

Możliwości powstania gospodarki wodorowej i perspektywy jej rozwoju

Autorzy: Tomasz Golec, Marcin Błesznowski - *Institut Energetyki, Pion Ciepłny*

(„Energetyka” – lipiec 2009)

Na całym świecie trwają intensywne prace naukowo-badawcze w dziedzinie gospodarki wodorowej. Jednym z takich przedsięwzięć jest projekt Roads2HyCOM (finansowany z 6. Programu Ramowego) pt. Koordynacja badań, ocena, rozpowszechnianie oraz wsparcie projektu HyCOM¹⁾.

Institut Energetyki wraz z pozostałymi partnerami wspomagał Unię Europejską w planowaniu przyszłego projektu HyCOM, przez zastosowanie metodologii oceny poszczególnych technologii wodorowych, a także oceny infrastruktury i potrzeb powstających społeczności wodorowych. Artykuł prezentuje wybrane dane dotyczące gospodarki wodorowej. Kompleksowa analiza wszystkich informacji jest dostępna na stronie internetowej projektu (www.roads2hy.com).

Wyczerpujące się zasoby paliw kopalnych, narastające zanieczyszczenie środowiska i rosnące zapotrzebowanie energii, zmuszają do doskonalenia urządzeń produkujących energię elektryczną i ciepłą. Technologie szeroko rozumianego sektora energetycznego muszą spełniać narzucone przez Unię Europejską i protokół z Kioto wymogi co do emisji tlenków azotu, tlenków węgla i innych szkodliwych związków oraz charakteryzować się wysoką sprawnością konwersji energii.

Produkcja wodoru

Pierwszym problemem, z jakim musi się zmierzyć gospodarka wodorowa, jest wytwarzanie wodoru, przyszłego nośnika energii, który nie występuje w przyrodzie w czystej postaci. Istnieje on jedynie w związkach chemicznych, stanowiących połączenie węgla i wodoru. Nie można go więc pozyskiwać jak węgla lub ropy. Potrzebne są do tego specjalne technologie produkcji, dlatego też nazywa się go wtórnym nośnikiem energii. Produkcja wodoru jako jeden z podstawowych elementów gospodarki wodorowej musi spełniać rygorystyczne wymogi ekologiczne, tak aby cały ciąg technologiczny wpływał na zmniejszenie się stopnia zanieczyszczenia środowiska.

Bezpośrednie metody i źródła wytwarzania wodoru

Gaz ziemny

Większość produkowanego obecnie wodoru pochodzi z gazu ziemnego i ropy naftowej. Otrzymywany jest on bezpośrednio jako produkt reakcji reformingu. Obecnie wyróżnia się trzy rodzaje procesu reformingu:

- reforming parowy metanu,
- częściowe utlenianie,
- proces autotermiczny (połączenie dwóch wcześniejszych procesów).

Na ogół stosuje się jeszcze proces oczyszczania gazu wylotowego z reformera, w celu osiągnięcia wymaganego stopnia czystości. Do najczęściej stosowanych metod puryfikacji zalicza się:

- selektywną adsorpcję niepożądanych związków (PSA - Pressure Swing Adsorption),
- metanizację - katalityczne przereagowanie tlenku węgla do metanu,
- reakcję WGS (water gas shift),
- membrany.

Wydajność przemysłowych reformerów gazu ziemnego dochodzi do 300 000 m³ H₂ /h. Stanowią one integralną część większej instalacji, w której zachowany jest całkowity bilans cieplny. Wydajność procesu reformingu jest różna w zależności od przyjętych założeń procesowych i odzysku ciepła. Na ogół zużycie energii dla tych jednostkowych procesów wynosi 12,6-15,7 MJ/m³ H₂ [1]. Raport [1] zaleca dostosowywanie kosztów wyprodukowanego wodoru do konkretnego przypadku i tak dla przemysłowych reformerów poniesione koszty są rzędu 5-8 USD/GJ, a w przypadku małej skali równają się 16-29 USD/GJ. Wyprodukowany wódór będzie konkurencyjny na rynku, jeśli koszty jego produkcji wyniosą 0,3 USD/kg lub 2,5 USD/GJ [2].

Optymalizacja procesu reformingu polega na rozwoju procesu puryfikacji gazu wylotowego oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych (głównie CO₂). Wiąże się to pośrednio z sekwestracją CO₂.

Cele technologiczne, jakie powinny być zrealizowane w przyszłości w ramach optymalizacji procesu reformingu gazu ziemnego, podano w tabeli 1.

Tabela 1

Opis celów technologicznych
dla procesu reformingu gazu ziemnego [3]⁷

Wyszczególnienie	Cele technologiczne			
	stan obecny	2015	2020	2030
Redukcja emisji CO ₂		> 25%		
Integracja z CCS		10–20% wychwyconego CO ₂		
Koszty H ₂ (duża skala)	7–15 euro/GJ 5–29 USD/GJ			10 USD/GJ
Całkowita sprawność (LHV)	70–85%	90%		
Żywotność	100 000 h			
Dostępność (sterownie współbieżne)	99,5%			

⁷ Dane tabelaryczne zawarte w artykule zaczerpnięte są z szeregu pozycji literaturowych, stąd też niektóre koszty wyrażone są w USD, a niektóre w euro.

Elektroliza

Kolejnym sposobem wytwarzania wodoru jest elektroliza wody. Główną wadą tej metody jest

jej wysoki koszt, co pośrednio wynika z konieczności używania platyny, jako katalizatora reakcji. Obecnie najbardziej zaawansowane technologicznie są elektrolizery alkaliczne. Najlepszą opcją przyszłej infrastruktury wodorowej wydaje się opcja zaakceptowana przez Departament Energetyki USA, która zakłada zbudowanie sieci małych elektrolizerów wysokotemperaturowych, bazujących na konstrukcji ogniwa paliwowych stałotlenkowych. Elektrolizery te pracują jako odwracalne ogniwa paliwowe, tzn. rozkładają wodę na wodór i tlen przy użyciu prądu elektrycznego i są określane skrótem HT SOE. W porównaniu z niskotemperaturowymi elektrolizerami wody zużywają one dużo mniej energii elektrycznej do procesu elektrolizy i stąd produkowany w nich wodór jest znacznie tańszy. Mogą one pracować jako generatory prądu w okresach szczytowego zapotrzebowania na energię elektryczną, np. godziny szczytu w trakcie dnia, a w nocy nadwyżkę mocy w tradycyjnych elektrowniach można wykorzystać do wysokotemperaturowej elektrolizy wody, czyli produkowania wodoru. Elektrolizery HT SOE wymagają dalszych prac w dziedzinie materiałów.

Niezależnie od rodzaju elektrolizera elektroliza wody przebiega tylko i wyłącznie przy udziale prądu elektrycznego. Zachodzi więc konieczność sprzężenia powyższej technologii z inną produkującą prąd i to najlepiej ze źródeł odnawialnych. Koszt wytworzenia wodoru jest w tym przypadku bezpośrednio związany z kosztem wykorzystywanej energii elektrycznej.

Aktualna cena elektrolizerów rzędu kilku kW waha się w granicach 1500-20 000 euro/kW, a w przeliczeniu na wyprodukowany wodór 10 000-200 000 euro/m³ H₂. Natomiast koszt megawatowych jednostek wynosi 1000-6000 euro/kW, tj. 4000-15 000 euro/m³ H₂. [2]. Powyższa technologia wymaga dalszej optymalizacji zarówno pod kątem osiągnięć, jak i redukcji kosztów.

Tabela 2
Opis celów technologicznych procesu elektrochemii [3]

Wyszczególnienie	Cele technologiczne			
	stan obecny	2015	2020	2030
Sprawność energetyczna (LHV)		> 70%		
Gęstość prądu		1 A/cm ²		
Koszt systemu		1000 euro/m ³		
Dostępność		> 99%		
Skala przepływu produktu (H ₂)		> 500 m ³ /h		
Ciśnienie pracy		3 – 5 MPa		
Skala przepływu produktu (H ₂)				
Technologia PEM		100 m ³ /h		
Żywotność				
Technologia PEM		40 000 h		
Koszt wodoru	25 euro/GJ 20–40 USD/GJ			17 USD/GJ

Energia jądrowa

Do podstawowych metod produkcji wodoru z wykorzystaniem energii jądrowej zalicza się termiczny rozkład wody i wysokotemperaturową elektrolizę. Wzrost sprawności produkcji wodoru w elektrolizerach można osiągnąć podnosząc temperaturę doprowadzanej do nich

wody (pary) do 700-1000°C. W najczęściej stosowanych lekkowodnych reaktorach jądrowych (LWR) temperatura wody w obiegu chłodzącym wynosi około 350°C. Dotyczy to zarówno reaktorów ciśnieniowych (PWR), jak też reaktorów wrzących (BWR). Możliwości wzrostu tej temperatury rysują się jednak dla reaktorów IV generacji (tab. 3). Wyrażane są poglądy, że zaliczane do IV generacji nowe reaktory energetyczne małej (do 300 MW) i średniej (600-700 MW) mocy będą lepiej spełniać wymagania dotyczące bezpieczeństwa, ochrony środowiska naturalnego, współpracy z systemem elektroenergetycznym i poziomu kosztów [1]. Przewiduje się, że powyższa technologia będzie komercyjnie dostępna dopiero w 2030 roku.

Tabela 3

Temperatura chłodziwa
oraz sprawność wybranych reaktorów jądrowych [5]

Rodzaj reaktora jądrowego	Temperatura w obiegu chłodzącym, °C	Sprawność cieplna reaktora, %
Reaktor lekkowodny (LWR)	280–320	32–34
Unowocześniony reaktor lekkowodny (ALWR)	285–330	32–35
Nadkrytyczny reaktor wodny (SCWR) ¹⁾	400–600	38–45
Wysokotemperaturowy reaktor grafitowy (HTGR)	850–950	42–48
Nadkrytyczny reaktor gazowy (S-AGR)	650–750	46–51

Oznaczenia:

LWR – light-water reactor; ALWR – Advanced light-water reactor; SCWR – supercritical water-cooled reactor; HTGR – high temperature gas-cooled reactor; S-AGR – super critical advanced gas reactor;

¹⁾ – reaktor IV generacji

Tabela 4

Charakterystyka możliwości produkcji wodoru z wykorzystaniem energii jądrowej [5]

Możliwości produkcji H ₂		Elektroliza		Procesy termochemiczne	
		woda	para	reforming CH ₄	rozkład wody
Wymagana temperatura, °C		>0	>300 dla LWR >600 dla Cu-Cl	>700	>850 dla S-I >600 dla S-AGR
Sprawność procesów chemicznych, %		75–80	85–90	70–80	>45 (zależnie od temperatury)
Sprawność, % przy wykorzystaniu reaktora:	LWR	27	30	nie dotyczy	
	HTGR, AHTR lub S-AGR	<40	40–60 zależnie od temperatury	>70	40–60 zależnie od temperatury i od cyklu pracy
Zalety		technologia sprawdzona z LWR eliminacja emisji CO ₂	można wykorzystywać przy pośrednich temperaturach eliminacja emisji CO ₂	technologia sprawdzona redukcja emisji CO ₂ o 40%	eliminacja emisji CO ₂
Wady		niska sprawność	wymagane HTGR oraz HTES	technologia oparta na gazie ziemnym tylko częściowa redukcja emisji CO ₂	agresywne procesy chemiczne technologia HTES wymaga dopracowania

Oznaczenia:

LWR – light-water reactor; S-AGR – super critical advanced gas reactor; S-I – sulfur-iodine; Cu-Cl – copper-chlorine; HTGR – high temperature gas-cooled reactor; AHTR – advanced high-temperature reactor; HTES – high-temperature electrolysis of steam.

Wzrost temperatury mógłby pozwolić wykorzystać ciepło z obiegu chłodzącego reaktora jądrowego do elektrolizy wody oraz do usprawnienia technologii reformingu metanu (mniejsze zużycie gazu ziemnego i redukcja emisji CO₂) (tab. 4). Perspektywiczne wydaje się

również wykorzystanie tego ciepła do bezpośredniej produkcji wodoru drogą reakcji termochemicznej. Jako najbardziej obiecujący wytypowano cykl reakcji siarkowo-jodowych (S-I) [2]. Z pozostałych procesów do testów laboratoryjnych został dopuszczony jedynie cykl wapniowo-bromowy.

Powyższa technologia wymaga jeszcze rozwiązania wielu technicznych zagadnień zanim możliwa stanie się rozbudowa instalacji umożliwiających bezpośrednią produkcję wodoru. Zastosowanie termochemicznych cykli wpłynie negatywnie na stopień bezpieczeństwa elektrowni jądrowej. Stosowanie w wysokiej temperaturze żrących kwasów jodu i bromu stwarza bowiem dodatkowe zagrożenie, które musi być uwzględnione na etapie projektowania. Obecnie możliwe jest tylko wykorzystywanie energii elektrycznej wytwarzanej w elektrowni atomowej do produkcji wodoru.

Pośrednie metody wytwarzania wodoru z wykorzystaniem energii elektrycznej

Energia wiatru

Najważniejsze jest optymalne umiejscowienie elektrowni wiatrowej, tak aby miała ona odpowiednie do pracy warunki meteorologiczne. Elektrownie wiatrowe powinny znajdować się w oddaleniu od miast i rejonów gęsto zabudowanych lub na morzu. Energia przez nie produkowana musi więc być transportowana siecią przesyłową do miejskich aglomeracji. Brak ciągłości dostaw i możliwe przestoje sprawiają, że operatorzy bardzo niechętnie podłączają farmy wiatrowe do sieci, tłumacząc, że powodują zakłócenia pracy sieci elektroenergetycznej. Wykorzystanie wyprodukowanej przez turbiny wiatrowe energii elektrycznej do wytwarzania wodoru w procesie elektrolizy pozwoliłoby pełniej wykorzystywać energię wiatru i polepszyłyby warunki pracy sieci elektroenergetycznych. Teoretycznie proces ten nie wymaga paliwa, a surowcem jest woda. Nie występuje więc emisja zanieczyszczeń do atmosfery, a koszty eksploatacyjne są niskie. Niestety koszty inwestycyjne są bardzo wysokie.

Koszt wytwarzanej energii zależy w znacznym stopniu od czasu wykorzystania mocy zainstalowanej. W przypadku elektrowni wiatrowych ten czas w decydującym stopniu zależy od:

- średniej rocznej prędkości wiatru w miejscu zainstalowania turbiny,
- możliwości dopasowania się odbiorcy do pobierania energii elektrycznej wówczas, gdy wieje wiatr.

Czas wykorzystania elektrowni wiatrowej nie przekracza na ogół 2500 h/rok, co stanowi mniej niż 30% jej możliwości [3]. Przeznaczenie całej uzyskanej energii elektrycznej z elektrowni wiatrowej na produkcję wodoru pozwoliłoby na jego magazynowanie w czasie nadwyżek w stosunku do bieżącego zapotrzebowania. W przypadkach konieczności ciągłej produkcji wodoru zasilanie elektrolizera z turbiny wiatrowej musiałoby być zdublowane rezerwowym zasilaniem z ogólnodostępnej sieci elektroenergetycznej. Porównanie kosztów takiego wariantu zawiera tabela 5. Koszty przedstawione w tej tabeli zostały obliczone dla instalacji o zdolności produkcyjnej 20 kg H₂/h. Zlokalizowanie tej instalacji w pobliżu odbiornika wodoru może znacznie obniżyć koszt jego przesyłu. Przy obecnych wysokich kosztach inwestycyjnych (zwłaszcza elektrolizera) rezerwowe zasilanie z sieci elektroenergetycznej spowodowałoby lepsze wykorzystanie elektrolizera, a w konsekwencji

zmniejszenie kosztów produkcji wodoru.

W miarę wzrostu cen paliw będzie rosło znaczenie produkcji wodoru z wykorzystaniem energii wiatru. W przyszłości cena energii elektrycznej produkowanej w elektrowniach wiatrowych będzie mogła być konkurencyjna w porównaniu z ceną energii elektrycznej produkowanej w elektrowniach tradycyjnych. Obecnie trudno jest jednoznacznie stwierdzić, które rozwiązanie okaże się lepsze i tańsze.

Tabela 5

Koszty produkcji wodoru z energii wiatru z uwzględnieniem zasilania rezerwowego z sieci [7]

Koszty	Technologie	Jednostki	Technologia produkcji H ₂			
			stan obecny		przyszłościowa	
			bez zasilania rezerwowego	z zasilaniem rezerwowym	bez zasilania rezerwowego	z zasilaniem rezerwowym
Koszt surowca			0	0	0	0
Koszt energii elektrycznej			3,3	3,67	1,9	2,75
Koszty oper.-ruchowe zmienne			0,44	0,17	0,06	0,04
Koszty zmienne (razem)		USD/kg H ₂	3,74	3,85	1,96	2,79
Koszty oper.-ruchowe stałe (5% kapitału /rok)			0,87	0,35	0,11	0,07
Koszty kapitałowe (18% kapitału /rok)			6,09	2,44	0,79	0,52
Oплата za emisję CO ₂				0,17		0,12
		USD/kg H ₂	10,7	6,8	2,9	3,5
		USD/GJ	86,7	56,7	24,2	29,2
		cent/m ₃	96,2	61,1	26,1	31,5
Całkowite koszty produkcji H ₂						

Energia słońca

Energetyka słoneczna opiera się na modułach/panelach ogniw słonecznych zbudowanych na monokryształach krzemu, polikrystalicznym lub bezpostaciowym krzemie (tj. ogniw PV - fotowoltaicznych baterii słonecznych). W stadium opracowania są tanie ogniwa słoneczne bazujące na tlenku tytanu modyfikowanego związkami organicznymi. Sprawność ogniw słonecznych produkowanych przemysłowo nie przekracza 12%.

W 2005 roku całkowita moc elektryczna uzyskana z systemów paneli słonecznych znajdujących się na całym świecie wyniosła 5 GW. Zakładany dalszy wzrost zainteresowania powyższą technologią ma zaowocować w 2030 roku czteroprocentowym udziałem w całkowitej światowej produkcji energii elektrycznej. Obecnie w Unii Europejskiej udział energii słonecznej w produkcji energii elektrycznej wynosi 1,4% i jest rzędu 1 GW. Najwięcej, około 700 MW, jest generowanych w Niemczech. Do czołówki państw europejskich korzystających z paneli słonecznych należą również Hiszpania, Francja i Włochy. Optymistyczne perspektywy rozwoju technologii paneli słonecznych opierają się na udokumentowanym w Niemczech wzroście rynku o 700% w latach 2002 - 2005.

Przykład bezpośrednich dopłat producentom energii odnawialnej w postaci tzw. Feed-in-Tariff (Fit) pokazuje, jak silną motywacją potrafi być koszt energii. Przemysłana polityka pieniężna może odegrać znaczącą rolę w rozwoju technologii paneli słonecznych. Dalszy rozwój technologii przyczyni się do spadku nakładów inwestycyjnych. W krajach południowej części Europy cena energii elektrycznej uzyskiwanej z paneli słonecznych

powinna być konkurencyjna w stosunku do innych metod już w 2010 roku. Natomiast przewiduje się, że w pozostałej części Europy o dużo słabszej penetracji słonecznej, nastąpi to dopiero w roku 2020. Konkurencyjność i opłacalność paneli słonecznych nie wiążą się jednoznacznie z faktem rozpoczęcia procesu produkcji wodoru. Dopiero wyprodukowanie nadwyżek energii pozwoli wykorzystywać tę technologię do produkcji wodoru.

Energia wody

Obecnie jedną piątą światowej energii elektrycznej wytwarza energetyka wodna. Ostrożne prognozy donoszą o wzroście jej produkcji o 1540 TWh/rok aż do 2030 roku.

Nadwyżkę energii fal morskich można również wykorzystywać do lokalnej produkcji wodoru. Wstępne obliczenia dotyczące tylko energii, jaką niosą ze sobą przyływy, podają wartości rzędu 2,5 TW. Energia fal i prądów morskich jest z pewnością o wiele większa i - w przeciwieństwie do przyływów - jest możliwe jej przetwarzanie na energię elektryczną w sposób ciągły. Takie kraje jak Anglia i Irlandia mogą w ten sposób wyprodukować 5% albo i więcej energii, której nadwyżka może być wykorzystana do produkcji wodoru.

Wykorzystując energetykę wodną do produkcji wodoru należy mieć na uwadze kilka aspektów:

- elektrownie o mniejszej mocy łatwiej zintegrować,
- inne metody magazynowania energii powinny być również brane pod uwagę,
- sieć przesyłowa musi być przygotowana do podłączenia tego typu jednostki,
- lokalizacja elektrowni.

Pośrednie metody wytwarzania wodoru z wykorzystaniem wyprodukowanego syngazu Węgiel

Zgazowanie węgla jest dojrzałą, aczkolwiek bardzo złożoną metodą, której przebieg jest wieloetapowy. Wydajność standardowej przemysłowej zgazowarki wynosi około 100 000 m³_n/h H₂. Zgazowanie może przebiegać z wykorzystaniem powietrza lub czystego tlenu. Stosowanie czystego tlenu wymusza budowę dodatkowego procesu jednostkowego, w którym zachodziłby rozdział powietrza. Unia Europejska ustaliła, że do 2015 roku 10-20% używanego w przemyśle wodoru ma być wyprodukowane przy zerowej emisji CO₂. Pociąga to za sobą konieczność inwestowania w rozwój technologii sekwestracji CO₂ (CCS). Obecnie są badane nowe rozwiązania technologiczne, w których etap separacji CO₂ jest zintegrowany z reaktorem zgazowania. Sumaryczna wydajność systemu wynosi około 64-68% (LHV) [6].

Tabela 6

Opis celów technologicznych procesu zgazowania węgla [3]

Wyszczególnienie	Cele technologiczne			
	stan obecny	2015	2020	2030 i później
Koszt wodoru				5 USD/GJ
Wdrożenie sekwestracji CO ₂		10–20% wychwyconego CO ₂		
Całkowita wydajność konwersji węgla do wodoru (LHV)	55%	70%		

Biomasa

Biomasa odznacza się wieloma zaletami i w niektórych rejonach może być rozpatrywana jako alternatywne źródło wodoru. Bez względu na rodzaj procesu, jaki zostanie użyty do obróbki biomasy (gazyfikacja, piroliza, fermentacja itp.) przy projektowaniu instalacji należy wziąć pod uwagę, że:

- transport znacznych ilości surowca jest bardzo kosztowny; zaleca się budowę instalacji w pobliżu źródła surowca, np. tartaku;
- wysoce rozwinięte technologie CHP są poważną konkurencją w stosunku do nowo opracowywanej technologii produkcji wodoru z biomasy;
- występuje duże zapotrzebowanie na biomasę do produkcji biopaliw.
- uprawa biomasy na dużą skalę może stanowić zagrożenie dla produkcji żywności, a tym samym zaspokojenia potrzeb żywnościowych ludzkości.

Tabela 7

Opis celów technologicznych procesu termicznych metod produkcji wodoru z biomasy [3]

Wyszczególnienie	Cele technologiczne			
	stan obecny	2015	2020	2030 i później
Integracja z CCS		10–20% wychwyconego CO ₂		
Koszt produkcji wodoru (pojedyncza jednostka procesowa – termiczna konwersja)		< 3 euro/kg		
Koszt produkcji wodoru (termiczna konwersja – zgazowanie)		1,2 euro/kg		
Koszt biomasy (termiczna konwersja –zgazowanie)		3 euro/GJ		
Sprawność masowa wytwarzania H ₂ z biomasy		> 40%	> 60%	
Sprawność usuwania smoły	90%	> 99%		

Podsumowując, jest mało prawdopodobne, aby biomasa stała się w przyszłości jednym z podstawowych źródeł wodoru. Lokalnie, w miejscach z dużymi zasobami surowca lub znacznym zapotrzebowaniem na wodór, możliwe jest oczywiście uruchomienie takiej instalacji, jednakże będą to zapewne wyjątki od reguły. Obecnie wytwarzanie wodoru z biomasy ciągle jest we wstępnej fazie rozwoju, przy czym największe nadzieje są pokładane w zgazowaniu odpadów biologicznych. Wskazane są dalsze badania z zakresu przygotowania i obróbki biomasy, separacji popiołu i puryfikacji gazu wylotowego.

Nowatorskie technologie wytwarzania wodoru

Obecnie w trakcie badań są kolejne metody wytwarzania wodoru. Duże nadzieje są wiązane z mikroorganizmami przetwarzającymi odpady bogate w węglowodory na biowodór. Wszystkie biologiczne metody można podzielić na:

- biofotolizę,
- fotofermentację,
- fermentację ciemną.

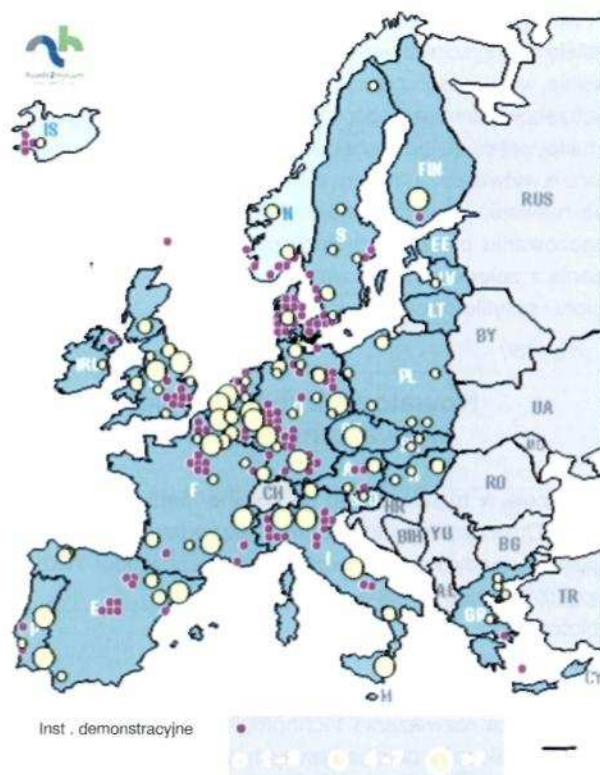
Powyższe rozwiązania technologiczne wymagają jeszcze znacznych nakładów prac badawczych i testów. Osiągnięte obecnie sprawności nie spełniają nawet minimalnych wymogów stawianych metodom produkcji wodoru [7].

Zasoby wodoru w Unii Europejskiej

Promocja oraz wdrożenie technologii wodorowych wymagają zlokalizowania produkcji wodoru, określenia skali zasobów i dostępności tego paliwa. Powiązanie tych danych z informacjami o instalacjach demonstracyjnych pozwoli określić ich stopień zaawansowania. Spośród wszystkich instalacji demonstracyjnych dominują głównie urządzenia stosowane w transporcie lub energetyce stacjonarnej. Dokładne umiejscowienie ich na mapie Europy jednoznacznie wskazuje, które społeczności są otwarte na innowacyjne rozwiązania i gdzie mogą powstać pierwsze załóżki gospodarki wodorowej.

Istotne znaczenie ma współzależność między centrami wytwarzającymi a centrami zużywającymi wodór (rys. 1). Idealnym przypadkiem jest powiązanie tych gałęzi gospodarki przez umiejscowienie obu ośrodków blisko siebie. Warto odnotowania jest fakt, że duże przedsięwzięcia z zakresu technologii wodorowych wymagają znacznych zasobów paliwa, które dzisiaj jest w stanie wytworzyć jedynie przemysł. Natomiast lokalnie można wytwarzać wodór wykorzystując źródła odnawialne. W Europie dominującymi obszarami pod względem skali produkcji wodoru są kraje Beneluksu, Zagłębie Renu, Północne Włochy i Wielka Brytania.

Według danych z 2003 roku sumaryczne zużycie wodoru kształtuje się w Europie Zachodniej na poziomie 61 bilionów m^3 , z czego około 50% stanowią potrzeby przemysłu rafineryjnego, a 32% - azotowego. Roczna produkcja wodoru wynosi natomiast około 90 bilionów m^3 wodoru. Uważa się [10], że możliwe jest otrzymanie nadwyżki od 2 do 10 bilionów m^3 wodoru, która może służyć jako paliwo dla 1-6 milionów aut. Stanowi to raptem 1,5-3% całkowitej liczby aut w Europie, jednak wystarczy to w zupełności na zaspokojenie potrzeb w fazie przejściowej pomiędzy stanem obecnym a przyszłą gospodarką wodorową.



Rys. 1. Mapa instalacji demonstracyjnych i ośrodków produkujących wodór [11]

Metody magazynowania wodoru

Ciepło spalania wodoru, równe 120 MJ/kg, jest trzykrotnie wyższe niż ciepło spalania benzyny. Ze względu na bardzo mały ciężar właściwy wodoru przechowywanie go w warunkach normalnych w postaci gazowej prowadziłoby do niewielkiej gęstości zmagazynowanej energii. Do najbardziej rozwiniętych sposobów magazynowania wodoru zalicza się: sprężanie, skraplanie, wiązanie z metalami.

Sprężony wodór

Obecnie stosuje się zbiorniki pozwalające na przechowywanie sprężonego wodoru pod ciśnieniem 70 MPa. Gęstość wodoru wynosi wówczas 40 kg/m³ i jest około 500 razy większa niż gęstość wodoru pod ciśnieniem atmosferycznym. Energia wykorzystana w procesie sprężania jest równa około 15% wartości opałowej paliwa. Wysokociśnieniowe zbiorniki muszą być budowane z odpowiednio wytrzymałych materiałów. Zbiorniki czy też butle muszą spełniać wszystkie wymogi bezpieczeństwa i być cyklicznie sprawdzane przez uprawnionego serwisanta. Przeszkodą w rozwoju omawianej technologii jest cena i znaczny ciężar zbiorników/butli. Przyjmuje się, że na 1 kg sprężonego wodoru przypada 20-30 kg materiału zbiornika.

Skroplony wodór

Skroplony wodór jest przechowywany w zbiornikach kriogenicznych. Jego gęstość jest

prawie dwukrotnie większa niż gęstość sprężonego wodoru i wynosi 50-70 kg/m³. Niestety skroplony wodór ma temperaturę wrzenia pod ciśnieniem normalnym równą -253°C i wymaga stosowania wysoko sprawnej izolacji.

Dzienne straty wodoru wskutek odparowania wynoszą przeciętnie od 0,3% do 3%. Główne wady tej technologii to znaczne zużycie energii elektrycznej, wysokie koszty oraz ryzyko niekontrolowanego odparowania zmagazynowanego wodoru.

Wodór związany z metalami w postaci wodorków

Wodorki są metalami lub stopami metali z zaadsorbowanymi molekułami wodoru na powierzchni. W ten sposób na rozwiniętej powierzchni metalu można zaadsorbować wodór w ilości nawet do 7% masy metalu. Metal podgrzewa się, umożliwiając tym samym wniknięcie sprężonego wodoru do jego wnętrza. Następnie materiał jest schładzany i molekularny wodór zostaje zamknięty. Kolejne podgrzanie powoduje jego uwolnienie. Wodorki są bardzo bezpiecznym i wydajnym sposobem magazynowania wodoru, z tym że proces ponownego napełniania wymaga znacznych nakładów energii cieplnej. Dodatkowo, jeśli zachodzi potrzeba szybkiego zmagazynowania wodoru, konieczny jest bardzo wydajny system chłodzenia, umożliwiający szybkie odprowadzenie energii cieplnej na zewnątrz. Warto wspomnieć w tym miejscu, że instalacja podgrzewu i chłodzenia znacząco wpływa na całkowitą sprawność systemu.

Podobny mechanizm magazynowania wodoru stosuje się również w przypadku węglowych nanorurek i szklanych mikrosfer. Uzyskuje się w ten sposób znacznie większe ilości zmagazynowanego wodoru. Węglowe nanorurki opracowane przez Rodrigueza i Bakera (USA) mogą zmagazynować wodór w ilości nawet do 67% swojej własnej masy [5]. Raport z powyższych badań budzi wątpliwości i zastrzeżenia, jednak jeśliby podane dane choćby tylko częściowo odzwierciedlały stan faktyczny, to i tak byłby to przełom.

Duże nadzieje pokładane są również w tzw. złożonych wodorkach. LiBH₄ jest związkiem, który pozwala magazynować wodór w ilości do 18% swojej masy [8]. Proces nawodowania przebiega w temperaturze 973 K pod ciśnieniem 35 MPa. W chwili obecnej prowadzone są badania, dotyczące uwalniania zmagazynowanego wodoru w niskiej temperaturze i ciśnieniu [9].

