

WSTĘP DO ENERGETYKI WODOROWEJ

dr inż. Jacek NOWICKI

Sekretarz Generalny, Stowarzyszenie Elektryków Polskich

Słowa kluczowe: paliwo wodorowe, magazynowanie energii, ogniwa paliwowe, elektromobilność, kogeneracja wodorowa.

Streszczenie: Równoległe do rozwoju odnawialnych źródeł energii (OZE) postępować musi rozwój systemów magazynowania energii. Jednym z najbardziej interesujących systemów magazynowania i wykorzystywania energii jest energetyka wodorowa. Wodór nie występujący w skorupie ziemskiej jako paliwo kopalne może być uzyskiwany np. w drodze elektrolizy lub z gazu koksowniczego a następnie magazynowany, przesyłany i wykorzystywany do wytwarzania energii elektrycznej w ogniwach paliwowych czy też spalany w silnikach turbinowych. Nowoczesne systemy wykorzystujące wodór otwierają wiele nowych możliwości w dziedzinie elektromobilności, kogeneracji a także w transporcie lotniczym.

1. WPROWADZENIE

Wodór, najprostszy pod względem budowy pierwiastek w tablicy Mendelejewa, praktycznie nie występuje samodzielnie w skorupie i atmosferze ziemskiej. Pierwiastek ten można śmiało uznać za paliwo idealne. Ma on bowiem niezwykle wysoką wartość opałową wynoszącą 120 MJ/kg (dla porównania – węgiel kamienny ok. 29 MJ/kg, benzyna ok. 43 MJ/kg) i ciepło spalania 141,9 MJ/kg. Spalanie wodoru z udziałem tlenu z powietrza atmosferycznego jest całkowicie bezemisyjne: jedynym produktem tej reakcji jest woda. Wodór ma zatem znakomite perspektywy jako przyszłościowe paliwo zarówno do wytwarzania energii elektrycznej w ogniwach paliwowych na potrzeby elektromobilności i innych zastosowań ale również jako paliwo dla czystych ekologicznie silników spalinowych – przede wszystkim turbinowych.

2. WYTWARZANIE WODORU

Pierwsze eksperymenty z uzyskiwaniem wodoru powstającego po wrzuceniu kawałków metalu do naczynia z kwasem przeprowadzał w końcu XVI wieku szwajcarski lekarz i przyrodnik Paracelsus. Reakcja tego rodzaju w dalszym ciągu stanowi najprostszą metodę uzyskania wodoru w każdym laboratorium chemicznym.

Na całym świecie wytwarza się obecnie nieco ponad 40 mln ton wodoru rocznie, z czego ponad 7 mln ton w krajach UE. Energetyczny ekwiwalent produkowanego przemysłowo wodoru stanowi zaledwie 1% światowego zapotrzebowania na energię pierwotną [1].

Obecnie na świecie podstawowe, przemysłowe technologie wytwarzania wodoru z surowców węglowodorowych (ropa naftowa, gaz ziemny, węgiel) na potrzeby przemysłu chemicznego (ok. 60%), petrochemii (ok. 30%) i metalurgii (ok. 6%) to [1]:

- **Reforming parowy metanu** (SMR – ang. *Steam Methane Reforming*) – stanowiący obecnie najtańszą opcję wytwarzania wodoru;

- **Proces częściowego utleniania** (POX – ang. *Partial Oxidation* lub CPOX – ang. *Catalitical Partial Oxidation*)

- **Reforming autotermiczny** (ATR – *Autothermal Reforming*), łączący obie powyższe technologie.

