

Piotr TOMCZYK\*

## Szanse i bariery rozwoju energetyki wodorowej

**STRESZCZENIE.** Energetyka wodorowa to pojęcie, które pojawiło się na przełomie XX i XXI wieku, w związku z przewidywanym wzrostem roli H<sub>2</sub> jako wtórnego nośnika energii w gospodarce światowej. Wtórny nośnik energii jest również elektryczność, która obecnie dominuje w sektorze energetycznym. Obydwa te nośniki będą współtworzyły energetykę wodorową, w pewnych obszarach mocno jednak między sobą konkurując. Energetyka wodorowa obejmuje swoim zakresem trzy etapy funkcjonalne: wytwarzania, magazynowania i transportu oraz energetycznego wykorzystanie wodoru. Idea energetyki wodorowej niesie w sobie ogromne korzyści ekonomiczne, społeczne i polityczne. Szanse i bariery jej rozwoju zależą w zasadzie od tego w jakich obszarach nastąpi istotny postęp naukowy i techniczny, czy będą to obszary tradycyjnych technologii energetycznych czy dopiero powstającej energetyki wodorowej.

**SŁOWA KLUCZOWE:** energetyka wodorowa, nośnik energii, wodór, ogniwo paliwowe

### Wprowadzenie

Dominującym nośnikiem energii we współczesnych systemach energetycznych jest elektryczność. Jest to wtórny nośnik energii, a więc musi być wytwarzany z wykorzystaniem pierwotnych jej źródeł, takich jak paliwa kopalne, biomasa, energia słoneczna, energia wiatru i wody (hydroenergia) lub energia reakcji jądrowych. Nie jest to nośnik uniwersalny:

---

\* Dr hab. — Wydział Energetyki i Paliw AGH, Kraków; e-mail: ptomczyk@agh.edu.pl

w systemie transportowym (pochłaniającym 30% światowego zużycia energii) stosowane są dzisiaj głównie przetworzone paliwa płynne, w przyszłości mogą to być metanol, benzyny syntetyczne lub biopaliwa, ale mogą to być również inne substancje chemiczne, na przykład zmagazynowane w akumulatorach elektrochemicznych, czy też elektryczność bezpośrednio gromadzona w superkondensatorach.

Czy możliwe jest aby w przyszłości dominującą rolę w sektorze energetycznym odgrywał wodór? Jest mało prawdopodobne aby wodór mógł stać się jedynym i uniwersalnym wtórnym nośnikiem energii. Elektryczność, chociażby ze względu na jej rolę w telekomunikacji, systemach informatycznych i elektronice a także na łatwość konwersji na prawie wszystkie inne formy energii lub jej nośniki, będzie nadzwyczaj trudna do zastąpienia. Trudno sobie też wyobrazić gwałtowną zmianę technologii i metod działania w świetnie rozwiniętym i sprawnie działającym sektorze energetycznym, od lat utrwalającego swoją pozycję na rynku komercyjnym. Dlaczego więc coraz powszechniej mówi się, w szczególności w najbardziej rozwiniętych gospodarczo krajach świata, o gospodarce wodorowej (ang. hydrogen economy), energetyce wodorowej a nawet o społeczeństwie wodorowym (ang. hydrogen community) (Crabtree, Dresselhaus, Buchanan 2004; Turner 1999; Wald 2004)? Stosowanie przejaskrawionej terminologii jest charakterystyczne dla czasów w jakich żyjemy w celu eksponowania elementów nowości i zmian; niewątpliwym wpływem na taki sposób przekazywania informacji ma również konieczność pozyskiwania źródeł finansowania dla realizacji nowych idei, a przez to bardziej ekspresyjny sposób docierania do społeczeństwa (no i, oczywiście, ośrodków decyzyjnych). Załóżmy więc, że chodzi raczej o współwykorzystanie w przyszłości dwóch nośników energii: elektryczności i wodoru. Jakie są jednak podstawy aby antycypować rosnącą rolę wodoru jako nośnika energii i jakie są zagrożenia dla obecnego modelu systemów energetycznych? Poniżej wymieniono główne przyczyny, które sprzyjają takiemu rozwojowi sytuacji:

1. Wyczerpywanie się zasobów paliw kopalnych przy jednoczesnym wzroście popytu na energię. Złoża najważniejszych strategicznie surowców energetycznych, takich jak ropa naftowa i gaz ziemny znajdują się na ograniczonych obszarach, z dala od największych konsumentów tych surowców i często w państwach niepewnych politycznie. Powoduje to, że dla zapewnienia sobie chociażby ograniczonego bezpieczeństwa energetycznego, państwa lub organizacje państw poszukują alternatywnych źródeł energii, bazujących na lokalnych surowcach. Mimo że wodór w stanie wolnym prawie na Ziemi nie występuje, jego obecność w związkach chemicznych jest bardzo powszechna. W skorupie ziemskiej, hydrosferze i atmosferze udziały atomowy i wagowy wodoru wynoszą odpowiednio 15,4% i 0,87%. Ze względu na wielość i różnorodność metod i technologii pozyskiwania wodoru z tych związków (patrz Rozdział 3: Technologie produkcji wodoru) jest bardzo prawdopodobne, że w warunkach specyficznych dla danego kraju lub obszaru uda się rozwinąć odpowiednią technologię pozwalającą na komercyjne otrzymywanie wodoru z miejscowego surowca lub źródła (na przykład, na drodze zgazowania węgla lub biomasy).

2. Rozwijanie przyjaznych dla środowiska technologii energetycznych. Jeżeli do produkcji wodoru pozyskiwać się będzie energię ze źródeł odnawialnych lub, w przypadku użycia paliw kopalnych, stosowany będzie wychwyty i składowanie CO<sub>2</sub>, to paliwo wodorowe może być wytwarzane bez emisji gazów cieplarnianych oraz, praktycznie, z zanie-

dbywanie małym skażeniem powietrza, wód i gleby. Ponieważ w powrotnym procesie przemiany wodoru na energię użyteczną, na przykład w silnikach cieplnych lub ogniach paliwowych, jedynym produktem reakcji jest woda, więc i ten etap wykorzystania wodoru jest przyjazny dla środowiska.

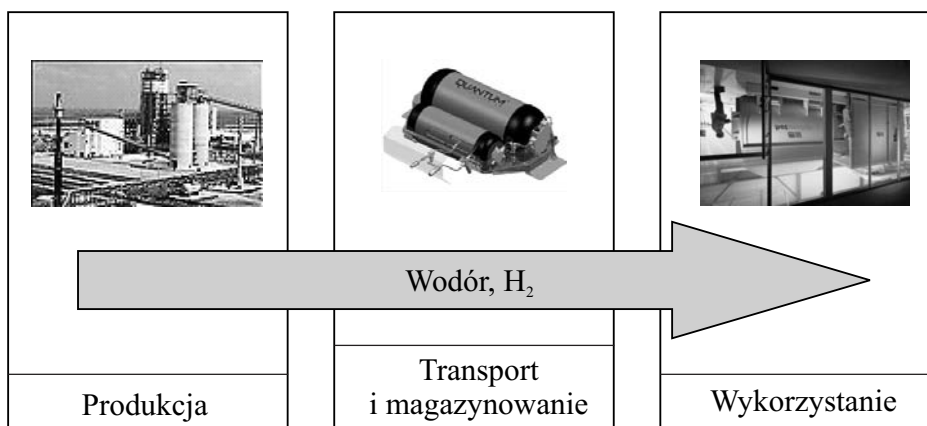
3. Konieczność racjonalizacji gospodarowania energią, na przykład poprzez jej magazynowanie w okresach obniżonego popytu. W stosunku do elektryczności, wodór może być magazynowany taniej, w zasobnikach o znacznie większej pojemności „energetycznej”. Całkowita sprawność konwersji dla obiegu zamkniętego: energia → produkcja wodoru → magazynowanie wodoru → energia może okazać się wyższa niż dla obiegu: energia → produkcja elektryczności → magazynowanie elektryczności → energia. Ograniczone możliwości magazynowania energii elektrycznej (w sposób pośredni i bezpośredni) są dzisiaj zasadniczą przeszkodą na drodze, na przykład, do skonstruowania samochodu elektrycznego; zasobniki energii o dużej pojemności i mocy pozwoliłyby również na znaczną oszczędność energii elektrycznej dzięki poprawie jej jakości oraz lepszemu zarządzaniu podażą.

Celem tego artykułu nie jest omówienie wszystkich aspektów tzw. energetyki wodorowej: jest to zagadnienie rozległe obejmujące wiele dyscyplin nauki a przez to wymagające obszernego opracowania: takie próby – bardziej lub mniej udane – zostały podjęte, a odpowiednie wydania książkowe są dostępne na rynku (Hydrogen as... 2008, Press i in. 2009, Tomczyk 2008). W przedstawionej pracy starano się poddać pewne aspekty tego zagadnienia krytycznej analizie, uwypuklić mniej znane jego elementy, a także zaprezentować słabe i mocne strony energetyki opartej na wodorze.

## 1. Energetyka wodorowa – etapy, obieg wodoru

Energetyka wodorowa obejmuje swoim zakresem trzy etapy funkcjonalne: produkcję, magazynowanie i transport oraz wykorzystanie paliwa wodorowego. Pod nazwą wykorzystanie rozumieć należy konwersję wodoru na pożądaną energię, najczęściej na energię elektryczną w ogniach paliwowych. Schematycznie, etapy te przedstawione zostały na rysunku 1.

Jest dość oczywiste, że przyszłość gospodarki wodorowej zależeć będzie od jej konkurencyjności rynkowej w stosunku do innych rozwiązań energetycznych, przy czym istotny wpływ na ostateczne rozstrzygnięcie będą miały wzrastające ceny kopalnych surowców energetycznych oraz możliwości adaptacji tradycyjnych technologii energetycznych do nowych warunków, na przykład poprzez podniesienie efektywności tych technologii. Ponieważ energetyka wodorowa dopiero zaczęła się rozwijać (jest tzw. „wschodzącą technologią”, ang. emerging technology), więc rozstrzygającym czynnikiem będzie postęp naukowy w tej dziedzinie. Inwestycje w badania i rozwój obarczone są wysokim ryzykiem niepewności osiągnięcia zamierzonych celów, zaś perspektywa zwrotu nakładów często może ulec przesunięciu poza rynkowy horyzont czasowy, tak więc niezbędne są na tym etapie wysokie dotacje rządowe i międzynarodowe.



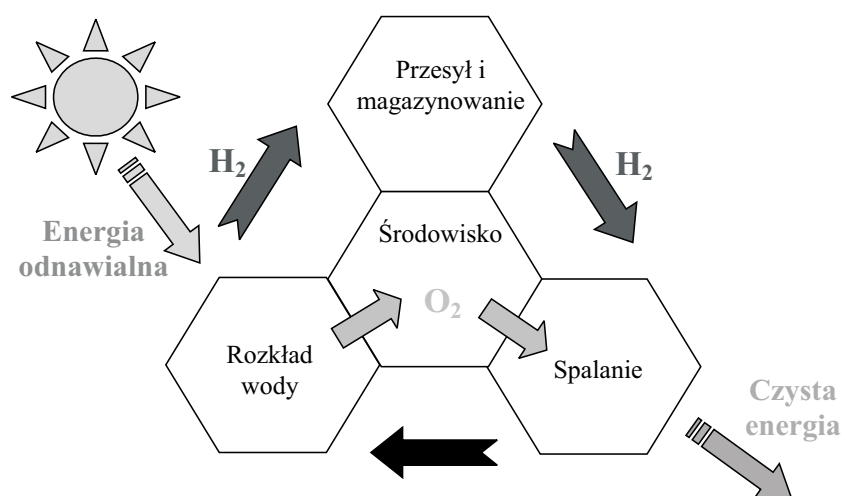
Rys. 1. Energetyka wodorowa jako sieć powiązań pomiędzy produkcją, transportem i magazynowaniem oraz wykorzystaniem wodoru jako wtórnego nośnika energii

Fig. 1. Hydrogen economy as a network of connections between production, transportation and storage as well as utilization of hydrogen as a secondary energy carrier

Istotnym zagadnieniem jest, który z etapów funkcjonalnych jest obszarem krytycznym dla rozwoju energetyki wodorowej, w związku z tym, gdzie w pierwszej kolejności powinien zostać skoncentrowany wysiłek uczonych oraz skierowany strumień pieniędzy. W zasadzie, obecne technologie wodorowe nie spełniają wymagań stawianych każdemu z trzech etapów funkcjonalnych: pierwszą i najważniejszą wadą jest zbyt wysoki koszt produkcji, magazynowania i wykorzystania wodoru w stosunku do obecnie stosowanych rozwiązań energetycznych bazujących na pierwotnych źródłach energii. Choć dzisiaj w energetyce wodorowej stosuje się w większości rozwiązania i technologie prototypowe, których koszty przy szerokim zastosowaniu i masowej produkcji muszą ulec znacznemu obniżeniu, to widoczne jest, że nie nastąpi to ani szybko ani łatwo. Po pierwszych, bardzo optymistycznych ocenach na początku wieku XXI, odpowiednie prognozy zostały skorygowane i wprowadzenie pełnych wdrożeń spodziewane jest dopiero po roku 2025 ([http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_economy](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy)).

Do tej pory największą wagę przykładano do praktycznych osiągnięć we wszystkich etapach funkcjonalnych uznając, że sukces wdrożenia gospodarki wodorowej zależy w równej mierze od powodzenia w każdym z tych etapów. Tymczasem, pewne rozwiązania gospodarki wodorowej już wkraczają do obecnych technologii, zajmują w niej ważne miejsce i w sposób ewolucyjny podlegają dalszemu doskonaleniu. Tak jest z technologią IGCC (ang. Integrated Gasification Combined Cycle) w elektrowniach, gdzie węgiel, zamiast bezpośredniego spalania w kotłach pyłowych, poddawany jest zgazowaniu a otrzymany wodór kierowany jest do turbin gazowych, których strumień gazów wylotowych zasila z kolei system parowy, pracujący w obiegu Clausiusa-Rankine'a. Dzięki takiemu rozwiązaniu uzyskuje się istotne podniesienie sprawności elektrowni cieplnej i obniża się koszty oddzielenia CO<sub>2</sub> z gazów wylotowych. Podobnie jest z powszechnie już używanymi akumulatorami Ni-MH, której jedna z elektrod jest elektrodą wodorową, wykorzystującą zdolności magazynowania H<sub>2</sub> w materiale elektrodowym.

Pojawiają się również inne argumenty popierające energetykę wodorową, do których dotychczas nie przywiązywano dużej wagi. Jednym z nich jest możliwość wykorzystania zamkniętego w środowisku obiegu wodoru, tak jak dzieje się to w sposób naturalny dla obiegu wody lub węgla (Hydrogen as...2008). Schemat takiego obiegu przedstawiony został na rysunku 2. Składa się on z trzech głównych etapów: rozkładu wody z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii (ogniwa fotowoltaiczne, turbiny wiatrowe, hydroelektrownie, elektrownie biomasowe), magazynowania i transportu wodoru do miejsc jego energetycznego wykorzystania oraz konwersji wodoru na energię użyteczną w ogniwach paliwowych lub silnikach cieplnych z wytworzeniem wody.



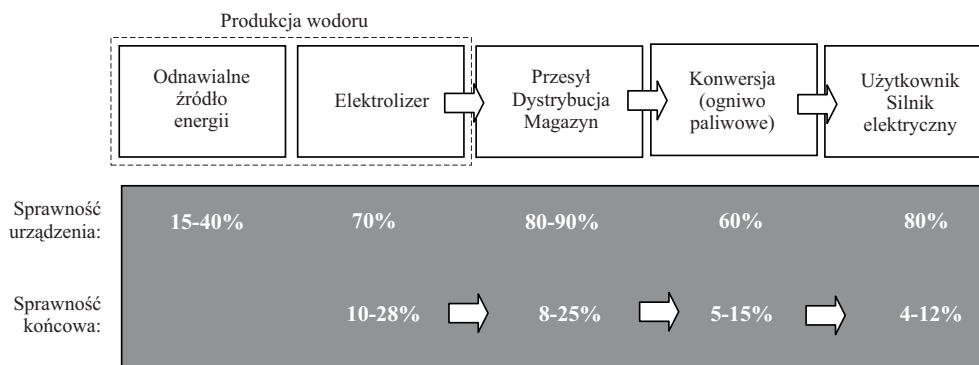
Rys. 2. Zamknięty obieg wodoru

Fig. 2. Closed hydrogen cycle

Sprawność tego obiegu, przy zastosowaniu obecnych technologii, jest niestety bardzo niska i wynosi od 4 do 12% (Bossel 2004). Główną przyczyną jest mała efektywność konwersji energii pochodzącej ze źródeł odnawialnych na energię elektryczną; inną przyczyną jest to, że energia elektryczna jest w tym obiegu wytwarzana dwukrotnie: każdorazowo ze znacznymi stratami. Sama idea konstrukcji takiego obiegu pokazuje możliwość energetycznego wykorzystania wodoru bez zakłócenia procesów naturalnych przebiegających w środowisku i przez to zachęca do dalszych prac i badań, które skutkowałyby podniesieniem jego efektywności.

## 2. Technologie produkcji wodoru

W tytule rozdziału specjalnie użyto terminu „produkcja” a nie „wytwarzanie” wodoru, bowiem w okresie stosowania elementów gospodarki wodorowej w sektorze energety-



Rys. 3. Realizacja obiegu wodorowego w praktyce

Fig. 3. Hydrogen cycle in practice

cznym, zużycie paliwa wodorowego będzie znacznie przekraczać dzisiejszą wielkość około 500 mld m<sup>3</sup> (w warunkach normalnych) w ciągu roku (Srinivasan 2006). Tylko około 1% tej ilości H<sub>2</sub> zużywa się obecnie dla celów energetycznych! Niczym nie jest więc uzasadnione stwierdzenie, że obecnie widoczny jest jakiegokolwiek wpływ wprowadzania elementów gospodarki wodorowej do energetyki światowej.

Obecnie, na skalę przemysłową wodór wytwarzany jest głównie dla potrzeb przemysłu chemicznego, do syntezy amoniaku i metanolu, a także w przemyśle petrochemicznym. Około połowa produkowanego wodoru otrzymywana jest z gazu ziemnego, jedna trzecia z płynnych paliw węglowodorowych, jedna piąta z węgla, a tylko 4% uzyskiwane jest na drodze elektrolizy wody. Poniżej podano główne metody produkcji wodoru:

1. Konwersja paliw węglowodorowych:

- ✧ reforming parowy,
- ✧ półspalanie związków węglowych bogatych w wodór,
- ✧ konwersja autotermiczna.

2. Zgazowanie węgla:

- ✧ parowe zgazowanie węgla,
- ✧ wodór z gazu koksowniczego (piroliza).

3. Otrzymywanie wodoru z biomasy:

- ✧ biogaz,
- ✧ gaz syntezowy ze zgazowania biomasy.

4. Elektroliza wody:

- ✧ w elektrolizerach alkalicznych,
- ✧ w elektrolizerach polimerowych,
- ✧ wysokotemperaturowa elektroliza pary wodnej.

5. Termiczny rozkład wody.

6. Metody niekonwencjonalne:

- ✧ fotosynteza użyciem katalizatorów biologicznych,
- ✧ fotokatalityczny rozkład wody.

Szersze omówienie tych technologii czytelnik może znaleźć w literaturze (Hydrogen as...2008, Press i in. 2009, Tomczyk 2008).

Stale najtańszym źródłem wodoru jest gaz ziemny, jednak kurczące się zasoby „niebieskiego paliwa”, a także dążenia eksporterów do maksymalizacji zysków oraz rozgrywki polityczne z ich udziałem powodują, że coraz większe zainteresowanie zaczyna wzbudzać alternatywny surowiec energetyczny: węgiel. Perturbacje z dostawą gazu ziemnego, jakie miały miejsce w okresie ostatnich lat (zwłaszcza kryzys gazowy z początku 2009 r.) spowodowały, że do uruchomienia produkcji wodoru z gazu syntezowego otrzymywanego na drodze zgazowania węgla przygotowują się producenci nawozów sztucznych w Polsce: Zakłady Azotowe Kędzierzyn i Zakłady Azotowe Puławy. Powoduje to, że w kraju, również na szczeblu centralnym a także z wykorzystaniem funduszy UE, coraz intensywniej wspiera się badania i prace rozwojowe nad zgazowaniem węgla, w tym nad zgazowaniem podziemnym oraz zgazowaniem węgla brunatnych. Sukces tych przedsięwzięć otworzyłby zupełnie nowe perspektywy dla rozwoju gospodarki wodorowej w Polsce, której rola w przyszłym krajowym systemie energetycznym była dotychczas zupełnie pomijana.

Większość wymienionych powyżej technologii produkcji wodoru to technologie dojrzałe, stosowane obecnie w przemyśle na dużą skalę. Na podkreślenie zasługują jednak nowatorskie metody wytwarzania wodoru, oparte na rozkładzie wody, takie jak wysokotemperaturowa elektroliza pary wodnej, termiczny rozkład wody oraz fotokatalityczny rozkład wody. Nie wykorzystuje się w nich bezpośrednio coraz droższych surowców energetycznych, w szczególności gazu ziemnego i ropy naftowej, a więc perspektywicznie powinno to ustabilizować i obniżyć koszty produkcji wodoru. W dwóch pierwszych technologiach, droga energia elektryczna zostaje zastąpiona, całkowicie lub w znacznym stopniu, tanią energią cieplną. Stwarza to możliwość utylizacji odpadowej energii cieplnej z procesów przemysłowych, rozważa się również możliwość zastosowania ciepła operacyjnego z wysokotemperaturowego reaktora jądrowego a także skoncentrowanej energii słonecznej. Energia promieniowania słonecznego jest wykorzystywana również w procesie fotokatalitycznego rozkładu wody, jej udział znacznie obniża koszty energii elektrycznej zużywanej w trakcie prowadzenia elektrolizy. Niestety, stopień zaawansowania tych technologii jest jeszcze dosyć odległy od zastosowań komercyjnych, chociaż prowadzone są nad nimi intensywne badania naukowe i prace rozwojowe.

Właśnie koszty wytwarzania wodoru mogą stanowić jedno z poważniejszych zagrożeń wdrożenia gospodarki wodorowej. Bardzo rzadko znaleźć można w literaturze informację, że produkcja wodoru z surowców energetycznych wiąże się ze stratami energii (w większości procesy wytwarzania wodoru są procesami endotermicznymi i część energii zmagazynowanej w surowcach energetycznych musi być zużytkowana na wytworzenie ciepła dostarczanego do reaktorów). Minimalne procentowe straty energii w stosunku do energii chemicznej zmagazynowanej w surowcach energetycznych, poniesione w trakcie produkcji wodoru, przedstawione zostały w tabeli 1 (Kordesch, Simader 1996) – sięgają one w niektórych przypadkach aż 20%! Racjonalne gospodarowanie paliwami wymaga, aby straty te były zrekompensowane z nadwyżką w procesach wytwarzania energii z paliwa wodorowego. Spełnienie tego warunku stanowi kolejne wyzwanie stojące przed gospodarką wodorową, przynajmniej dla zastosowań, gdzie istotny udział w całym procesie produk-

cyjnym ma cena zużywanego paliwa. Tak więc, dla przykładu, sprawność generatorów stacjonarnych z ogniwami paliwowymi powinna być na tyle wysoka, aby wyrównać ponoszone w procesie konwersji straty w stosunku do energii zużywanej w coraz bardziej udoskonalanych silnikach cieplnych; czy też efektywność elektrowni pracujących w systemie IGCC powinna co najmniej dorównywać elektrowniom z kotłami węglowymi pracującymi w warunkach nadkrytycznych. Energetyka wodorowa nie ma wyłączności na to aby tylko dla technologii z nią związanymi dokonywał się postęp naukowy i techniczny. Dlatego o tym, która technologia będzie dominowała na rynku komercyjnym w przyszłości zadecydują konkretne osiągnięcia w danym obszarze nauki i techniki.

TABELA 1. Minimalne straty energetyczne ponoszone przy produkcji wodoru z udziałem różnych surowców energetycznych/nośników energii

TABLE 1. Minimal losses of chemical energy in production of hydrogen from various energy rough materials/energy carriers

	Gaz ziemny (CH <sub>4</sub> )	LPG (CH <sub>2,6</sub> )	Nafta	Ciężkie frakcje naftowe	Węgiel	Woda
Minimalne straty energii kJ/kmol H <sub>2</sub>	41 280	37 500	38 350	59 300	57 150	242 000
Minimalny % strat	14,5	13,2	13,4	20,1	20,0	100

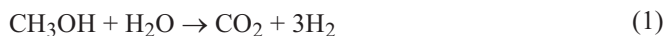
### 3. Magazynowanie i transport (przesył) wodoru

W tym etapie funkcjonalnym energetyki wodorowej rozwijane są technologie dające możliwość łatwego, bezpiecznego oraz taniego magazynowania i transportu wodoru. Wydawałoby się, że problem ten najłatwiej rozwiązać pośrednio, dzięki syntetycznym paliwom płynnym, które mogą być łatwo konwertowane na paliwo bogate w wodór lub bezpośrednio zasilać ogniwa paliwowe. Niestety, często nie spełniają one innych warunków wymienionych na wstępie, takich jak niska cena oraz bezpieczeństwo użytkowania. Dobrym przykładem jest tutaj hydrazyna N<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, stosowana jako paliwo w rakietach NASA. Jej zastosowanie w ogniwach paliwowych w połowie XX w. przyniosło spektakularne sukcesy. Z drugiej strony hydrazyna jest bardzo toksyczna a proces jej wytwarzania jest bardzo energochłonny. To spowodowało, że obecnie prawie nie stosuje się jej w ogniwach paliwowych, tym bardziej w tych, służących do celów energetycznych. Duże natomiast nadzieje wiąże się z metanolem, który mimo jego toksyczności wykazuje szereg zalet:

(a) reforming metanolu prowadzony jest w temperaturach 200–300°C (a więc wyraźnie niższych niż reforming metanu) na niedrogim katalizatorze miedzianym w mieszaninie z tlenkami innych metali, np. Cu/ZnO lub Cu/ZnO/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,

(b) zawartość wodoru w otrzymanym gazie procesowym jest wysoka i wynosi około 75%, gdyż reakcja zachodzi głównie zgodnie z równaniem:





(c) zawartość siarki w tym paliwie jest na bardzo niskim poziomie, tak więc generator H<sub>2</sub> może praktycznie nie być wyposażony w kosztowny i skomplikowany układ odsiarczania. Również zawartość tlenku węgla w otrzymanym gazie jest wtedy znacznie niższa niż w przypadku reformingu metanu. Jest to szczególnie korzystne dla małych reformerów zasilających urządzenia przenośne z ogniwami paliwowymi, gdzie wymagania czystości paliwa wodorowego są bardzo wysokie, w szczególności względem związków siarki i CO.

Najczęściej stosowane sposoby bezpośredniego magazynowania wodoru zostały przedstawione w tabeli 2 (Hydrogen as...2008). W tabeli 2 podano również główne parametry charakteryzujące różnego rodzaju zbiorniki wodoru.

TABELA 2. Charakterystyka zbiorników wodoru wykorzystujących różne zjawiska do magazynowania H<sub>2</sub>

TABLE 2. Characteristics of hydrogen containers, which utilized various phenomena of H<sub>2</sub> storage

Zjawisko wykorzystane do magazynowania wodoru	Masa H <sub>2</sub> magazynowana w 1 m <sup>3</sup> urządzenia /kg m <sup>-3</sup>	Procentowy udział masy wodoru w masie urządzenia/%	Ciśnienie wodoru/bar	Temperatura magazynowania/K
Sprężony wodór (zbiorniki kompozytowe)	max. 33	13	800	298
Ciekły wodór	71	100	1	21
Wodorki metali	max. 150	2	1	298
Adsorpcja	20	4	70	65
Wodorki kompleksowe	150	18	1	298
Wodorki alkaliczne (nieodwracalne)	>100	14	1	298

O ile przechowywanie wodoru w zbiornikach stacjonarnych nie stanowi specjalnego problemu (najczęściej są to zbiorniki sprężonego gazu lub zbiorniki krioskopowe), o tyle ciągle nie udało się osiągnąć zadawalających wyników dla magazynowania wodoru w pojemnikach przeznaczonych dla samochodów używających H<sub>2</sub> jako paliwa. Celem jest osiągnięcie zdolności zmagazynowania 5–7 kg H<sub>2</sub> w objętości około 60–70 litrów, czyli odpowiadającej średniej pojemności zbiornika na paliwa płynne w samochodach z silnikiem spalinowym. Obecnie, najmniejsze zbiorniki wodoru w samochodach osobowych zajmują objętość ok. 200 litrów.

Dzisiaj, jak to już zostało zaznaczone we Wprowadzeniu do tego artykułu (punkt 3), znacznie łatwiej, taniej i efektywniej magazynuje się wodór niż konkurencyjny nośnik energii: elektryczność. Postęp naukowy i techniczny, w szczególności w zakresie akumulatorów elektrochemicznych (również akumulatorów przepływowymi), superkondensatorów, bezwładnościowych zasobników energii (kół zamachowych), nadprzewodzących zasobników energii czy też kompresyjnego magazynowania energii (tzw. elektrowni na

sprężone powietrze), może jednak zmienić tę sytuację i to zarówno dla stacjonarnych zasobników energii jak i samochodów elektrycznych. Z drugiej strony, prowadzone obecnie intensywne prace badawcze nad nowymi sposobami magazynowania wodoru mogą doprowadzić do istotnego postępu i w tej dziedzinie, powodując umocnienie się pozycji energetyki wodorowej w przyszłym sektorze energetycznym.

#### 4. Wysoka sprawność konwersji energii chemicznej wodoru w ogniwach paliwowych jako bodziec rozwoju gospodarki wodorowej

Technologie spalania wodoru w silnikach spalania wewnętrznego oraz turbinach gazowych zostały opanowane i stosowane są w praktyce. Jednak stale największe nadzieje wiąże się z wykorzystaniem wodoru jako paliwa dla ogniw paliwowych (OP). OP są elektrochemicznymi konwertorami energii chemicznej paliwa na energię elektryczną (są jednym z rodzajów ogniwa galwanicznego oprócz ogniw pierwotnych, akumulatorów i akumulatorów przepływowych) (High Temperature... 2003; Fuel Cells Compendium 2005; Larminie, Dicks 2000; Fuel Cell Technology Handbook 2003). Unikalne właściwości OP spowodowały, że od momentu ich skonstruowania (1839) zaczęto szerzej interesować się wodorem jako nośnikiem energii; w efekcie doprowadziło to do powstania idei energetyki wodorowej. Do największych zalet ogniw paliwowych należą zaliczyć:

1) wysoką sprawność przetwarzania energii chemicznej wodoru na energię elektryczną. Maksymalny współczynnik sprawności konwersji, obliczony w oparciu o prawa termodynamiki, tzw. sprawność termiczna OP wynosi:

$$\varepsilon_{ter} = \frac{\Delta G}{\Delta H} \quad (2)$$

gdzie  $\Delta G$  i  $\Delta H$  są, odpowiednio, entalpią swobodną i entalpią reakcji spalania wodoru:



W zależności od temperatury pracy ogniwa paliwowego wynosi on od 0,73 (OP wysokotemperaturowe) do 0,83 (OP niskotemperaturowe). W praktyce, maksymalna sprawność wytwarzania energii elektrycznej w generatorze z OP wodorowo-tlenowym wynosi 45–55%, w przypadku stosowania układu ogniwo paliwowe wysokotemperaturowe + mikroturbina gazowa 60–68%, zaś w przypadku wykorzystywania energii elektrycznej i cieplnej, tzw. sprawność zintegrowana zbliża się aż do 95% (Hydrogen as... 2008, Tomczyk 2007);

2) różnorodność typów ogniw paliwowych, pozwalająca na optymalizację wyboru w zależności od postawionych wymagań dotyczących paliwa, warunków pracy i mocy generatorów;

3) OP pracują cicho i prawie nie powodują skażenia środowiska;

4) sprawność generatorów z OP jest prawie niezależna od obciążenia;

5) możliwa jest budowa modułowa generatorów, pozwalająca na bieżące dostosowanie ich wielkości do zmieniających się potrzeb;

6) OP cechuje prostota konstrukcyjna;

7) istnieje możliwość współwytwarzania energii z generatorami innego typu we wspólnym systemie o wysokiej sprawności;

8) możliwy jest szybki rozruch OP;

9) istnieje możliwość budowy małych jednostek bezpośrednio u konsumentów lub w ich pobliżu (energetyka rozproszona).

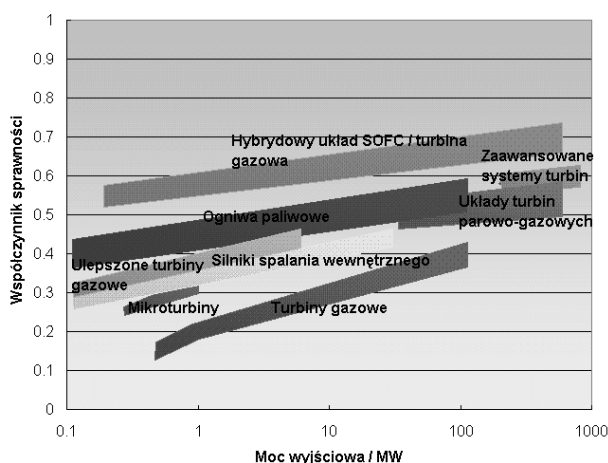
Jeżeli jednak przeanalizuje się zależności współczynników sprawności wytwarzania energii elektrycznej od mocy i rodzajów generatorów prądowórczych (rys. 4), to zauważyć można, że zaawansowane systemy turbin oraz systemy sprzężone turbin gazowo-parowych pracują ze sprawnością nie mniejszą od ogniw paliwowych. Są to jednostki dużej mocy a więc lokujące się w tzw. zawodowym sektorze energetycznym. Jeżeli uwzględni się, że energetyka działająca w oparciu o silniki cieplne:

(a) gromadzi swoje doświadczenia na rynku komercyjnym od przeszło wieku,

(b) stale unowocześnia swoje urządzenia dysponując odpowiednim kapitałem na działalność badawczo-rozwojową oraz

(c) dysponuje dedykowaną dla niej siecią dystrybucji,

to trudno wyobrazić sobie konkurencyjność ogniw paliwowych w tym obszarze produkcji energii elektrycznej.



Rys. 4. Zależności współczynników sprawności wytwarzania energii elektrycznej od rodzaju i mocy generatora prądowórczego

Fig. 4. Dependences of efficiency coefficients for electricity production on type and power of current generator

Cechy konstrukcyjne i parametry eksploatacyjne ogniw paliwowych predysponują je raczej do wykorzystania w generatorach małej i średniej mocy – od kilku watów (do zasilania urządzeń przenośnych: aparatów telefonicznych, komputerów, itp.), poprzez urządzenia o mocy kilku kilowatów (na przykład grzewcze ogniwa paliwowe do zasilania domów i mieszkań w energię elektryczną i ciepłą jednocześnie) aż do urządzeń o mocy kilku megawatów (małe elektrownie do zasilania zakładów pracy, urzędów i osiedli). Wtedy w pełni ujawniają się zalety OP, opisane w punktach 2–9.

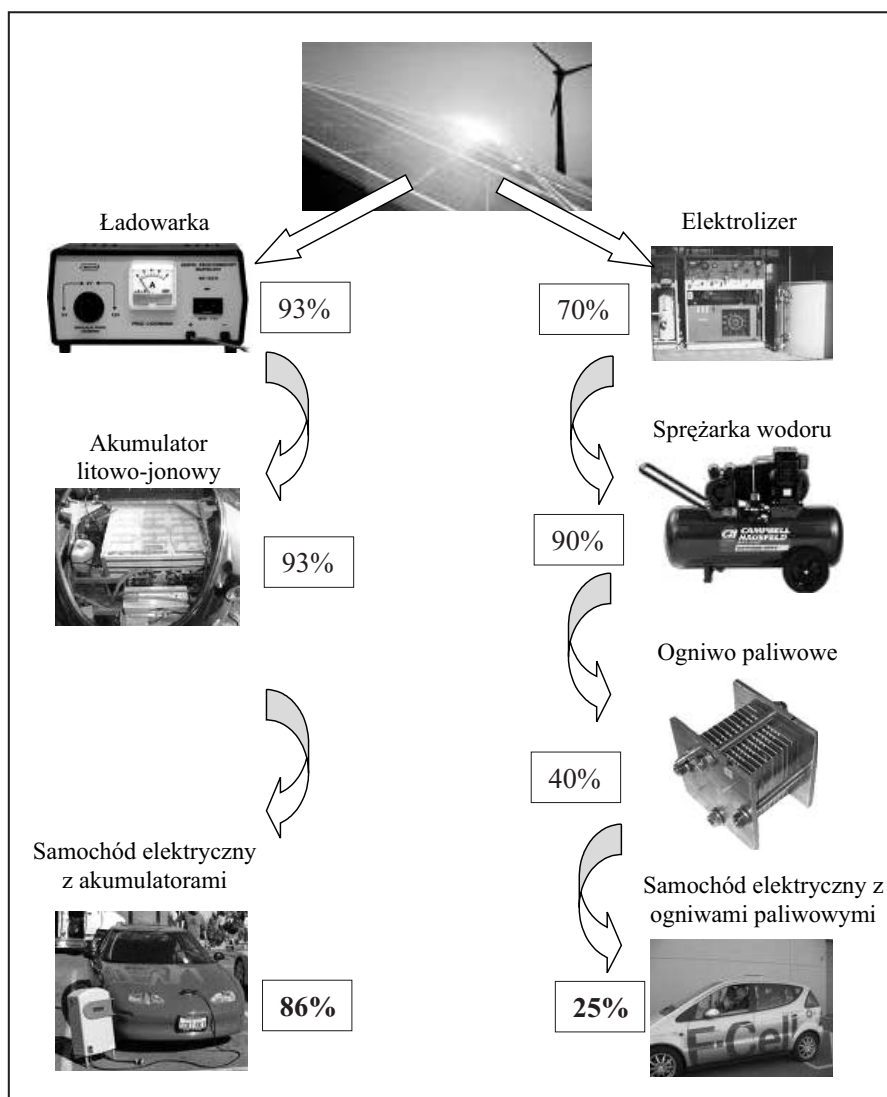
Jednym z perspektywicznych zastosowań ogniw paliwowych wodorowo-tlenowych (o mocy kilkudziesięciu do kilkuset kilowatów) jest sektor transportowy. Obecnie nie ma liczącego się koncernu samochodowego, który nie prowadził lub nie prowadzi prób z samochodami z ogniwami paliwowymi. Przykładem stałego postępu w tej dziedzinie niech będzie rozwój serii samochodów NECAR (No Emission CAR) f-my Daimler Chrysler, w których zastosowano stos ogniw paliwowych f-my Ballard jako jednostkę napędową. Inne znane firmy samochodowe opracowujące serie prototypów samochodów osobowych z ogniwami paliwowymi to Honda (typ FCX V1-5) oraz Toyota (typ FCHV3-5). Nie można również pominąć tutaj roli General Motors z jego rewolucyjną propozycją samochodu Autonomy.

O ile opracowywanie i badanie prototypów samochodów osobowych napędzanych silnikami elektrycznymi zasilanymi ogniwami paliwowymi jest bardzo efektywnym, ale stale dość odległym od powszechnego zastosowania sektorem działalności koncernów motoryzacyjnych, o tyle na ulicach coraz większej liczby miast (Vancouver, Chicago, Frankfurt, Reykjavik, Londyn) już obecnie widoczne są autobusy zasilane wodorem. Wynika to z:

- ✧ relatywnie niższego udziału kosztów stosu ogniw paliwowych w całkowitym koszcie wyprodukowania autobusu,
- ✧ możliwości tankowania autobusu wodorem przez wykwalifikowaną obsługę na niedostępnych dla ogółu mieszkańców stacjach, ulokowanych w zajezdniach,
- ✧ efektu ekologicznego i psychologicznego – pojazd nie emituje spalin w trakcie postoju w korkach ulicznych na ulicach miast,
- ✧ krótkiego czasu amortyzacji.

Ale i w tym sektorze pojawiła się konkurencja. Są to samochody elektryczne, których źródłem zasilania są akumulatory elektrochemiczne. Ich główne wady to stosunkowo wysoka cena, niewielki zasięg, czasami marne parametry eksploatacyjne i długi czas ładowania akumulatorów. Zaletą zaś jest to, co do tej pory stanowiło o przewadze samochodów z ogniwami paliwowymi nad samochodami z silnikami spalania wewnętrznego: wysoka sprawność energetyczna w trakcie eksploatacji. Na rysunku 5 pokazano gdzie ujawniają się największe straty eksploatacyjne tych dwóch rodzajów samochodów ([http://en.wikipedia.org/wiki/File:Battery\\_EV\\_vs.\\_Hydrogen\\_EV.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Battery_EV_vs._Hydrogen_EV.png)). Ogromna różnica pomiędzy współczynnikami sprawności eksploatacyjnej tych samochodów, odpowiednio 86 i 25%, ma bezpośredni wpływ na koszty ich eksploatacji. Różnica ta zwiększy się jeszcze bardziej gdy wzrosną ceny paliw płynnych w stosunku do ceny energii elektrycznej.

Przedstawiona sytuacja wskazuje na dokonującą się zmianę poglądów związanych z rolą ogniw paliwowych i wykorzystaniem ich zalet, w tym przede wszystkim wysokiej spraw-



Rys. 5. Sprawność eksploatacyjna samochodów elektrycznych z akumulatorami i ogniwami paliwowymi

Fig. 5. "Grid-to-wheel" efficiency for electric cars with reversible batteries and fuel cells

ności konwersji. Hipotetyczny obszar zastosowań OP ulega zawężeniu, staje się jednak lepiej zdefiniowany pod względem oczekiwań i wymagań konstrukcyjnych koniecznych dla określonych zastosowań. W pewnych obszarach, jak choćby sektor transportu, nie wszystko zostało już wyjaśnione: bardzo dużo zależy będzie od technologicznego rozwoju akumulatorów elektrochemicznych, w tym od poprawy ich parametrów eksploatacyjnych takich jak pojemność elektryczna, prąd obciążenia, żywotność, bezawaryjność oraz szybkość ładowania. Nie bez znaczenia będą również koszty produkcji i „żywotność” ogniw paliwowych i akumulatorów.

## Podsumowanie

W tzw. gospodarce wodorowej mimochodem pomniejsza się rolę innego, obok wodoru, wtórnego nośnika energii, jakim jest elektryczność. Tymczasem, właśnie postęp naukowy i techniczny w obszarach związanych z elektrycznością może przyczynić się do niepowodzenia pewnych rozwiązań proponowanych dla energetyki wodorowej. Nie można bowiem wykluczyć, że w przyszłości nastąpi istotne udoskonalenie technik magazynowania i produkcji energii elektrycznej, którego efekty ekonomiczne będą przewyższać efekty ekonomiczne i socjalne związane z wprowadzeniem energetyki wodorowej. Tak więc postęp naukowy i techniczny może z jednej strony okazać się poważnym zagrożeniem, z drugiej szansą rozwoju gospodarki wodorowej w zależności od tego, w jakim obszarze będzie on szybszy i bardziej radykalny.

Oparcie energetyki na nośniku energii jakim jest wodór, niesie z natury swojej obietnice ogromnych korzyści społecznych:

- ✧ obfitości energii,
- ✧ wysokiej efektywności konwersji w procesach energetycznych,
- ✧ poszanowania środowiska w procesach produkcji energii (wyeliminowanie efektu cieplarnianego),
- ✧ niezawodności systemów energetyki rozproszonej.

Gospodarka wodorowa wskazuje również na możliwość odmiennego, do dzisiejszego, modelu rozwoju motoryzacji: poprzez wprowadzenie samochodów elektrycznych napędzanych energią wytwarzaną z ogniwi paliwowych wodorowo-tlenowych. I tu może pojawić się konkurencja w postaci samochodów wykorzystujących energię zmagazynowaną w akumulatorach elektrochemicznych, o ile tylko postęp w zakresie akumulatorów będzie odpowiednio znaczący.

Dla tych korzyści, gospodarka wodorowa będzie zdobywała coraz mocniejszą pozycję w sektorze energetyki, przynajmniej w tych elementach, które okażą się opłacalne ekonomicznie, społecznie i politycznie. Jak każda nowa idea, wniesie ona na pewno swój wkład w rozwój cywilizacyjny społeczeństw.

*Praca finansowana z badań statutowych AGH 11.11.210.118.*

## Literatura

- [1] BOSSEL U., 2004 – Renewable Energy World, s. 155.
- [2] CRABTREE G.W., DRESSELHAUS M.S., BUCHANAN M.V., 2004 – Physics Today, t. 57, s. 39.
- [3] Fuel Cells Compendium, Red. N.P. Brandon, D. Thompset, Amsterdam, Elsevier, 2005.
- [4] Fuel Cell Technology Handbook, Red. G. Hoogers G., Boca Raton, CRC Press, 2003.
- [5] High Temperature Solid Oxide Fuel Cells: Fundamentals, Design and Applications. Red. S.C Singhal K., Kendall, Amsterdam, Elsevier, 2003.
- [6] [http://en.wikipedia.org/wiki/File:Battery\\_EV\\_vs.\\_Hydrogen\\_EV.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Battery_EV_vs._Hydrogen_EV.png)

- [7] [http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen\\_economy](http://en.wikipedia.org/wiki/Hydrogen_economy)
- [8] Hydrogen as a Future Energy Carrier. Red. A. Zuttel, A. Borgschulte, L. Schlapbach, Weinheim, Wiley-VCH Verlag GmbH&Co, 2008.
- [9] KORDESCH K., SIMADER G., 1996 – Fuel Cells. Weinheim, VCH.
- [10] LARMINE J., DICKS A., 2000 – Fuel Cell Systems Explained. Chichester, John Wiley & Sons.
- [11] PRESS R.J., SANTHANAM K.S.V., MIRI M.J., BAILEY A.V., TAKACS G.A., 2009 – Introduction to hydrogen technology. Hoboken, John Wiley@ Sons. Inc.
- [12] SRINIVASAN S., 2006 – Fuel Cells. From Fundamentals to Applications, New York, Springer.
- [13] TOMCZYK P., 2007 – Podstawy termodynamiczne ogni w paliwowych. Biuletyn Polskiego Stowarzyszenia Wodoru i Ogni w Paliwowych, t. 2, s.41–48.
- [14] TOMCZYK P., 2008 – Energetyka wodorowa. [W:] Odnawialne i niekonwencjonalne źródła energii. Poradnik, Kraków, TARbonus, s. 535–614.
- [15] TURNER J.A., 1999 – Science t. 285, s. 687.
- [16] WALD M.L. 2004 – Czy nadzieje era wodoru. Świat Nauki, t. 154, s. 41–47.

Piotr TOMCZYK

## Prospects and obstacles of hydrogen economy development

### Abstract

The term “hydrogen economy” has appeared at the break of XX and XXI century, due to expected grow of H<sub>2</sub> importance as a secondary energy carrier in the world economy. The other energy carrier is also electricity, which now dominates in the energy sector. Both these carriers will participate in hydrogen economy, although in some areas they will also compete for priority role in power sector. The hydrogen economy consists of three functional steps: production, storage and transportation as well as utilization of hydrogen fuel for useful energy. The idea of hydrogen economy offers enormous economic, social and political benefits. However, prospects for its development mainly depend in which area will occur significant scientific and technical achievements either in traditional power technology or emerging hydrogen economy.

KEY WORDS: hydrogen economy, energy carrier, hydrogen, fuel cell

