



Szymon Jureczka

ORCID <https://orcid.org/0009-0008-6982-4979>

Dominik Jendrzeczyk

ORCID <https://orcid.org/0009-0008-3133-0041>

Grzegorz Szydelko

ORCID <https://orcid.org/0009-0007-0596-7893>

Akademia Nauk Stosowanych w Raciborzu

WODÓR – INFORMACJE I WŁAŚCIWOŚCI PALIWA PRZYSZŁOŚCI

Streszczenie (abstrakt): Wodór to najprostszy z pierwiastków a jednocześnie najobficiej występujący w przyrodzie. Można go otrzymać z paliw kopalnych, biomasy, bądź poprzez elektrolizę wody. Produkcja wodoru ze źródeł odnawialnych i użycie go w ogniwach paliwowych daje nadzieję na czysty transport i uniezależnienie się od eksporterów paliw. Paliwo wodorowe ma potencjał do zrewolucjonizowania transportu, a może nawet zapewnienia państwu bezpieczeństwa energetycznego.

Słowa kluczowe: paliwo wodorowe, magazynowanie energii, ogniwa paliwowe, elektromobilność

HYDROGEN – INFORMATION AND PROPERTIES OF THE FUEL OF THE FUTURE

Abstract: Hydrogen is the simplest of elements and the most abundant in nature. It can be obtained from fossil fuels, biomass or by electrolysis of water. The production of hydrogen from renewable sources and its use in fuel cells gives hope for clean transport and independence from fuel exporters. Hydrogen fuel has the potential to revolutionize transport and maybe even energy security of the Polish state.

Keywords: hydrogen fuel, energy storage, fuel cells, electromobility

Wstęp

Podstawowym warunkiem zastosowania wodoru we wszystkich sektorach jest przejście na gospodarkę niskoemisyjną lub bezemisyjną. Ze względu na ciągłe wysiłki państw na wszystkich kontynentach poszukuje się nowych alternatyw dla rozwoju technologii neutralnych dla klimatu. Unia Europejska postawiła sobie za cel osiągnięcie do 2050 roku całkowitej neutralności klimatycznej, tj. wychwycenia i magazynowania takiej samej ilości emisji gazów cieplarnianych, jaka zostanie uwolniona do atmosfery. Rozwój odnawialnych

źródeł energii stanowi przestrzeń dla stabilizacji niezawodności produkcji energetycznej. Wodór może być wykorzystywany jako nośnik energii, co jest szczególnie istotne dla akumulacji zgodnie z nieoczekiwanymi warunkami sezonowymi, a także dla niektórych zastosowań związanych z mobilnością¹.

Co to jest wodór?

Wodór jest najlżejszym gazowym pierwiastkiem chemicznym. W stanie wolnym jest na Ziemi bardzo rzadki, ale występuje bardzo często w postaci związków chemicznych (np. woda, kwasy, zasady, wszystkie związki organiczne). W stanie wolnym istnieje w postaci cząsteczkowej reprezentowanej przez wzór H_2 . Wodór jest jednym z najobficiej występujących we wszechświecie pierwiastków. Występuje w około 80% atmosfery Słońca i ma znaczną przewagę ilościową nad innymi pierwiastkami. W porównaniu z innymi pierwiastkami jest bezbarwnym, bezwonym i pozbawionym smaku gazem o temperaturze wrzenia 20 K i temperaturze zamarzania 20 K. Jako gaz bardzo aktywny występuje w postaci związków chemicznych. Najbogatszym źródłem wodoru na Ziemi jest woda. Wodór połączony z tlenem, tworząc wodę, nie pali się, natomiast wodór połączony z węglem w węglowodorach reaguje gwałtownie. Wodór gwałtownie reaguje z tlenem, wydzielając ciepło i parę. Wodór i tlen pod względem chemicznym są do siebie podobne. Wodór jest alternatywnym źródłem energii ze względu na jego obfite zasoby i wysoką wartość opałową. W wyniku jego spalania powstaje tylko woda².

Jakie właściwości energetyczne ma wodór?

Wodór jest paliwem bardzo wysokoenergetycznym (33 kWh/kg) i stanowi obecnie bezpośrednią konkurencję zwłaszcza dla technologii akumulatorów. Obecny liderem w technologii baterii wodorowych jest producent samochodów Tesla, którego baterie osiągają gęstość energii na poziomie 250-260Wh/kg. Oznacza to, że wodór ma gęstość energii około 126 razy większą na 1 kilogram. Każda z technologii ma jednak swoje wady. Są nimi niska objętościowa gęstość energii wodoru (3 kWh/m³ w 20°C i 1 a). Przykładowo, całkowita pojemność zbiornika zdolnego do przechowywania 6,3 kg wodoru wynosi 156 litrów (Hyundai Nexo)³.

Jaka jest historia wykorzystania wodoru?

Wodór jest jednym z najstarszych gazów na świecie. Został odkryty przez brytyjskiego naukowca Henry'ego Cavendisha w 1776 roku. Cavendish pracował w czasie, gdy zaczęto wyróżniać różne rodzaje gazów. Wcześniej wszystkie substancje lotne były utożsamiane z powietrzem. Cavendish uzyskał wodór poprzez reakcję metalu z kwasem, a następnie doprowadził do eksplozji mieszaniny wodoru i tlenu w celu wytworzenia cieczy, którą, jak

¹ J. Kupecki, *Podstawowe informacje o wodorze*, https://ien.com.pl/tl_files/pliki/CPE/FAQ_final_PL.pdf [dostęp: 25.04.2022].

