tj. konwersją wodoru do metanu) do zasilania sieci gazowniczych. ■

Chcesz wiedzieć więcej?

Chmielniak T., Chmielniak T.M., *Energetyka wodorowa*, Warszawa 2020.

*The Future of Hydrogen*, Paryż 2019, <https://www.iea.org/reports/the-future-of-hydrogen>.

*Hydrogen scaling up. A sustainable pathway for the global energy transition*, 2017, [https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-Scaling-up\\_Hydrogen-Council\\_2017\\_compressed.pdf](https://hydrogencouncil.com/wp-content/uploads/2017/11/Hydrogen-Scaling-up_Hydrogen-Council_2017_compressed.pdf).

*Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells*, Paryż 2015, <https://www.iea.org/reports/technology-roadmap-hydrogen-and-fuel-cells>.

Velazquez Abad A., Dodds P.E., *Green hydrogen characterisation initiatives: Definitions, standards, guarantees of origin, and challenges*, „Energy Policy” 138 (2020) 111300.

Wiśniewski A., *Niezwykły wodór*, „Postępy Fizyki” 2020, t. 71, z. 3, s. 19–25.