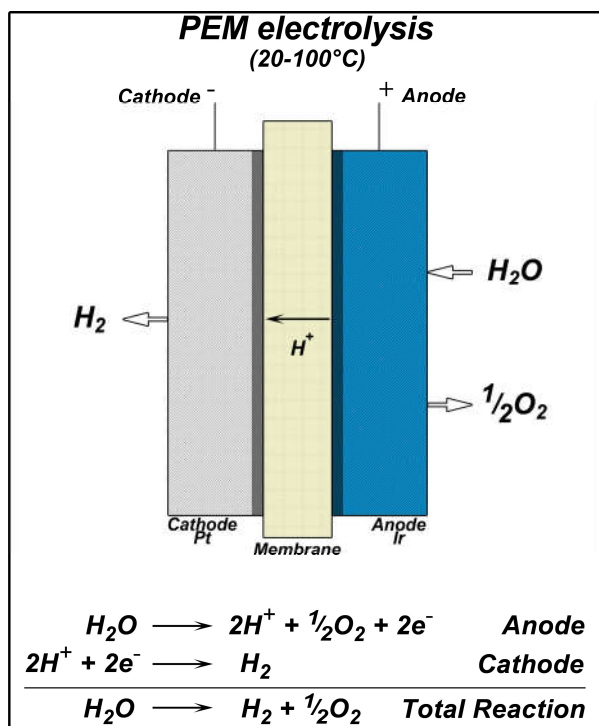
W Polsce na skalę przemysłową stosuje się **wytwarzanie wodoru z gazu koksowniczego**. W doskonałenie tego procesu (uzyskiwanie możliwie jak najczystsze go gazu głęboko zaangażowana jest Jastrzębska Spółka Węglowa (JSW SA) – będąca właścicielem kilku krajowych koksowni.

W chwili obecnej w skali światowej zaledwie kilka procent wodoru uzyskuje się w procesie **elektrolizy** – rozkładu wody na tlen i wodór pod wpływem prądu elektrycznego. Elektroliza stanowi szczególnie ważny proces technologiczny umożliwiający zamianę energii

uzyskaną w odnawialnych źródłach energii na energię chemiczną paliwa wodorowego.

Obecnie stosowane są trzy typy elektrolizerów:

1. **Elektrolizery alkaliczne.** Elektrolitem w tych elektrolizerach jest wodny roztwór wodorotlenku, najczęściej wodorotlenku potasu KOH albo sodu NaOH. Elektrody oddzielone są od siebie porowatą membraną zapobiegającą mieszanii wydzielonych gazów: wodoru i tlenu. Proces technologiczny realizowany jest w temperaturze $70 \div 80^\circ\text{C}$ pod ciśnieniem atmosferycznym i w temperaturze $90 \div 100^\circ\text{C}$ w elektrolizerach ciśnieniowych. Sprawność wynosi około 70%.
2. **Elektrolizery membranowe** z membraną polimerową (PEM). W procesie elektrolizy pośredniczy membrana polimerowa o wysokim przewodnictwie jonowym. Nośnikami ładunku elektrycznego w tym przypadku są jony wodorowe (protony). Podczas pracy elektrolizera na katodzie wydzielą się wodór. Elektroliza prowadzona jest w temperaturze $70 \div 80^\circ\text{C}$. Sprawność elektrolizy wynosi $70 \div 80\%$, natomiast otrzymany wodór charakteryzuje się bardzo wysoką czystością.



Rys. 1. Zasada działania elektrolizera membranowego z membraną polimerową – PEM [rys. Wikipedia]

3. **Wysokotemperaturowe elektrolizery parowe.** Elektrolitem w tych elektrolizerach jest membrana ceramiczna przewodząca za pośrednictwem jonów tlenkowych. Zazwyczaj membrany te wykonane są z tlenku cyrkonu stabilizowanego tlenkiem itru. W wyniku reakcji elektroredukcji powstaje tlen atomowy, natomiast wodór w mieszaninie z parą wodną znajduje się w przedziale katodowym elektroli-

zera. Temperatura elektrolizy wynosi $850 \div 1200^\circ\text{C}$.

Do przyszłościowych technologii do wytwarzania wodoru należy zaliczyć:

- **zgazowanie biomasy oraz odpadów komunalnych i rolnych;**
- **fotocchemiczny rozkład wody (PEC);**
- **termochemiczny rozkład wody (STCH).**

Według licznych ocen specjalistów najbardziej perspektywiczną grupą technologii produkcji wodoru są różne procesy elektrolityczne. przewiduje się, że do 2050 r. ok. 25% uzyskiwane będzie na drodze elektrolizy. Nacisk na produkcję większych ilości paliwa wodorowego może spowodować szybki wzrost zapotrzebowania na opracowanie bardziej ekonomicznych niż dotąd technologii. Przyszłościowe procesy otrzymywania wodoru zostaną zapewne zróżnicowane na duże **systemy scentralizowane** i **systemy rozproszone** – te ostatnie przede wszystkim przeznaczone do współpracy z rozproszonymi OZE.

3. PRZESYŁANIE I MAGAZYNOWANIE PALIWA WODOROWEGO

Wodór może być przesyłany rurociągami i magazynowany w stanie sprężonego gazu lub cieczy (gaz skroplony). Sprężenie gazu wiąże się z dodatkowym zużyciem energii. Na przykład: energia niezbędna do izotermicznego sprężenia wodoru od 2 do 35 MPa wynosi 1,05 kWh/kg oraz 1,36 kWh/kg wodoru przy sprężeniu do 70 MPa).

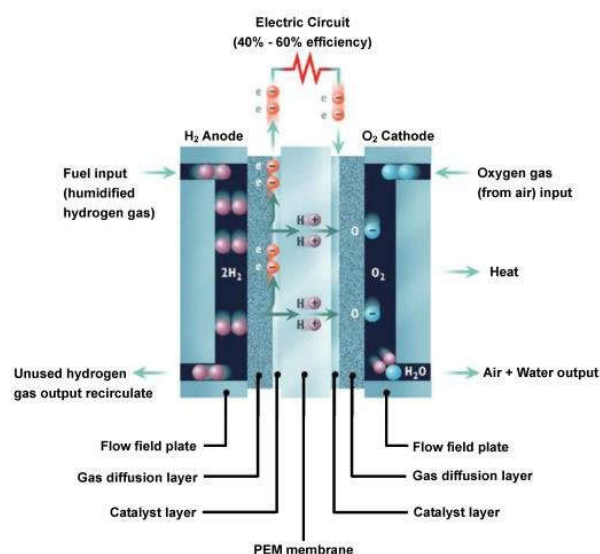
Literatura [1] podaje przykładowe wartości parametrów dla poszczególnych elementów infrastruktury przesyłu wodoru:

- **Transport rurociągowy wodoru** - ciśnienie $2 \div 7$ MPa.
- **Terminale końcowe systemów rurociągowego przesyłu wodoru** – ciśnienie 35 MPa.
- **Stacje tankowania samochodów o napędzie wodorowym:** wodór skroplony do tankowania samochodów: temperatura -253°C , ciśnienie 70 MPa; wodór gazowy do tankowania samochodów: temperatura od 20 do 60°C , ciśnienie do 70 MPa. Istnieje wiele możliwych systemów składowania wodoru przy wykorzystaniu zbiorników sztucznych i naturalnych:
- **składowanie wodoru naturalnych zbiornikach podziemnych**, kawernach – np. opróżnionych kopalniach soli: ciśnienie minimalne 5,8 MPa, ciśnienie maksymalne 17,5 MPa.
- **składowanie w zwykłych zbiornikach ciśnieniowych,**
- **składowanie w zbiornikach kriogenicznych** (przechowywanie skroplonego wodoru o bardzo niskiej temperaturze)
- **wykorzystanie specjalnych systemów magazynowania z wodorkami metali i nanostrukturami węglowymi.**

4. OGNIWA PALIWOWE

Urządzeniami przetwarzającymi energię paliwa wodowego bezpośrednio na energię elektryczną są ogniwa paliwowe. Zostały one praktycznie zastosowane w amerykańskim programie kosmicznym już w latach sześćdziesiątych do zasilania elektrycznego załogowych statków kosmicznych Gemini i Apollo. Obecnie ich rozwój jest jednym z najważniejszych wyzwań technologicznych energetyki wodorowej.

Zgodnie z definicją **ogniwo paliwowe generuje energię elektryczną z reakcji utleniania stale dostarczanego do niego z zewnątrz paliwa** (wodoru lub paliwa bogatego w wodór).



Rys. 2 – Schemat działania ogniwa paliwowego PEM [rys. Toyota]

Do najważniejszych zalet ogniw paliwowych należą:

- **Wysoka jakość dostarczonej energii** i odporność na zakłócenia;
- **Wysoka sprawność.** Ogniwo paliwowe jest zawsze mniejsze i lżejsze od innych źródeł energii o porównywalnej mocy. Sprawność ogniw paliwowych w generowaniu energii elektrycznej osiąga nawet 50%. W procesie kogeneracji, tj. produkcji energii elektrycznej i ciepła, ogniwa paliwowe osiągają sprawność nawet 85%.
- **Możliwość stosowania różnych rodzajów paliw.** Ogniwa paliwowe mogą być zasilane prawie każdym paliwem bogatym w wodór. Uzyskiwanie wodoru z paliwa może przebiegać wewnątrz ogniwa paliwowego – jest to tzw. wewnętrzny reforming lub poza ogniwem w specjalnym zewnętrznym urządzeniu (ang. *fuel reformer*).
- **Brak szkodliwych emisji** - przypadku zasilania ogniwa czystym paliwem wodorem, ilość produkowanych zanieczyszczeń jest śladowa a produktem reakcji chemicznej zachodzącej w ogniwie jest czysta woda.
- **Skalowalność** - pojedyncze ogniwa paliwowe można łączyć ze sobą w celu osiągnięcia pożądanego

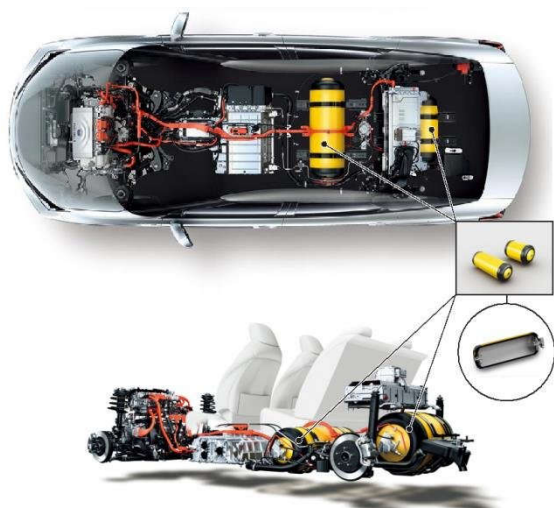
go dla danego zastosowania poziomu generowanej mocy.

Podstawowy podział ogniw paliwowych bazuje na rodzaju zastosowanego w nich elektrolitu, która to substancja determinuje temperaturę reakcji zachodzącej w ogniwie oraz rodzaj paliwa zasilającego ogniwo. Wyodróżniamy następujące podstawowe rodzaje ogniw paliwowych:

- **PEM** (ang. *Polymer Electrolyte Membrane*). Ogniwa paliwowe PEM zasilane są czystym wodorem lub reformatem. Membraną ogniwa PEM jest materiał polimerowy np. nafion. Zaletami ogniwa PEM jest wysoka sprawność wytwarzania energii elektrycznej - do 65%, mała ilość wydzielanego ciepła oraz dobra nadążność ogniwa w systemach poddawanych zmiennemu obciążeniu oraz krótki czas rozruchu. Cechy te wynikają z niskiej temperatury reakcji zachodzącej w ogniwie: $60 \div 100^{\circ}\text{C}$. Moc uzyskiwana z pojedynczego ogniwa: $0,5 \div 400$ kW. Podstawowe zastosowania: systemy napędowe pojazdów; stacjonarne i przewoźne generatory energii. Żywotność: do 60 tys. h. Urządzenia te są już w pełni skomercjalizowane – dostępne na rynku.
- **DMFC** (ang. *Direct Methanol Fuel Cell*). Ogniwa DMFC wyposażone są w polimerową membranę, podobnie jak ogniwa PEM. Odmienna jest w nich jednak konstrukcja anody, która w ogniwie DMFC pozwala na dokonanie wewnętrznego reformingu metanolu i uzyskanie wodoru do zasilania ogniwa. Ogniwa DMFC eliminują problem składowania paliwa (paliwem jest łatwy w przechowywaniu metanol), są również atrakcyjne dla aplikacji przenośnych ze względu na niską temperaturę zachodzącej reakcji (około 80°C). Sprawność jest niższa niż w przypadku ogniw PEM i wynosi ok. 40%. Przeznaczenie: zasilanie urządzeń elektronicznych o małych mocach (komputery przenośne, urządzenia łączności, aparatura medyczna). Urządzenia te są w pełni skomercjalizowane – dostępne na rynku.
- **AFC** (ang. *Alkaline Fuel Cell*). Alkaliczne ogniwa paliwowe stosowane były od dawna w astronautyce. Elektrolitem jest roztwór wodorotlenku potasu KOH. Reakcja przebiega w temperaturze $100 \div 250^{\circ}\text{C}$, uzależnionej od od stężenia roztworu KOH. Wyższa temperatura reakcji pozwala osiągnąć wyższą sprawność wytwarzania energii elektrycznej i skojarzonego ciepła. Wymagane jest dla nich paliwo o bardzo wysokim poziomie czystości. Moc: do 250 kW. Żywotność: $5 \div 8$ tys. h.
- **PAFC** (ang. *Phosphoric Acid Fuel Cell*). Ogniwa fosforanowe PAFC znajdują zastosowanie przede wszystkim w systemach kogeneracji energii elektrycznej i ciepła. Sprawność generacji energii elektrycznej wynosi ok. 40%, dodatkowo para wodna produkowana przez ogniwo może być zamieniana na ciepło. Elektrolitem w ogniwie PAFC jest kwas fosforowy (H_3PO_4). Ogniwo jest przystosowane do

różnych paliw bogatych w wodór. Dobrze toleruje obecność tlenków węgla jednak konieczne jest staranne usunięcie siarki z paliwa. Według ocen specjalistów Departamentu Energii USA technologia ogniwi fosforanowych jest już obecnie dojrzała do szerokiego wprowadzenia na rynek do zastosowań stacjonarnych. Dostępne moce: do aż 11 MW. Żywotność: do 30 ÷ 60 tys. h.

- **MCFC** (ang. *Molten Carbonate Fuel Cell*). Elektrolitem w ogniwach MCFC jest stopiony węglan litu/potasu. Ogniwa MCFC pracują w wysokich temperaturach. Wysoka temperatura reakcji zachodzącej w ogniwie pozwala na stosowanie szerokiej gamy paliw bogatych w wodór: np. gazu ziemnego, benzyny i czystego wodoru. Główne zastosowanie: systemy generacji energii elektrycznej małej i średniej mocy do kilku MW. Żywotność: do 20 ÷ 30 tys. h.
- **SOFC** (ang. *Solid Oxide Fuel Cell*). Ogniwa tlenkowe SOFC posiadają membranę wykonaną z ceramiki tlenkowej. Pracują w wysokich temperaturach 650 ÷ 1000°C. W systemach kogeneracji energii elektrycznej i ciepła ogniwo to osiąga sprawność do 85%. Charakteryzuje się ono wysoką tolerancją na zanieczyszczenia paliwa tlenkami węgla i siarki. Możliwe jest stosowanie rozmaitych rodzajów paliw. Moc: do 200 kW. Żywotność: do 90 tys. h. Urządzenia te są w pełni skomercjalizowane – dostępne na rynku.



Rys. 3. Rozmieszczenie komponentów systemu napędowego wewnątrz nadwozia samochodu Toyota Mirai. Zbiorniki wodoru oznaczone są kolorem żółtym [rys. Toyota]

5. POJAZDY WODOROWE

Wydaje się, że żywiołowy rozwój elektromobilności bazujący na skutecznym wprowadzeniu na rynek ogromnej liczby samochodów elektrycznych z napędem akumulatorowym, samochodów hybrydowych i hybrydowych *plug-in*, opóźnił nieco wejście wodoru do motoryzacji. Wysoka atrakcyjność technologii wo-

dorowej w porównaniu z akumulatorową to bardzo szybkie tankowanie – porównywalne czasowo z uzupełnianiem tradycyjnego paliwa (benzyna, olej napędowy), bez niedogodności związanych z czasochłonnym ładowaniem akumulatorów.

Japoński koncern Toyota od lat konsekwentnie promuje rozwiązanie napędu wodorowego dla samochodu osobowego. **Toyota Mirai** (z jap. Przyszłość) jest eleganckim sedanem, w którym napęd elektryczny zasila jest z ogniwa paliwowego wspieranego baterią akumulatorów nikielowo-metalowo-wodorkowych. Jak zapewnia producent system TFCS (ang. *Toyota Fuel Cell System*) jest znacząco bardziej wydajny od standardowych napędów spalinowych, nie emituje żadnych zanieczyszczeń i oferuje wygodę znaną z tradycyjnych silników. Zasięg I generacji Mirai to aż 500 kilometrów, a tankowanie trwa jedynie 3 minuty. Ogniwa paliwowe Toyoty Mirai produkują 114 kW mocy (czyli 155 KM) i oferują współczynnik gęstości mocy wynoszący 3,1 kW/l. Energoelektroniczny przekształtnik podnosi napięcie generowane przez ogniwa paliwowe do 650 V. Wyższe napięcie umożliwiło zastosowanie bardziej kompaktowego silnika elektrycznego i mniejszej liczby ogniwi, co z kolei przełożyło się na wysoką wydajność i niski koszt systemu ogniwi paliwowych Toyoty. W zapowiedzianym w październiku 2019 r. Mirai II generacji (rok modelowy 2021) przewiduje się zwiększenie o 30% zasięgu z jednoczesnym zwiększeniem pojemności zbiorników wodoru. Nowy model ma być znacząco dłuższy, szerszy i nieco niższy niż samochody I generacji.



Rys. 4. Ciągnik siodłowy Nikola One o napędzie wodorowym do holowania typowych kilkunastotonowych naczep ciężarowych [fot. Nikola Motor Company]

W dłuższym horyzoncie czasowym rozwoju elektromobilności wydaje się, że wodór stanowi najbardziej atrakcyjny perspektywiczny rodzaj paliwa – szczególnie dla pojazdów dużych i ciężkich, zapewniając duży zasięg przy niewielkiej masie. Przede wszystkim chodzi tu o duże samochody ciężarowe przeznaczone do transportu dalekosiężnego. Konieczna w tym przypadku potężna moc napędu i ogromny zasięg są postulatami trudnymi do spełnienia przy zasilaniu wyłącznie akumulatorowym. Amerykańska firma typu *start-up* Nikola Motor Company założona przez wizjonera Trevora Milтона opracowała prototyp ciągnika siodłowego **Nikola One** z napędem wodorowym przeznaczony do holowania typowych kilkunastotonowych naczep ciężarowych. Pojazd napędza sześć silników elektrycznych, generujących łącznie 1 000 KM i ponad

2 700 Nm momentu obrotowego, zasilanych przez zestaw 320 kWh akumulatorów chłodzonych ciecżą. Akumulatory ładowane są z wodorowego ogniwa paliwowego.

Wodór wykorzystywany w ogniwach paliwowych może być również bardzo atrakcyjny w układach napędowych autobusów – zarówno miejskich jak i między-miastowych. Autobusy wyposażone w ogniwa paliwowe są już oferowane przez wielu producentów, w tym m.in. przez Solaris. Władze miast na całym świecie biorą udział w pilotażowych programach włączania autobusów na ogniwa paliwowe do sieci transportu publicznego. Na przykład w programie CHIC (ang. *Clean Hydrogen in European Cities*) bierze udział 8 miast w Europie i Kanadzie.

Napęd wodorowy jest również bardzo atrakcyjny dla pojazdów szynowych – przede wszystkim dla lokomotyw i zespołów trakcyjnych obsługujących niezelektryfikowane szlaki kolejowe, obsługiwane dotąd przez trakcję spalinową.

We wrześniu 2018 roku niemiecki oddział firmy Alstom zaprezentował w Bremervörde w Niemczech pierwszy na świecie pociąg (zespół trakcyjny) typu **Coradia iLint** zasilany z wodorowych ogniw paliwowych zbudowany przez zakłady Alstom w Salzgitter. Od 17 września 2018 r. dwa takie pociągi rozpoczęły regularne przejazdy pasażerskie na szlakach kolejowych Dolnej Saksonii. Przedsiębiorstwo LNVG (niem. *Landesnahverkehrsgesellschaft Niedersachsen*) jest pierwszym na świecie użytkownikiem bezemisyjnego pociągu wodorowego o niskim poziomie hałasu, osiągającym prędkość do 140 km/h. Dla LNVG pociąg Coradia iLint obsługuje linię o długości prawie 100 km biegnącą przez Cuxhaven, Bremerhaven, Bremervörde i Buxtehude, zastępując tym samym dotychczasową flotę pociągów spalinowych. Nowe pociągi są tankowane na mobilnej stacji tankowania wodoru. Gazowy wodór jest wpompowywany do zbiorników pociągów ze stalowego kontenera o wysokości ponad 12 m znajdującego się obok torowiska na stacji Bremervörde. Na jednym tankowaniu pociągi mogą jeździć po sieci przez cały dzień, dzięki pełnej autonomii pokonując dystans ok. 1000 km.

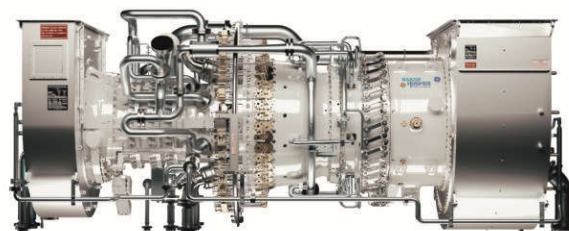


Rys. 5. Zespół trakcyjny typu **Coradia iLint** zasilany z wodorowych ogniw paliwowych zbudowany przez zakłady Alstom od roku znajduje się w regularnej eksploatacji [fot. Alstom].

6. TURBINY WODOROWE

Uzyskiwanie z wodoru wielkich mocy w systemach generacji stanie się w przyszłości domeną dobrze znanych już dziś urządzeń – silników turbinowych, znajdujących szerokie zastosowanie we współczesnej energetyce i lotnictwie. Turbina gazowa spalająca wodór jest urządzeniem praktycznie bezemisyjnym, której produktem spalania jest woda.

Już 9 lat temu – w lipcu 2010 r. w Fusina koło Wenecji we Włoszech nastąpiło uruchomienie innowacyjnej elektrowni obejmującej turbinę wodorową i odzysk ciepła z jej produktów spalania w kotle parowym. Prace nad realizacją projektu Fusina rozpoczęto w 2004 r. Głównym celem zamierzenia było opracowanie i sprawdzenie nowej konstrukcji palnika wodorowego o niskiej emisji tlenków azotu (poniżej 100 mg/N m³). W pierwszym etapie dokonano modyfikacji komory spalania turbiny gazowej typu GE10 w celu dostosowania jej do nowego paliwa czyli czystego wodoru. Zwiększenie dopływu powietrza pierwotnego przy zachowaniu stosowania pary przyniosło obniżenie emisji NOx po zastąpieniu gazu ziemnego wodorem. W elektrowni Fusina badana była praca turbiny spalającej mieszaninę wodoru i powietrza, zwłaszcza pod kątem zużycia łopatek i komory spalania. Elektrownia Fusina składa się z turbiny typu GE10-1 spalającej wodór wytwarzany jako produkt uboczny w pobliskich zakładach chemicznych Marghera. Gaz ten jest dostarczany rurociągiem o długości 2,5 km pod ciśnieniem 27 bar. Czystość wodoru wynosi co najmniej 96%. Turbina posiada prostą konstrukcję o pionowej komorze spalania. Spaliny wylotowe z turbiny są kierowane do odzyskiwanego kotła parowego. Znaczna ilość ciepła jest dodatkowo odzyskiwana ze spalin dzięki kondensacji zawartej w nich wilgoci. Kondensat po oczyszczeniu zostaje wprowadzony do obiegu wodnego przyległego bloku parowego 320 MW. Ta oryginalna współpraca z sąsiadującym blokiem energetycznym pozwala na zwiększenie jego mocy elektrycznej o 4 MW. Zatem wodorowy blok w Fusina w istocie dostarcza łącznie 16 MW mocy: 12 z własnej turbiny i 4 z przyrostu mocy bloku parowego. Integracja instalacji wodorowej z blokiem parowym pozwoliła podnieść jego sprawność do 42%. Spalanie wodoru w ilości 1,3 t/h przyniosło 60 mln kWh energii elektrycznej rocznie, co pokrywa potrzeby 20 000 gospodarstw domowych. Jednocześnie unika się emisji 17 000 ton dwutlenku węgla. [6]



Rys. 6. Turbina gazowa Baker Hughes GE typu **NovoLT GT** przystosowana do pracy na 100-procentowym paliwie wodorowym

W lotnictwie silniki turbinowe opalane wodorem zamiast stosowanej dotąd ropy mogłyby przyczynić się w przyszłości do praktycznej bezemisyjności tej dziedziny transportu, skazanej dotąd na korzystanie z paliw węglowodorowych. Dotyczy to zarówno silników turbowentylatorowych dla dużych samolotów pasażerskich i transportowych, turbośmigłowych dla mniejszych samolotów oraz turbopropellerowych dla śmigłowców. Pierwsze demonstratory technologii wykorzystujące lotnicze silniki turbinowe opalane wodorem powstały już w latach 1980-tych m.in. w biurze konstrukcyjnym Tupolewa w b. ZSRR. Prace nad samolotami komunikacyjnymi przyszłości o napędzie wodorowym prowadzą obecnie firmy Airbus i Boeing. Największym problemem jest zapewnienie miejsca wewnątrz płatowca dla relatywnie większych zbiorników wodoru zamiast dotychczasowych zbiorników ropy lotniczej.



Rys. 7. Koncepcja samolotu wodorowego. Zbiorniki paliwa umieszczone są w górnej części kadłuba, nad kabiną pasażerską.

8. Siemens AG, *Hydrogen Solutions. Your partner for sustainable hydrogen generation*, Erlangen, 2018.
9. U.S. Department of Energy, *U.S. Department of Energy Hydrogen Program*, Washington D.C.

7. BIBLIOGRAFIA

1. Tadeusz Chmielniak, Sebastian Lepszy, Paweł Mońka, *Energetyka wodorowa – podstawowe problemy*, *Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal*, 2017; Tom 20; Zeszyt 3, s. 55–66; ISSN 1429-6675.
2. European Commission, *Hydrogen Energy and Fuel Cells. A vision of our future*, Brussels, 2003
3. International Energy Agency - *The Future of Hydrogen. Seizing today's opportunities. Report prepared by the IEA for the G20, Japan*. June 2019.
4. International Renewable Energy Agency, *Hydrogen from Renewable Power. Technology Outlook for the Energy Transition*, September 2018.
5. Janina Molenda, *Energetyka Wodorowa – Technologie i Perspektywy*, Raport Ekspertów Sektora OZE 200.
6. Piotr Olszowiec, *W Wenecji pracuje pierwsza przemysłowa elektrownia na wodór*, *Energia Gigawat*, nr 2-3/2011.
7. Shell Deutschland Oil GmbH, *Shell Hydrogen Study. Energy of the future? Sustainable Mobility through Fuel Cells and H₂*, Hamburg 2017.