² D. Wiącek, *Wodór jako paliwo przyszłości*, „Autobusy – technika, eksploatacja, systemy transportowe” 2011, nr 10, s. 446.

³ J. Kupecki, *Podstawowe..., op. cit.*

odkrył, była woda. Wkrótce po tym odkryciu Antoine Lavoisier rozłożył w Paryżu uzyskaną w ten sam sposób wodę na tlen i wodór. Ten eksperyment był punktem zwrotnym w historii chemii i doprowadził do odrzucenia teorii flogistonu (teoria mechanizmu spalania powstała w XVII wieku, wywodziła się z wcześniejszych koncepcji alchemicznych, zakładała występowanie w ciałach palnych substancji zwanych flogistonem; późniejsze prace eksperymentalne, m. in. Michaiła Łomonosowa i Antoine’a Lavoisiera, wykazały, że jest ona całkowicie błędna). Zawartość wodoru w zewnętrznych strefach Ziemi wynosi 0,44% wag. Na każde 12 atomów przypada jeden atom wodoru. Wolny wodór występuje w niewielkich ilościach w atmosferze ($3 \cdot 10^{-6}$ % wag., $5 \cdot 10^{-5}$ % obj.) oraz w gazach wulkanicznych. Główna zawartość wodoru znajduje się w wodzie morskiej i lądowej, węglowodorach (ropa naftowa, gaz ziemny) oraz we wszystkich związkach organicznych w organizmach żywych. Niestety, w momencie odkrycia wodór nie był powszechnie stosowany w przemyśle, głównie z powodu pojawienia się w XIX i XX wieku tańszych paliw kopalnych. Słowo „wodór” kojarzy się powszechnie z katastrofą sterowca Hindenburg. Choć wodór nadal jest „oskarżany” jako „trzaskający” gaz, to katastrofę spowodowało spięcie elektryczne, które zapaliło wysoce łatwopalny materiał, z którego wykonano kadłub. Do dziś przerażające obrazy wybuchających sterowców budzą strach i podważają różne zastosowania wodoru. Rosnące wykorzystanie wodoru zostało zapoczątkowane przez misje kosmiczne z lat 60-tych, przede wszystkim program Apollo. W tym czasie wodór był głównie wykorzystywany jako paliwo do rakiet kosmicznych. Technologia wodorowych ogniw paliwowych była również wykorzystywana podczas tej misji do wytwarzania energii elektrycznej, ciepła i wody. W Republice Czeskiej wodór był używany jako jeden z głównych składników gazu węglowego, który później został zastąpiony przez gaz ziemny⁴.

Możliwości zastosowania wodoru

Wodór może być także nośnikiem (magazynem) energii. Znajduje szerokie zastosowanie w transporcie, energetyce i przemyśle. W przyszłości wodór będzie pełnił rolę jednego z nośników energii przy stosowaniu tzw. *sector coupling*, czyli integracji sektorowej. Integracja sektorowa to proces pełnej dekarbonizacji większości sektorów (przemysł, transport, energetyka) poprzez wykorzystanie odnawialnej energii elektrycznej. W tej strategii wodór odgrywa ważną rolę jako nośnik energii we wszystkich wyżej wymienionych sektorach. Gospodarka wodorowa już teraz stanowi rynek globalny o wartości 100 mld USD. Obecnie wodór jest wykorzystywany do produkcji paliw (50% rynku), nawozów (43%) oraz w wielu procesach technologicznych (6%), takich jak produkcja szkła i stali oraz różnych produktów spożywczych, np. margaryny. Istnieją inne zastosowania wodoru, takie jak zasilanie pojazdów (samochodów, autobusów, pociągów, łodzi), wytwarzanie energii elektrycznej i ciepłej do celów komercyjnych i domowych, przechowywanie energii odnawialnej w postaci wodoru oraz zastępowanie gazu ziemnego wodorem

⁴ J. Kupecki, *Podstawowe...*, *op. cit.*; Na ten temat pisze również Leonardo Energy, *Wodór i OZE. Zastosowanie oraz jego wpływ na gospodarkę* 19.03.2019, <https://leonardo-energy.pl/artykuly/wodor-i-oze-zastosowanie-i-jego-wplyw-na-srodowisko-oraz-gospodarke-raport/> [dostęp: 22.04.2022].

w przemyśle i gospodarstwach domowych. Wszystkie te zastosowania są obecnie rozwijane, choć ich udział w światowym rynku jest wciąż niewielki.

Właściwości wodoru otwierają możliwości szerszego zastosowania energii odnawialnej, ponieważ może on być zintegrowany z każdym systemem energetycznym. Systemy energetyczne o dużym uzależnieniu od odnawialnych źródeł energii mogą wykorzystywać te źródła energii, które obecnie nie nadają się do długoterminowego zużycia, dostarczając wodór do jednego lub więcej punktów poboru, takich jak sieci gazowe, stacje napełniania wodorem i kawerny solne. Zgromadzony wodór może być zużywany w różnych momentach w celu zaspokojenia potrzeb cieplnych, transportowych, energetycznych i przemysłowych, co pozwala na najnowocześniejsze wykorzystanie i absorpcję energii. Podczas gdy odnawialna energia elektryczna toruje drogę do dekarbonizacji sektora energetycznego, sektory ogrzewania i mobilności muszą jeszcze otrzymać równie ważny środek dekarbonizacji. Różnorodne zastosowania wodoru pozwolą na integrację i dekarbonizację tych sektorów oraz przyczynią się do transformacji energetycznej w Europie.