Sprawne magazynowanie wodoru jest jednym z istotnych elementów gospodarki wodorowej, w której wodór ma pełnić funkcję paliwa przyszłości. Największe wymagania są stawiane przez szeroko rozumiane środki transportu. Bez względu na wybraną metodę wysiłki badaczy skierowane są głównie na zmniejszenie kosztów budowy i obsługi instalacji oraz na zwiększenie pojemności zmagazynowanego wodoru. Obecnie szacuje się, że najlepsze metody są około pięciu razy kosztowniejsze i dwukrotnie cięższe niż to wynika z minimalnych wymagań. Jednym z elementów rozwiązania powyższego problemu może być zmniejszenie zużycia paliwa przez nowe typy pojazdów [3].

Transport wodoru

W Europie ułożono około 1600 km rurociągów do przesyłu wodoru. Wyróżniono 15 dużych sieci, które należą do trzech największych firm na rynku gazowym: *Air Liquide*, *Linde (BOC)*,

Air Products (Sapio) oraz kilku mniejszych organizacji [11]. Największa sieć rurociągów należy do *Air Liquide* i przebiega przez północno - zachodnią Francję, Belgię i część Holandii.

Mniejsze instalacje przemysłowe lub stacje napełniania wodorem nie wymagają dostaw dużych ilości wodoru, dlatego też nie opłaca się podłączać ich do sieci rurociągów. Średnie zapotrzebowanie na paliwo może zapewnić transport koleją lub samochodami ciężarowymi, wykorzystując specjalnie do tego celu wykonane butle lub cylindry, umieszczone na wagonach lub przyczepach. W Europie w 2006 roku tylko na potrzeby przemysłu przetransportowano drogą lądową 425 milionów m³ ciekłego wodoru. Jednakże całkowita produkcja ciekłego wodoru jest nadal mała i wynosi 20 ton/dzień. W niedługim czasie wzrośnie ona do 26 ton/dzień, gdyż na ukończeniu jest budowa kolejnej instalacji firmy *Linde*.

W stacjach napełniania wodorem zaleca się stosować wodór zarówno ciekły, jak i sprężony. W Europie użytkowanych jest 35 stacji, przy czym większość z nich jest zlokalizowana w Niemczech (rys. 2). Wkrótce ich liczba się powiększy w związku z budową kolejnych stacji przy autostradzie łączącej Szwecję, Norwegię i Danię (rys. 3).



Rys. 2. Zestawienie pracujących, planowanych i wyłączonych stacji napełniania wodorem w Europie (Ludwig-Bölkow-Systemtechnik & Blandow 2007)



Rys. 3. Trasa autostrady łączącej Szwecję, Norwegię i Danię wraz z lokalizacją stacji napełniania wodorem (Scandinavian Hydrogen Highway Partnership 2006)

Infrastruktura energetyczna w gospodarce wodorowej

Gospodarka wodorowa jest kompleksowym zagadnieniem, w którym technologia musi być poparta dobrze rozwiniętą infrastrukturą. Obecny stan infrastruktury energetycznej prezentuje model scentralizowany, gdzie istnieje wielu dużych wytwórców energii elektrycznej oraz jeden ośrodek kontroli i monitoringu stanu sieci przesyłowej. Systematyczny rozwój układów z kogeneracją i technologii wykorzystujących odnawialne źródła energii zaczyna jednak wpływać na infrastrukturę energetyczną. Różnorodna lokalizacja tych instalacji, odmienna charakterystyka pracy, nadwyżki lub spadki mocy (dotyczy to zwłaszcza energii wiatru) stanowią poważne wyzwanie dla scentralizowanej sieci przesyłowej.

Tradycyjna infrastruktura energetyczna stoi obecnie u progu zmian, które dyktuje Unia Europejska. Promowane będą tzw. czyste technologie, tzn. emitujące znikome lub zerowe ilości szkodliwych związków do środowiska. Uchwalenie przepisów określających maksymalny poziom emisji CO₂ walnie przyczyni się do rozwoju nowoczesnych technologii, w tym także technologii wodorowych. Powyższa tendencja będzie szła w parze z transformacją infrastruktury energetycznej w kierunku sieci przesyłowej wysoce rozbudowanej i szybko reagującej na zmiany zapotrzebowania na energię elektryczną. Uzyska się to dzięki lepszej komunikacji pomiędzy ośrodkami wytwarzającymi energię i kontrolującymi stan sieci a zwykłymi użytkownikami. Mikrosieci umożliwiają spełnienie wszystkich powyższych założeń [12]. Pozostaje jedynie do rozwiązania problem kontrolingu oraz niezawodności, co przy tak złożonym systemie nastęrczy z pewnością wiele trudności. Jednak korzyści wynikające z wdrożenia tego przedsięwzięcia, w postaci zmniejszenia strat przesyłanej energii oraz lepszej integracji z sektorem zielonych technologii, pozwoli zaoszczędzić znaczne ilości pieniędzy. