



Tadeusz CHMIELNIAK*, Sebastian LEPSZY**, Paweł MOŃKA***

Energetyka wodorowa – podstawowe problemy

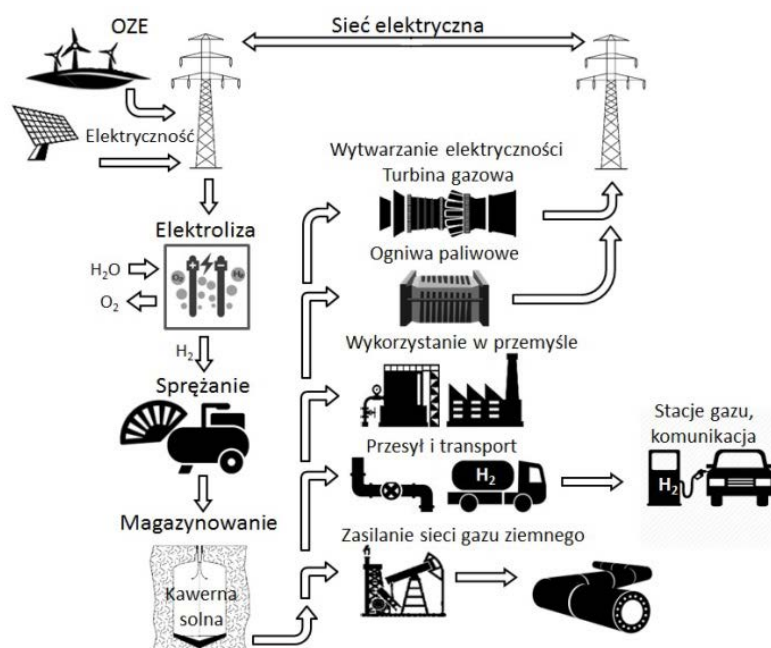
STRESZCZENIE: W ostatnich latach w wielu ośrodkach badawczych skupia uwagę na zagadnieniach energetyki wodorowej. Mimo, że nie wszystkie opinie dotyczące jej potencjału techniczno-ekonomicznego są pozytywne, to wiele przygotowanych prognoz i analiz scenariuszowych pokazuje jej perspektywiczne znaczenie w wielu obszarach gospodarki. Rozwój technologii wodorowej wiąże się z przeprowadzaniem badań i analiz, obejmujących różne obszary technologiczne, w tym wytwarzanie, transport wodoru, jego magazynowanie i zastosowanie w energetyce oraz do napędu środków transportu. Wybór odpowiedniej strategii jest kluczowy dla dalszego spostrzegania szans na rozwój technologii wodorowych. W artykule przedstawiono przegląd zasadniczych problemów dotyczących produkcji wodoru, następnie wskazano na zagadnienia jego transportu i magazynowania. W ostatniej części przedyskutowano zastosowania wodoru w energetyce stacjonarnej i w transporcie samochodowym. Uwagę skupiono na badaniach koniecznych do podjęcia w najbliższej przyszłości. Przedstawiono krótką informację o stanie badań w Polsce.

SŁOWA KLUCZOWE: wodór, produkcja wodoru z wykorzystaniem OZE, składowanie wodoru, transport i energetyczne technologie wodorowe

* Prof. dr hab. inż., ** Dr inż., *** Mgr inż. – Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska; e-mail: Tadeusz.Chmielniak@polsl.pl

Wprowadzenie

Pojęcie „energetyka wodorowa” obejmuje zespół procesów i modułów technologicznych począwszy od etapu wytwarzania, poprzez jego magazynowania, transport do konwersji w pożądaną postać energii końcowej. Analizowane są różne metody produkcji wodoru oraz jego energetycznego przetwarzania. Przedstawia się wiele scenariuszy rozwoju tej klasy technologii (Winter 2005; Solomon i Banerjee 2006; Eames 2007; Ball i Wietschel 2009; Technology 2015; DOE 2016). Odnoszą się one do głównych modułów konwersji: od źródeł energii pierwotnej poprzez wodór do energii elektrycznej. Większość analiz (choć nie wszystkie, zob. np.: Bossel 2006) wskazuje, że wodór może w najbliższej i dalszej perspektywie będzie ogrywać ważną rolę w rozwiązywaniu technologicznych i ekologicznych problemów energetyki i transportu. Na rysunku 1 pokazano najczęściej dyskutowane obecnie zagadnienia związane z upowszechnieniem wodoru w tych obszarach gospodarki.



Rys. 1. Produkcja, magazynowanie i możliwe obszary zastosowań wodoru

Fig. 1. Production, storage and possible applications of hydrogen

W artykule przedstawiono przegląd zasadniczych problemów dotyczących produkcji wodoru, następnie wskazano na zagadnienia jego transportu i magazynowania. W ostatniej części przedyskutowano zastosowania wodoru w energetyce stacjonarnej i w transporcie samochodowym.

1. Wytwarzanie wodoru

W stanie wolnym w środowisku ziemskim wodór jest rzadkością (w powietrzu atmosferycznym suchym jego stężenie wynosi 0,5 ppm). Wykorzystanie wodoru do celów energetycznych wymaga jego wyodrębnienia z innych substancji, występujących powszechnie w przyrodzie. Może on być produkowany z szeregu paliw węglowodorowych (węgiel, ropa, gaz ziemny), a także z wykorzystaniem odnawialnych źródeł energii i wody.

Obecnie na świecie wytwarza się około 40 mln ton wodoru rocznie, co stanowi około 1% światowego zapotrzebowania na energię pierwotną (The hydrogen economy 2006; Chmielniak 2014). Na skalę przemysłową produkowany jest on głównie z gazu ziemnego przy wykorzystaniu procesu parowego reformingu metanu (SMR – *Steam Methan Reforming*), który jest obecnie najtańszą opcją produkcji wodoru (Chmielniak 2014; Ke Liu i in. red. 2010; Hydrogen production and storage 2005; McHugh 2005; Holladay i in. 2019; Acar i Dincer 2014). Ponadto do komercyjnie dostępnych technologii produkcji wodoru z gazu ziemnego należą: (Chmielniak 2014) proces częściowego utleniania (POX – *Partial Oxidation* lub CPOX – *Catalitical Partial Oxidation*), łączący oba powyższe reforming autotermiczny (ATR – *Autothermal Reforming*), katalityczna dehydrogenacja, piroliza, elektroliza. W różnym stadium rozwoju są: procesy fotokatalityczne, reforming plazmowy, reaktory membranowe, procesy biologiczne.

Dekarbonizacja energetyki wymaga, aby dalszy rozwój energetyki wodorowej był związany z wykorzystaniem do produkcji wodoru energii źródeł odnawialnych. Obecnie dominującą technologią jest elektroliza wody. W tabeli 1 przedstawiono charakterystykę dwóch podstawowych rodzajów elektrolizerów konkurujących na rynku w chwili obecnej (E4tech 2014; Godula-Jopek 2015; Millet i Grigoriev 2013; Kotowicz i in. 2017).

Są to komercyjnie dostępne elektrolizery typu alkalicznego i elektrolizery z polimerową membraną wymiany protonów (PEM). Dla zwiększenia efektywności procesów wytwarzania wodoru konieczne są dalsze wysiłki badawcze. W tabeli 2 pokazano zakres tych badań (na podstawie Technology 2015). Obok klasycznych technologii elektrolizy z wykorzystaniem odwrotnych reakcji charakterystycznych dla ogniw alkalicznych i polimerowych proponuje się wykorzystanie elektrolizerów wysokotemperaturowych (tlenkowych), co może prowadzić do wyższych sprawności.

2. Transport i magazynowanie wodoru

W zależności od przeznaczenia wodór jest obecnie sprężany do różnych ciśnień końcowych (US DRIVE 2013; Witkowski 2017):

- ◆ do transportu rurociągowego: wysoka wydajność, średnie ciśnienie 2–7 MPa, wysoka niezawodność pracy,

TABELA 1. Właściwości elektrolizerów (na podstawie: E4tech 2014; Godula-Jopek 2015; Millet i Grigoriev 2013; Kotowicz i in. 2017)

TABLE 1. Properties of the electrolyzer

Dane techniczne	Elektrolizer alkaliczny	Elektrolizer PEM
Technologia	dojrzała	dojrzała
Elektrolit	25–30% roztwór KOH lub NaOH	stały polimer kwasu perfluorosulfonowego (PFSA) np. Nafion
Nośnik ładunku	OH-	H+
Materiał katody	nikiel	platyna
Materiał anody	nikiel/kobalt/żelazo	iryd/ruten
Zakres temperatur pracy [°C]	20–120	20–90
Zakres ciśnień [MPa]	0,1–20	0,1–5 (70)
Standardowe gęstości prądu [A/cm^2]	0,2–0,5	0,6–3,0
Napięcie pojedynczej komórki elektrolitycznej [V]	1,8–2,4	1,8–2,2
Sprawność [%]	50–82	65–90
Zużycie energii komórek elektrolitycznych [$kWh/Nm^3 H_2$]	4,2–5,9	4,2–5,6
Zużycie energii generatora wodoru [$kWh/Nm^3 H_2$]	4,5–7,0	4,5–7,5
Wydajność produkcji H_2 [Nm^3/h]	1–500	0,01–250
Najniższe częściowe obciążenie [%]	20–40	0–0
Możliwość obciążenia cyklicznego	średnie	dobrze
Trwałość komórki elektrolitycznej [h]	<100 000	10 000–50 000
Żywotność generatora [lat]	20–30	10–20
Właściwości wody zasilającej	w postaci ciekłej	dejonizowana, opór właściwy $\rho > 1 M\Omega \cdot cm$
Koszt urządzenia [Euro/kW]	500–1000	1000–3200

- ◆ terminale końcowe: średnia wydajność, wysokie ciśnienie 35 MPa, wysoka niezawodność,
- ◆ stacje tankowania samochodów: małe wydajności, wysokie ciśnienie 70–90 MPa, wysoka niezawodność (wodór kriogenicznie wykroplony do tankowania samochodów: $-253^\circ C$, 70 MPa, wodór gazowy do tankowania samochodów: 20 do $60^\circ C$, ciśnienie do 70 MPa) (teoretyczna energia niezbędna do izotermicznego sprężenia wodoru od 2 do 35 MPa wynosi 1,05 kWh/kg oraz tylko 1,36 kWh/kg wodoru przy sprężeniu wodoru do 70 MPa),
- ◆ składowanie w kawernach: ciśnienie minimalne 5,8 MPa, ciśnienie maksymalne 17,5 MPa. Spośród wielu możliwych sposobów magazynowania wodoru największe znaczenie wydają się mieć:
 - a) podziemne składowanie wodoru,
 - b) zbiorniki ciśnieniowe,
 - c) skraplanie wodoru i kriogeniczne jego przechowywanie,
 - d) wykorzystanie wodorków metali i nanostruktur węglowych.

TABELA 2. Kierunki doskonalenia technologii elektrolizerów (na podstawie: Technology 2015)

TABLE 2. Directions for improvement of electrolyzer technology

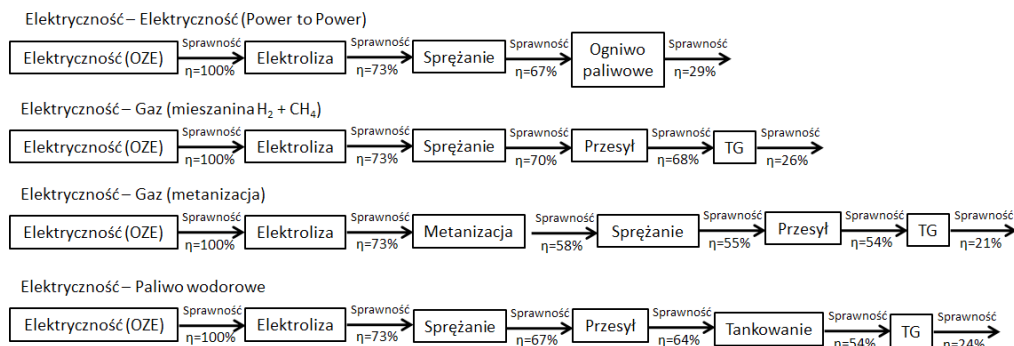
Urządzenie	Zakres prac	Przedział czasowy
Elektrolizery. Zagadnienia ogólne	Optymalizacja technologii z naciskiem na redukcję kosztów. Kluczowe obszary rozwoju obejmują zwiększoną elastyczność eksploatacyjną poprzez poprawę szybkości uruchomienia oraz zmniejszenie zużycia energii na biegu luzem.	2020–2030
Elektrolizery polimerowe	Redukcja kosztów do 800 USD za kW poprzez optymalizację produkcji membran polimerowych, bardziej odpornych i o obniżonej zawartości katalizatora. Zwiększenie sprawności do ponad 80% (HHV). Zwiększenie żywotności do co najmniej 50 000 godzin. Zwiększenie mocy stosu do kilku MW. Zwiększenie całkowitej mocy instalacji energetycznej do skali 100 MW. Zwiększenie szybkości rozruchu w celu dostosowania się do wymogów rynku energii elektrycznej, regulacji pierwotnej.	2025–2030
Elektrolizery alkaliczne	Zmniejszenie nakładów inwestycyjnych do poziomu poniżej 900 USD za kW. Zwiększenie sprawności do ponad 75% (HHV). Zwiększenie gęstości prądu dzięki wyższej temperaturze i ciśnieniu roboczym. Zmniejszenie kosztów eksploatacji i konserwacji. Zwiększenie elastyczności operacyjnej poprzez obniżenie minimalnego obciążenia. Zwiększenie ciśnienia roboczego, aby zminimalizować konieczność sprężania wodoru.	2025–2030
Elektrolizery tlenkowe	Doprowadzenie do wdrożeń na skalę przemysłową. Zwiększenie żywotności do co najmniej 20 000 godzin przy dynamice degradacji poniżej 8% rocznie. Osiągnięcie minimalnego poziomu elastyczności operacyjnej odpowiadającej wymaganiom rynku energii.	2025–2030

3. Energetyczne wykorzystanie wodoru

Obecnie godne uwagi są przede wszystkim możliwości technologiczne związane z wytwarzaniem wodoru z taniych źródeł odnawialnych. Na ogół rozpatruje się następujące ścieżki technologiczne energetycznego wykorzystania wodoru (rys. 2):

- ◆ Elektryczność – Elektryczność (*Power to Power*) .
- ◆ Elektryczność – Gaz (mieszanina H₂ + CH₄).
- ◆ Elektryczność – Gaz (metanizacja).
- ◆ Elektryczność – Gaz (paliwo wodorowe).

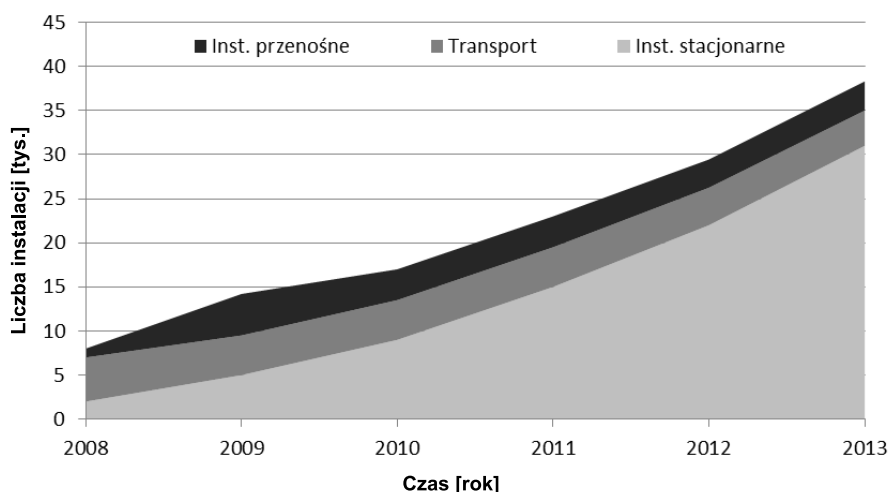
Wszystkie wymienione technologie mogą znaleźć uzasadnienie ekonomiczne wtedy, gdy do produkcji wodoru wykorzystamy nadmiarową produkcję elektryczności ze źródeł odnawialnych. Nie wykluczając w pewnych sytuacjach wykorzystania turbin gazowych jako silników do napędu generatorów elektryczności, największe nadzieje wiąże się z ogniwami paliwowymi



Rys. 2. Ognia technologiczne i ich sprawność w procesach konwersji wodoru

Fig. 2. Technology steps and their efficiency in hydrogen conversion processes

zarówno do zastosowań stacjonarnych, jak i mobilnych. Współczesny stan rozwoju technologicznego ogniw paliwowych wskazuje zarówno na ich zastosowanie do budowy stacjonarnych instalacji generacji energii elektrycznej i ciepła, jak i zastosowanie w rozwiązaniach napędowych (głównie osobowy i ciężarowy transport samochodowy). W pierwszym obszarze rozpatruje się zastosowanie ogniw do budowy instalacji generacji rozproszonej. W drugim obszarze zastosowań dominują te w samochodach osobowych. Według Departamentu Energii USA globalny rynek ogniw paliwowych wzrósł niemal czterokrotnie między latami 2008 a 2013 (Fuel Cell 2014). Tylko w 2013 r. przyrost zainstalowanej mocy ogniw paliwowych wynosił ponad 170 MW (Technology 2015; Fuel Cell 2014) (rys. 3). Obecnie ponad 80% instalacji ogniw paliwowych to jednostki stacjonarne.



Rys. 3. Upowszechnienie ogniw paliwowych (na podstawie: Technology 2015; Fuel Cell 2014)

Fig. 3. Dissemination of fuel cells

Obecny stan rozwoju ogniw do energetycznych zastosowań stacjonarnych ilustruje tabela 3. Wynika z niej, że najdojrzalsze konstrukcyjnie są ogniwa fosforowe (PAFC). Mają one jednak stosunkowo niski potencjał wzrostu sprawności i obniżenia kosztów inwestycyjnych. Jak już stwierdzono, w rozwiązaniach mobilnych największy potencjał mają ogniwa polimerowe. Tabela 4 zawiera dane określające aktualny stan rozwoju tej technologii wraz z infrastrukturą dodatkową.

TABELA 3. Podstawowe charakterystyki techniczno-ekonomiczne ogniw paliwowych (na podstawie: Technology 2015; DOE 2016)

TABLE 3. Basic technical and economical characteristics of fuel cells

Technologia	Moc	Sprawność	Początkowe nakłady inwestycyjne	Żywotność (trwałość)	Stan rozwoju technologii
Alkaliczne ogniwa paliwowe	do 250 kW	około 50% (HHV)	200–700 USD/kW	5–8 tys. h	wstępne stadium rynkowe
Polimerowe ogniwa stacjonarne	0,5–400 kW	32–49% (HHV)	3000–4000 USD/kW	60 tys. h	wstępne stadium rynkowe
Ogniwa tlenkowe	do 200 kW	50–70% (HHV)	3000–4000 USD/kW	do 90 tys. h	instalacje demonstracyjne
Ogniwa fosforanowe	do 11 MW	30–40% (HHV)	4000–5000 USD/kW	30–60 tys. h	dojrzała do wdrożenia
Ogniwa węglanowe	kW – szeregu MW	ponad 60% (HHV)	4000–6000 USD/kW	20–30 tys. h	wstępne stadium rynkowe

4. Badania w Polsce

Trudno dokładnie ustalić, jaki jest obecnie stan badań w zakresie energetyki wodorowej w Polsce. Niewątpliwie niektóre ośrodki badawcze rozpatrują cząstkowe zadania w omawianym obszarze. Dotyczą one wybranych zagadnień ogniw paliwowych (pewne zadania w zakresie ogniw wysokotemperaturowych prowadzono w Projekcie Strategicznym Zaawansowane Technologie Pozyskiwania Energii – 2010–2015, Instytut Energetyki, Politechnika Warszawska, Politechnika Śląska) oraz zagadnień produkcji i magazynowania wodoru a także układów hybrydowych. Według informacji autorów stosunkowo kompleksowe badania były podjęte i są prowadzone w Projekcie Magazynowanie energii w postaci wodoru w kawernach solnych (Konsorcjum Hestor: Grupa LOTOS SA – Lider, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Górnictwa Surowców Chemicznych „CHEMKOP”, Politechnika Śląska, Politechnika Warszawska). Program obejmuje zagadnienia wytwarzania (elektroliza), transportu, magazynowania (poszukiwanie kawern solnych, ładowanie, wyładowanie, scenariusze energetycznego wykorzystania wodoru). Program ten jest w trakcie realizacji. Z innych badań należy wymienić analizy dotyczące wskazań perspektywicznych struktur geologicznych do magazynowania wodoru (Tarkowski 2016) oraz analizy systemowe różnych opcji energetycznego wykorzystania wodoru.

TABELA 4. Obecny stan rozwoju technologii transportowych polimerowych ogniw paliwowych oraz infrastruktury transportowej (na podstawie: Technology 2015; DOE 2016)

TABLE 4. Current state of development technology of transport Polymer fuel cells and Transport infrastructure

Technologia	Moc lub wydajność	Sprawność	Początkowe nakłady inwestycyjne	Żywotność (trwałość)	Stan rozwoju technologii
Polimerowe ogniwa transportowe	80–100 kW	do 60%(HHV)	około 500 USD/kW	do 5 tys. h	wstępne stadium rynkowe
Sprężarki 18 MPa	–	88–95%	70 USD/kW H ₂	20 lat	dojrzały do wdrożenia
Sprężarki 70 MPa	–	80–91%	200–400 USD/kW H ₂	20 lat	wstępne stadium rynkowe
Instalacje skraplania	15–80 MW	ok. 70%	800 – 2000 USD/kW	30 lat	dojrzały do wdrożenia
Zbiorniki wodoru w samochodzie, 70 MPa	5–6 kg H ₂	ok. 100% (bez uwzględnienia sprężenia)	17–33 USD/kWh (dla 10–500 tys. produkowanych instalacji w ciągu roku)	15 lat	wstępne stadium rynkowe
Zbiorniki ciśnieniowe	0,1–10 MWh	ok. 100% (bez uwzględnienia sprężenia)	6 000–10 000 USD/MWh	20 lat	dojrzały do wdrożenia
Składowanie w stanie stałym	0,1–100 GWh	straty odparowania 0,3% na dobę	800–10 000 USD/MWh	20 lat	dojrzały do wdrożenia
Rurociągi	–	95% (łącznie ze sprężaniem)	Obszary wiejskie: 300 tys. – 1.2 mln USD/km; Obszary miejskie: 700 tys. – 1,5 mln USD/km (w zależności od średnicy)	40 lat	dojrzały do wdrożenia

Podsumowanie

Uzyskanie postępu w rozwoju energetyki wodorowej wymaga wielu dalszych badań podstawowych i rozwojowych. Dotyczy to całego łańcucha procesów konwersji (rys. 2). Obok doskonalenia samych ogniw paliwowych ważne znaczenia mają procesy poprawy funkcjonowania wszystkich pozostałych modułów, w tym magazynowania wodoru, jego transportu i dystrybucji oraz tankowania (tab. 4) oraz, co wydaje się najważniejsze, udoskonalenie procesu elektrolizy (tab. 3). Niewątpliwie ważne jest także poszukiwanie efektów synergicznych w wykorzystaniu

połączenia hybrydowego modułów pokazanych w poszczególnych ścieżkach technologicznych pokazanych na rysunku 2. W produkcji elektryczności ogniwa wysokotemperaturowe mogą stanowić moduł układów hybrydowych.

Dla zastosowań stacjonarnych głównym zadaniem jest zwiększenie sprawności i żywotności, natomiast dla ogniw w zastosowaniach transportowych istotne jest obniżenie nakładów inwestycyjnych. Ogniwa paliwowe przewidziane do zastosowań stacjonarnych będą w najbliższej perspektywie podstawą instalacji kogeneracyjnych małej mocy oraz instalacji rezerwowych w przypadkach braku dostępu do pewnego zasilania (szpitale, instalacje komputerowe i inne). Należy w tym miejscu wskazać na istotną rolę w upowszechnianiu technologii ogniw paliwowych w energetyce kogeneracyjnej japońskiego programu *Ene Farm* rozwoju instalacji mikrokogeneracyjnych z ogniwami polimerowymi i tlenkowymi o mocy elektrycznej 0,7–1 kW. Program rozpoczęto w 2009 r. Od chwili uruchomienia programu sprzedano ponad 120 000 jednostek (2014). Program przewiduje wprowadzenie na rynek do 2030 r. milion instalacji. Początkowe dofinansowanie wynosiło 15 000 USD na jedną instalację (o koszcie całkowitym 45 000 USD). W 2014 r. dofinansowanie państwa zmniejszono do 4 000 USD (koszt jednostkowy 19 000 USD). Dominują instalacje z ogniwami polimerowymi. Ze względu na fakt, że w strukturze kosztów instalacji kogeneracyjnej małej mocy nakłady na ogniwo paliwowe są rzędu jedynie 15%, nie należy oczekiwać dalszego istotniejszego obniżenia cen instalacji kogeneracyjnych.

Dla dalszego rozwoju energetyki wodorowej opartej na generacji wodoru ze źródeł odnawialnych podstawowe znaczenie ma prognozowany rozwój samochodów napędzanych wodorowymi ogniwami paliwowymi. Według ([Transitions 2013](#)) w scenariuszu wzrostu temperatury do 2°C po 2025 roku nastąpi gwałtowny wzrost liczby pojazdów z napędem wodorowym. W USA ich liczba w 2040 r. może przekroczyć 25 mln. Cena samochodu z napędem wodorowym powinna nie przekraczać ceny samochodów konwencjonalnych w 2030 r. (ok. 33 tys. USD), a koszt eksploatacji w 2040 (0,6 kg H₂/100 km). W artykule skupiono uwagę na aspektach ostatniej ścieżce wytwarzania i wykorzystania wodoru zaznaczonej na rysunku 2. Nie wyklucza to innych możliwości ekonomicznego rozwoju energetyki wodorowej. Zastosowanie wodoru w instalacjach turbin gazowych przedstawiono na przykład w ([Chmielniak i in. 2015](#)).

Opisane badania powstały w ramach projektu pt. „Magazynowanie energii w postaci wodoru w kawernach solnych” dofinansowanym ze środków NCBiR w ramach programu GEKON (Umowa Nr GEKON1/O2/214140/23/2015) oraz badań statutowych Instytutu Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach.

Literatura

- ACAR, C. i DINCER, I. 2014. Comparative assessment of hydrogen production methods from renewable and non-renewable sources. *I. Journal of Hydrogen Energy* 39, s. 1–12.
- BALL, M. i WIETSCHER, M. 2009. The future of hydrogen – opportunities and challenges. *I. Journal of Hydrogen Energy* 34, s. 615–622.

- BOSSEL, U. 2006. *Does a Hydrogen Economy Make sense?* Proceedings of the IEEE.
- CHMIELNIAK i in. 2015 – CHMIELNIAK, T., LEPSZY, S. i CZAJA, D. 2015. *Instalacje Turbiny Gazowej w Energetyce i Przemysle*. Gliwice: Wyd. Pol. Śląskiej.
- CHMIELNIAK, T.M. 2014. Badania symulacyjne technologii wytwarzania wodoru w aspekcie emisji CO₂ w cyklu – wydobywanie, transport i przetwórstwo węgla. Gliwice: Wyd. Pol. Śląskiej, ISBN 978-83-7880-143-6.
- DOE Hydrogen and Fuel Cell Technologies Program Record, 2015, 2016.
- E4tech Sàrl with Element Energy Ltd for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking: Development of Water Electrolysis in the European Union Final Report., February 2014.
- EAMES, M. 2007. Towards a sustainable hydrogen economy: A multi-criteria sustainability appraisal of competing hydrogen futures. *I. Journal of Hydrogen Energy* 32, s. 4611–4626.
- Fuel Cell Technologies Market Report, DOE 2014.
- GODULA-JOPEK, A. 2015. *Hydrogen production by electrolysis*. Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA.
- HOLLADAY i in. 2009 – HOLLADAY, J.D., HU, J., KING, D.L. i Wang, Y. 2009. An overview of hydrogen production technologies. *Catalysis Today* 139, s. 244–260.
- Hydrogen production and storage, R&D Priorities and Gaps; International Energy Agency, IEA Hydrogen Implementing Agreement, 2005; [Online] Dostępny w <http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/hydrogen.pdf> [Dostęp: 13.10.2016].
- KE LIU, CHUNSHAN SONG, VELU SUBRAMANI (Eds); A John Wiley & Sons, 2010. *Hydrogen and Syngas Production and Purification Technologies*. Inc., Publication.
- KOTOWICZ i in. 2017 – KOTOWICZ, J., WĘCEL, D., OGULEWICZ, W. i JURCZYK, W. 2017, *Raport końcowy z zadania 8 „Analiza warunków pracy elektrolizerów, kompresorów sprężających wodór do magazynu i turbin gazowych”, realizowanego w ramach projektu „Magazynowanie energii w postaci wodoru w kavernach solnych”*. Produkcja wodoru z energii elektrycznej, IMiUE Pol. Śląska.
- MCHUGH, K. 2005. *Hydrogen Production Methods*. MPR Associates Inc.
- MILLET, P. i GRIGORIEV, S. 2013. *Renewable Hydrogen Technologies. Production, Purification, Storage, Applications and Safety*. Chapter 2 Water Electrolysis Technologies. Elsevier ISBN: 978-0-444-56352-1.
- SOLOMON, B.D. i BANERJEE, A. 2006. A global survey of hydrogen energy research, development and policy. *Energy Policy* Vol. 34, 7, May 2006, s. 781–792.
- TARKOWSKI, R. 2016. Perspectives of using the geological subsurface for hydrogen storage in Poland. *International Journal of Hydrogen Energy*, [Online] Dostępne w: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijhydene.2016.10.136> [Dostęp: 13.10.2016].
- Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. IEA 2015.
- The hydrogen economy, a non-technical review; UNEP 2006; ISBN: 92-807-2657-9.
- Transitions to Alternative Vehicles and Fuels (National Research Council, USA, 2013).
- US DRIVE. Driving Research and Innovation for Vehicle Efficiency and Energy Sustainability. Hydrogen Delivery Technical Team Roadmap. June 2013.
- WINTER, C.J. 2005. Into the hydrogen energy economy – milestones. *I. Journal of Hydrogen Energy* 30, s. 681–685.
- WITKOWSKI, A. i in. 2017. Comprehensive analysis of hydrogen compression and pipeline transportation from thermodynamics and safety aspects. *Energy*, [Online] Dostępne w: <http://dx.doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.141> [Dostęp: 14.05.2017].

Tadeusz CHMIELNIAK, Sebastian LEPSZY, Paweł MOŃKA

Hydrogen energy – main problems

Abstract

In recent years, many research centers have focused on hydrogen energy. Although not all opinions on its technical and economic potential are positive, many prepared forecasts and scenario show its perspective in many areas of the economy. The development of hydrogen technology involves research and analysis covering various technological areas, including hydrogen generation, transportation, storage and use in power and transport. Choosing the right strategy is key to further perceiving the opportunities for hydrogen technology. The paper presents an overview of the main problems of hydrogen production, and then addresses the issues of transport and storage. Lastly, the use of hydrogen in stationary power and in car transport was discussed. Attention was paid to research needed to be undertaken in the near future. Brief information about the state of research in Poland is presented.

KEYWORDS: hydrogen, hydrogen production using RES, hydrogen storage, transport and hydrogen energy technologies