W transporcie wodór jest głównym konkurentem dla pojazdów elektrycznych zasilanych bateriami (BEV). Pojazdy napędzane wodorowymi ogniwami paliwowymi (FCEV) mają duży zasięg (ponad 600 km), krótki czas tankowania (około 5 minut), dobrze sprawdzają się w niskich temperaturach przy niskich stratach przejazdu, a jednocześnie charakteryzują się niskim zużyciem przy dużych prędkościach. Straty przy dużych prędkościach są porównywalne do strat w wielu pojazdach z silnikami spalinowymi. W porównaniu z akumulatorami oczekuje się, że wodór będzie miał wyższy priorytet, zwłaszcza w transporcie długodystansowym, takim jak transport ciężarowy i przewozy autobusowe. Obecnie mobilność wodorowa działa na zasadzie ogniw paliwowych, w których wodór i tlen reagują bezpośrednio elektrochemicznie, tworząc wodę. Jako odpad powstaje jedynie woda destylowana i powietrze, które następnie jest filtrowane. Masowy rozwój pojazdów FCEV utrudnia jedynie wysoka cena zakupu i mała infrastruktura stacji paliw. Wraz z szerszym zastosowaniem FCEV prawdopodobnie nastąpi dramatyczny spadek cen nabycia z powodu masowej produkcji.

W sektorze energetycznym wodór może pełnić rolę magazynu energii. Wodór jest idealny do sezonowego magazynowania energii (rzędu TWh), ponieważ przechowuje duże ilości energii (ok. 33 kWh/kg) i może być łatwo składowany w dużych ilościach. Wodór jest również idealną alternatywą, gdy nie można zastosować technologii bateryjnej do pokrycia długoterminowych niedoborów mocy w systemie przesyłowym. Wodór przechowywany w zbiornikach lub systemach gazowych może być ponownie przetworzony na energię elektryczną poprzez połączenie go z tlenem przy użyciu technologii ogniw paliwowych. W przemyśle wodór może zastąpić paliwa kopalne. Na przykład może być wykorzystywany w przemyśle stalowym do redukcji żelaza. Obecnie wodór jest stosowany głównie w produkcji amoniaku, który z kolei jest wykorzystywany w produkcji i przetwarzaniu nawozów. Inne zastosowania wodoru to produkcja polimerów i materiałów wybuchowych, a w przemyśle spożywczym do zestalania tłuszczów i olejów w produkcji mar-

garyny. W wielu częściach świata prowadzone są również projekty pilotażowe, polegające na spalaniu wodoru zamiast węgla⁵.

Przykładowe metody produkcji wodoru

- Produkcja wodoru przez reforming parowy

Reforming parowy jest szeroko stosowanym procesem przemysłowym do produkcji wodoru. W tym procesie węglowodory, głównie gaz ziemny, reagują z parą wodną w temperaturze ok. 850°C i pod ciśnieniem 20-50 barów, tworząc wodór i dwutlenek węgla. Obie substancje są następnie rozdzielane za pomocą separacji adsorpcyjnej. W procesie tym powstaje również palny gaz resztkowy. Można go wykorzystać do podgrzania materiałów wyjściowych do reakcji. Ponadto podczas reakcji uwalniany jest dwutlenek węgla. Podstawą tego procesu produkcyjnego może być również węgiel, który jest drobno rozpylany i mieszany z wodą. Mieszanina ta jest poddawana reakcji z tlenem, tworząc gaz zawierający wodór. Za pomocą reformingu parowego można z niego syntetyzować wodór. Podstawą do przeprowadzenia reformingu parowego są surowce kopalne, dlatego ta metoda wytwarzania wodoru z pewnością nie ma większej przyszłości. Wraz z intensyfikacją wysiłków na rzecz zrównoważonego rozwoju ten rodzaj produkcji wodoru będzie musiał być w coraz większym stopniu zastępowany innymi procesami.

- Produkcja wodoru z biomasy

Wodór może być produkowany także z biomasy. Zgazowaniu poddawane są materiały takie jak: trawa, słoma lub odpady biologiczne. Powstałą w ten sposób mieszaninę gazów można przekształcić w wodór także w procesie reformingu parowego. W procesie tym powstają również gazy resztkowe. Można je stosować np. w turbinie gazowej do wytwarzania energii elektrycznej. Istnieje również możliwość bezpośredniej produkcji wodoru w sposób biologiczny. W fotosyntezie i fermentacji gaz wytwarzany jest przez algi i mikroorganizmy. Jednak te dwie technologie produkcji wodoru nie są jeszcze na takim poziomie, żeby można było je wykorzystać do produkcji przemysłowych ilości tego gazu.

- Produkcja wodoru za pomocą elektrolizy

Proces ten mógłby zastąpić reforming parowy w produkcji wodoru. W procesie elektrolizy wody prąd elektryczny jest wykorzystywany do rozdzielania wody na wodór i tlen. Wodór przemieszcza się do bieguna naładowanego ujemnie, a tlen do bieguna naładowanego dodatnio. W procesie elektrolizy anoda jest naładowana dodatnio, a katoda ujemnie. Istnieją dwa rodzaje elektrolizy wody – elektroliza alkaliczna i elektroliza z membraną. W elektrolizie alkalicznej jako elektrolit wykorzystywany jest żrący potaż (roztwór wody i wodorotlenku potasu). Komory anodowa i katodowa są oddzielone porowatą membraną, dzięki czemu wytwarzane gazy się nie mieszają. Ten proces produkcyjny osiąga wydajność do 70%. W elektrolizie z membraną wymiany protonów (*proton exchange membrane* – PEM) membrana przewodząca proton służy jako elektrolit. Wydajność tego procesu wy-

⁵ J. Kupecki, *Podstawowe...*, *op. cit.*

nosi ok. 50%. Jeśli energia elektryczna dla elektrolizerów pochodzi ze źródeł odnawialnych, wówczas produkowany wodór można sklasyfikować jako ekologiczny⁶.

Plany rozwojowe związane z wodorem

Prace nad Polską Strategią Wodorową w Ministerstwie Klimatu i Środowiska dobiegają końca. Kolejnym obszarem, w którym temat wodoru się pojawia, jest Krajowy Plan Odbudowy – na rozwój i wdrożenie technologii wodorowych zaplanowano w nim aż 800 mln euro. Fundusze na wsparcie innowacyjnych projektów w tym obszarze przeznacza także Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej – na początek 300 mln zł, ale planowane jest już uruchomienie kolejnych programów dofinansowania. Czy wodór ma szansę stać się jednym z głównych paliw transformacji gospodarczej i w znaczący sposób przyczynić się do osiągnięcia neutralności klimatycznej? W 2001 roku Komisja Europejska (KE) ogłosiła strategię wodorową dla neutralnej klimatycznie Europy jako jeden z projektów istotnych dla tworzenia unijnej polityki energetycznej, spójnej z założeniami Europejskiego Zielonego Ładu. Za główny cel Bruksela uznaje w nim rozwój odnawialnego, zielonego, czyli tzw. bezemisyjnego wodoru, wytwarzanego w procesie elektrolizy⁷ przy wykorzystaniu odnawialnych źródeł energii. Jednocześnie Komisja wskazuje, że w krótkim i średnim okresie, aby wesprzeć rozwój rynku wodorowego, potrzebne jest w Europie dopuszczenie stosowania także innych form wodoru powstających w niskoemisyjnych procesach. Niskoemisyjny wodór miałby być jednak, według założeń strategii unijnej, rozwiązaniem jedynie przejściowym, a docelowo – po 2050 roku – wykorzystywany ma być wyłącznie wodór z zeroemisyjnych źródeł.

Typy elektrolizerów

Elektrolizer napełniony jest wodnym roztworem elektrolitu charakteryzującego się dostatecznie wysoką przewodnością. Teoretycznie może to być roztwór kwasu, soli bądź zasady, w praktyce stosuje się ten ostatni elektrolit, gdyż środowisko kwaśne jest zbyt agresywne (kwasy powodują korozję elektrod) a przewodnictwo właściwe roztworów soli jest niższe. Elektrolizery, w zależności od stanu skupienia elektrolitu, można podzielić na alkaliczne i wykorzystujące polimerową membranę wymiany protonów (PEM). Elektrolizer alkaliczny pracuje w układzie z ciekłym elektrolitem, a elektrolizer PEM wykorzystuje elektrolit polimerowy. Budowa elektrolizera jest podobna do budowy ogniwi paliwowych. Składają się one z anody, katody i elektrolitu. Na elektrodzie posiadającej ładunek ujemny protony są usuwane z elektrolitu, a elektrony są dostarczane przez zewnętrzne źródło zasilania.

⁶ Polska Izba Przemysłu Chemicznego, *Wodorowa rewolucja gospodarcza* 20.05.2021, <https://pipc.org.pl/wodorowa-rewolucja-gospodarcza/> [dostęp: 25.04.2022].

⁷ Elektroliza to proces, w którym stały prąd elektryczny szczeni wiązanie chemiczne między wodorem i tlenem w roztworze wodnym. Bardzo czysty wodór w postaci gazowej powstaje z kolei na katodzie, skąd jest odprowadzany i następnie magazynowany. Nie można również pominąć powstawania tlenu na anodzie, bez którego by dana technologia nie mogła działać, ponieważ nie można dokonywać reakcję jedynie na jednej elektrodzie. Proces można również prowadzić w temperaturze pokojowej i wymaga tylko energii elektrycznej. Wydajność obecnych komercyjnych elektrolizerów używanych do produkcji wodoru wynosi około 50-75%.

Z kolei w elektrolizerach alkalicznych zastosowanie znajdują zarówno roztwory NaOH jak i KOH. Ten ostatni jest droższy, jednak jego przewodnictwo jest wyższe. Z uwagi na nieliniową zależność wartości przewodnictwa właściwego roztworu elektrolitu od jego stężenia, w przemyśle stosuje się 16-18% roztwory NaOH, bądź też 25-29% roztwory KOH.

Budowa elektrolizerów alkalicznych jest stosunkowo prosta. Przy jednobiegunowym układzie elektrolizer składa się z dwóch metalowych elektrod zawieszonych w wodnym roztworze elektrolitu. Gdy przez elektrolizer przepływa prąd, na anodzie wydziela się tlen, a na katodzie wodór. Elektrolizer musi być tak skonstruowany, aby możliwe było selektywne odprowadzanie każdego z wydzielających się gazów. Ważne jest także to, że nie można dopuścić do mieszania się wodoru z tlenem, ponieważ mieszanina tych gazów jest łatwopalna i niewielka iskra może doprowadzić do wybuchu.

Natomiast elektrolizery z polimerową membraną PEM są bardzo popularne i często wykorzystywane w nowoczesnych rozwiązaniach technologicznych. W elektrolizerach PEM zastosowano identyczny elektrolit z używanym w ogniwach paliwowych PEM. Elektrolit stanowi cienka polimerowa membrana stale przewodząca protony. Elektrolizery PEM mogą być połączone w układy dwubiegunowe i mogą pracować przy wysokich ciśnieniach wywieranych na membranę⁸.

Zużycie wody w procesie elektrolizy

Do wyprodukowania 1 kg wodoru i 8 kg tlenu potrzeba 8,92 litra wody demineralizowanej, tj. wody wolnej od wszystkich obecnych minerałów (jest bardziej czysta niż woda destylowana). Obecne procesy przemysłowego przetwarzania ropy naftowej zużywają około 40% więcej wody niż podczas elektrolizy. Ponadto, gdy ponownie wykorzystamy wodór w ogniwie paliwowym, odzyskamy podobną ilość wody, jaką zużyliśmy w danym procesie⁹.

Unijna strategia wodorowa a Europejski Zielony Ład

Komisja Europejska w swoim dokumencie podkreśla, że dostrzega kluczową rolę wodoru, zarówno w osiągnięciu neutralności klimatycznej, odbudowie nadwyrężonej pandemią gospodarki, jak i budowie silnej, konkurencyjnej pozycji Unii Europejskiej w skali globalnej. Wodór, wraz z rozwojem odnawialnych źródeł energii (OZE), ma być jednym ze sposobów umożliwiających realizację ambitnych celów środowiskowych Europejskiego Zielonego Ładu. Wyzwaniem dla europejskich planów jest jednak nadal wysoki koszt wytwarzania wodoru oraz jego znikomy udział w całkowitym zużyciu energii. Obecnie wodór stanowi jedynie około 2% energii zużywanej w UE i jest produkowany głównie z wykorzystaniem paliw kopalnych. Tylko 4% całości europejskiej produkcji wodoru stanowi tzw. zielony wodór. W założeniach Komisji to właśnie on ma stać się jedną z wiodących technologii zielonej transformacji w Europie, a na projekty wodorowe do

⁸ J. Kupecki, *Podstawowe...*, *op. cit.*

⁹ Tamże.

2050 roku Unia chce przeznaczyć ponad 400 mld euro pochodzących z różnego rodzaju źródeł finansowania¹⁰.

Polska Strategia Wodorowa

Polska kończy w 2022 roku prace nad krajową strategią wodorową. Jak zakłada projekt dokumentu, nad którym w marcu 2022 roku zakończyły się konsultacje społeczne, do 2025 roku na technologie wodorowe ma zostać wydane 2 mld zł, a do 2030 roku łącznie blisko 17 mld zł. Publikacja projektu strategii jest pozytywnym sygnałem. Oznacza, że Polska chce brać udział, obok innych państw europejskich, w projektowaniu nowych rozwiązań technologicznych.

W projekcie Polskiej Strategii Wodorowej wskazano sześć koniecznych do osiągnięcia celów:

Cel 1 – wdrożenie technologii wodorowych w energetyce;

Cel 2 – wykorzystanie wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie;

Cel 3 – wsparcie dekarbonizacji przemysłu;

Cel 4 – produkcja wodoru w nowych instalacjach;

Cel 5 – sprawna i bezpieczna dystrybucja wodoru;

Cel 6 – stworzenie stabilnego otoczenia regulacyjnego¹¹.

Rodzaje wodorów

Rozróżniamy trzy podstawowe kolory wodoru: szary, niebieski i zielony. Wodór szary produkowany jest z paliw kopalnych. Proces jego wytwarzania odznacza się wysoką emisyjnością. Kolejnym rodzajem jest wodór niebieski. Do jego produkcji wykorzystuje się nieodnawialne źródła energii i surowce. Emisyjność procesu jest jednak niższa (niż w przypadku otrzymywania wodoru szarego), dzięki zastosowaniu metod wychwytu dwutlenku węgla, który jest następnie składowany lub ponownie wykorzystywany. I wreszcie wodór zielony – to ten rodzaj uchodzi za najbardziej pożądany w związku z dążeniem do zmniejszenia emisyjności. Wodór ten otrzymuje się w procesie wykorzystującym energię z odnawialnych źródeł energii (OZE), czyli np. w elektrolizie wody. Jednak potrzebna energia (np. na potrzeby pracy elektrolizera) musi pochodzić z odnawialnych źródeł energii (OZE), czyli nieobarczonych emisją dwutlenku węgla. To właśnie zielony wodór wymieniany jest jako jeden z kluczowych nośników energii, który może przyczynić się do realizacji założeń Europejskiego Zielonego Ładu. Według Komisji Europejskiej tylko wodór produkowany przy wykorzystaniu OZE będzie pełnił rolę jako element dekarbonizacji gospodarki i budowania niezależności energetycznej¹².

¹⁰ Leonardo Energy, *Wodór...*, *op. cit.*

¹¹ J. Kupecki, *Podstawowe...*, *op. cit.*

¹² Tamże.

Wsparcie rozwoju wodorowych technologii

Krajowe instytucje zaczynają wdrażać pierwsze projekty dofinansowania w obszarze technologii wodorowych. Narodowy Fundusz Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej (NFOŚiGW) pracuje już nad wstępnymi założeniami do nowego programu priorytetowego „Wodoryzacja Gospodarki”. Wystartował też nabór ekspertów do oceny wniosków w innym programie – „Nowa Energia”, gdzie w pilotażowym naborze przewidziano 300 mln zł, cały budżet programu wynosi zaś 2,5 mld zł.

Jako wsparcie dla tworzenia podstaw gospodarki opartej o tzw. bezemisyjny wodór, w lipcu 2020 roku powołano Europejski Sojusz na Rzecz Czystego Wodoru (European Clean Hydrogen Alliance – ECH2A). To inicjatywa Komisji Europejskiej, która ma wskazać przeszkody w zwiększaniu skali zielonego wodoru oraz wnieść wkład w prace nad priorytetami w zakresie badań i innowacji. Do sojuszu przystąpiło wiele firm, m.in. też z Polski, które planują wdrażać rozwiązania wodorowe, a w tym przedsiębiorstwa z branży chemicznej i rafineryjnej. Według założeń, aktywny udział w sojuszu będzie także umożliwiał realny wpływ na tworzenie unijnych regulacji¹³.

Sytuacja wodoru w kategoriach międzynarodowych a pozycja Europy w porównaniu z innymi globalnymi podmiotami

Europa może wiele zyskać, pod warunkiem, że jej istniejące kwalifikacje będą promowane i rozszerzane. Obecny łańcuch dostaw Unii Europejskiej, złożony z ponad stu MŚP i dużych podmiotów przemysłowych, musi zostać wzmocniony w najbliższych latach, gdyż w przeciwnym razie znaczące inwestycje dokonane za granicą będą skutkowały utratą konkurencyjności. Przykładowo, w ostatnich latach Chiny zainwestowały szacunkowo 1,4 mld EUR, z czego większość w linie produkcji wodoru i ogniwo paliwowych. Japonia zainwestowała, tylko w roku 2017, sumę blisko 300 mln EUR, a rząd Australii przeznaczył 15,6 mln EUR w formie grantów i pożyczek w celu sfinalizowania planów i zlecenie budowy HydrogenSuperhub, który potencjalnie będzie produkował 20 000 kg wodoru, dysponował 4216 samochodami (sprzedaż i leasing), eksploatował 21 autobusów i 32 stacje tankowania.

Na tym tle pozycja przedsiębiorstw europejskich i eksport technologii poza Europę kształtują się korzystnie. Biorąc pod uwagę, że Europa utraciła pozycję lidera w technologiach fotowoltaiki i akumulatorów, nie może sobie pozwolić teraz na utratę wodzącej roli w dziedzinie gospodarki wodorowej¹⁴.

Droga do samochodów wodorowych w Polsce

40 lat temu TVP wyemitowała program „Sonda”, w którym redaktorzy Zdzisław Kamiński i Andrzej Kurek prezentowali widzom projekt samochodu na wodór, a więc *de facto* auta o napędzie elektrycznym, w którym jednak energia elektryczna wytwarzana jest na bieżąco

¹³ Polska Izba Przemysłu Chemicznego, *Wodorowa...*, *op. cit.*

¹⁴ Leonardo Energy, *Droga do samochodów wodorowych w Polsce*, 08.04.2019, <https://leonardo-energy.pl/droga-droga-do-samochodow-wodorowych-w-polsce/> [dostęp: 26.04.2022].

w ogniwach paliwowych z zatankowanego uprzednio wodoru. 25 lat później w brytyjskim programie rozrywkowo-motoryzacyjnym Top Gear prowadzący, James May, przedstawił prototypowy pojazd wodorowy koncernu GM, mówiąc, że za 10-20 lat te samochody będą dostępne i przystępne dla kierowców. Po kolejnych 15 latach doczekaliśmy się w końcu w Polsce pierwszego zarejestrowanego auta na wodór, ale wciąż nie mamy jeszcze ani jednej stacji, na której można by je zatankować. Natomiast rząd – w opublikowanym projekcie strategii do 2040 roku – szacuje, że auta wodorowe upowszechnią się dopiero w latach 40. lub 50. XXI wieku, a więc za około 30 lat. Do tego czasu infrastruktura ich tankowania ma jednak systematycznie rosnąć.

Do 2021 roku dwie pierwsze stacje tankowania wodoru chciał zbudować jeden z polskich koncernów paliwowych. Jedna z nich miała powstać w Warszawie, druga zaś nieopodal gdańskiej rafinerii. Pierwszy zarejestrowany w Polsce samochód wodorowy ma zasięg około 550 km na jednym ładowaniu, więc podróż nim ze stolicy do Trójmiasta będzie w końcu możliwa. Dostępne w innych krajach modele aut z ogniwami paliwowymi pozwalają przejechać ponad 700 km na jednym tankowaniu.

Chociaż Polska jest znaczącym producentem wodoru na świecie, to nikomu do tej pory nie śpieszyło się, aby wybudować pierwszą taką stację. Koszt jej postawienia to przynajmniej 4 mln zł, a doświadczenia Orlenu z Niemiec (gdzie buduje je sieć Star należąca do Orlenu) pokazują, że całkowite koszty mogą sięgać nawet 6-8 mln zł. Natomiast szanse na zwrot z inwestycji są na razie żadne.

Tankowanie samochodu wodorem

Tankowanie odbywa się na stacjach napełniania. Cały proces jest bardzo podobny do konwencjonalnego tankowania paliw kopalnych. Po podłączeniu pistoletu do napełniania do zaworu na zbiorniku, naciska się dźwignię i cały system zajmuje się resztą. Zbiornik jest zatankowany w ciągu pięciu minut i cały pojazd jest gotowy do jazdy. Cały system jest wysoce zautomatyzowany i gdy pistolet do napełniania kliknie, system zamyka się i blokuje. Dzięki temu wodór nie może wydostać się ze stacji paliw do środowiska. Po zatankowaniu wystarczy „odłączyć” pistolet do tankowania, zapłacić i jechać dalej¹⁵.

Jak działa wodorowy samochód elektryczny w zimne dni?

Zaletą jest ogólna niezawodność systemu w niskich temperaturach. Ogniwa paliwowe są mniej podatne na degradację w niskich temperaturach niż akumulatory. Wodorowe pojazdy elektryczne nie muszą być ogrzewane wytworzoną energią elektryczną i mogą pracować na ciepłe odpadowe generowane przez ogniwo paliwowe, dzięki czemu pojazd jest ogólnie bardziej wydajny niż pojazdy elektryczne z akumulatorem w warunkach zimowych.

¹⁵ J. Kupecki, *Podstawowe..., op. cit.*

Z drugiej strony w zimie sprawność pojazdów elektrycznych z akumulatorem spada mniej więcej do poziomu sprawności pojazdów FCEV, które pozostają sprawne nawet w niskich temperaturach¹⁶.

Jak ciężkie są zbiorniki na przechowanie wodoru w samochodach?

Przy hipotetycznym przechowywaniu 4,2 kg sprężonego wodoru pod ciśnieniem 700 barów potrzebny jest zbiornik w samochodach o masie około 135 kg. Obecnie zbiorniki wykonane są ze wzmocnionego włókna węglowego. W porównaniu do samochodów benzynowych, zbiorniki na wodór są cztery do pięciu razy większe objętościowo i dziesięć razy cięższe¹⁷.

Bezpieczeństwo w użytkowaniu wodoru

Wodór można uznać za równie bezpieczny jak inne paliwa lub nawet od nich bezpieczniejszy. Oprócz standardowych testów zderzeniowych, zbiorniki wodoru są również testowane na wytrzymałość na ostrzał z karabinu snajperskiego. Zbiorniki wodoru mogą wytrzymać dwukrotnie wyższe ciśnienie niż w standardowych warunkach. Podobnie zbiorniki na benzynę są bezpieczne i posiadają szereg systemów nastawionych na bezpieczeństwo pod wysokim ciśnieniem. Kolejną korzyścią dla bezpieczeństwa, wynikającą z zastosowania wodoru, jest jego bardzo niska gęstość, co oznacza, że w przypadku otwarcia zbiornika, wodór szybko wyparuje i uniesie się w górę, a nie zgromadzi się w pobliżu miejsca wypadku. W mało prawdopodobnym przypadku pożaru płomień będzie unosił się pionowo i pojazd nie zapali się, jak w przypadku płynnych paliw kopalnych¹⁸.

Następne kroki umożliwiające pełne wprowadzenie wodoru

Aby osiągnąć europejskie cele w zakresie redukcji gazów cieplarnianych, konieczne są zdecydowane decyzje polityczne, ułatwiające wejście na rynek rozwiązań zeroemisyjnych, reprezentowanych przez wodór i ogniwa paliwowe. Aby wodór mógł odegrać swoją rolę jako siła napędowa transformacji energetycznej i doprowadzić do znacznego wzrostu popytu, należy wprowadzić odpowiednie ramy prawne i regulacyjne. W szczególności należy umożliwić powstanie programu gwarancji pochodzenia wodoru. Uczestnicy rynku muszą mieć również możliwość współpracy z dostawcami energii odnawialnej w ramach długoterminowych umów o zakup energii¹⁹.

Koszt wyprodukowania 1 kg wodoru

Rynek wodoru może wzrosnąć niemal trzykrotnie do 2050 roku dzięki spadającym kosztom produkcji, rosnącym cenom uprawnień do emisji CO₂ oraz dotacjom rządowym na

¹⁶ Tamże.

¹⁷ Polska Izba Przemysłu Chemicznego, *Wodorowa..., op. cit.*

¹⁸ J. Kupecki, *Podstawowe..., op. cit.*

¹⁹ J. Kupecki, *Podstawowe..., op. cit.*

wdrażanie rozwiązań wodorowych - szacują eksperci Bain & Company²⁰. Według analizy opublikowanej przez ekspertów 4CF na portalu Transformacja 2050, cena niebieskiego i zielonego wodoru może spaść do 1 dolara za tonę w ciągu 30 lat. Agresja Rosji na Ukrainę może tę sytuację i tę prognozę znacząco zmienić. Jednocześnie jednak duża podaż wodoru opartego na rezerwach gazu ziemnego w Federacji Rosyjskiej może utrudnić rozwój zielonych innowacji w produkcji wodoru na kontynencie europejskim. Ponadto produkcja zielonego wodoru musi uwzględniać fakt, że ceny różnią się w poszczególnych częściach świata, w zależności od tego, ile kosztuje produkcja energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii. Według Międzynarodowej Agencji Energetycznej cena produkcji wodoru kształtuje się następująco: parowy reforming gazu ziemnego 1-3,5 \$/kg; zgazowanie węgla 1,2-2,2 \$/kg; elektroliza wody 3-7,5 \$/kg.

Obecnie nie jest możliwe obliczenie rynkowej ceny wodoru do napędu pojazdów. Dobrym przykładem są jednak doświadczenia rynku niemieckiego. W Niemczech udostępnia się pojazdy testowe, które pokazują koszt paliwa wodorowego. Przy sprzedaży detalicznej na stacjach paliw Partnerstwa Czystej Energii cena 1 kg wodoru wynosi około 9,50 euro (około 39,9 zł/kg). Duże floty samochodowe mogą liczyć na korzystniejsze ceny wodoru. Na przykład zakład autobusowy w Hurler kupuje wodór w cenie 3,80 EUR/kg (ok. 15,96 zł/kg)²¹.

Przechowywanie wodoru

Obecnie najbardziej obiecującą technologią magazynowania wodoru jest metoda sprężania gazu wodorowego. Metoda ta zasadniczo umożliwia łatwiejsze przechowywanie wodoru, ponieważ cząsteczki wodoru są bardzo małe. Nowoczesne zbiorniki magazynowe są już wykonane z bardzo wytrzymałych, szczelnych materiałów i mogą być bezpiecznie przechowywane z minimalną utratą wodoru. W porównaniu z konkurencyjnymi metodami przechowywania, sprężanie wodoru ma najmniej przeciwwskazań. Wodór przechowywany jest w stanie gazowym w stanie statycznym w stalowym zbiorniku ciśnieniowym o dużej pojemności. Sprężenie wodoru do 350 barów wymaga około 15-20% energii zawartej w paliwie. Drugą możliwością jest przekształcenie wodoru w stan ciekły. Wadą tej metody jest jednak to, że wodór w tym stanie musi być przechowywany w zbiornikach kriogenicznych w temperaturze -253°C . Podczas obchodzenia się z nim i użytkowania dochodzi do uników, które powstają w wyniku parowania wodoru, który zachowuje się tak w temperaturze wyższej niż -253°C . Prawie 30-40% całkowitej energii zawartej w paliwie jest potrzebne do samego skroplenia²².

²⁰ Bain & Company, *When will hydrogen be cost competitive?*, <https://www.bain.com/insights/when-will-hydrogen-be-cost-competitive-snap-chart/> [dostęp: 26.04.2022].

²¹ Polska Izba Przemysłu Chemicznego, *Wodorowa...*, *op. cit.*

²² Polska Izba Przemysłu Chemicznego, *Wodorowa...*, *op. cit.*

Podsumowanie

Gospodarka wodorowa nie może się w pełni rozwinąć bez dotacji rządowych. Inwestycje w produkcję są konieczne, aby obniżyć ceny, a w Europie, która dąży do zbudowania 40 GW elektrolizerów w UE do 2030 r. i wspierania budowy kolejnych 40 GW za granicą, aby zwiększyć import, wsparcie dla niskoemisyjnego i bezemisyjnego zielonego wodoru będzie głównym przedmiotem zainteresowania w najbliższych latach. Oprócz zwiększenia mocy produkcyjnych, postępy w technologii i wydajności samych elektrolizerów również doprowadzą do obniżenia cen zielonego wodoru.

Polska produkuje rocznie ponad 1 mln ton wodoru, co stanowi około jedną dziesiątą całkowitej produkcji Europejskiego Obszaru Gospodarczego. Mimo wielu zalet jest to technologia kosztowna. Polska zabiega o zwiększenie dopłat dla szarego i niebieskiego wodoru w okresie przejściowym polskiej dekarbonizacji. W upowszechnianiu wykorzystania wodoru konieczny jest rozwój całkiem nowych technologii, m.in. w obszarze jego magazynowania i transportu, dlatego ważne jest, aby Komisja Europejska nie dyskryminowała różnych rodzajów wodoru ani w zakresie finansowania, ani tym bardziej w zakresie regulacji, przynajmniej w początkowym okresie wdrażania. Bruksela upatruje jednak przyszłości w zielonym wodorze, nawet jeśli tymczasowo wesprze też inne kolory.

Bibliografia

1. Brain & Company, When will hydrogen be cost competitive?, <https://www.bain.com/insights/when-will-hydrogen-be-cost-competitive-snap-chart/> [dostęp: 26.04.2022].
2. Kupecki J., Podstawowe informacje o wodorze, https://ien.com.pl/tl_files/pliki/CPE/FAQ_final_PL.pdf [dostęp: 25.04.2022].
3. Leonardo Energy, Droga do samochodów wodorowych w Polsce 08.04.2019, <https://leonardo-energy.pl/droga-droga-do-samochodow-wodorowych-wpolsce/> [dostęp: 26.04.2022].
4. Leonardo Energy, Wodór i OZE. Zastosowanie oraz jego wpływ na gospodarkę, 19.03.2019, <https://leonardo-energy.pl/artykuly/wodor-i-oze-zastosowanie-i-jego-wplyw-na-srodowisko-oraz-gospodarke-raport/> [dostęp: 22.04.2022].
5. Polska Izba Przemysłu Chemicznego, Wodorowa rewolucja gospodarcza 20.05.2021, <https://pipc.org.pl/wodorowa-rewolucja-gospodarcza/> [dostęp: 25.04.2022].
6. Wiącek D., Wodór jako paliwo przyszłości, „Autobusy – technika, eksploatacja, systemy transportowe” 2011, nr 10.

Dane kontaktowe

Szymon Jureczka, szymon.jureczka@onet.pl

Dominik Jendrzeczyk, dominik-jendrzeczyk@wp.pl

Grzegorz Szydełko, greg.sz@op.pl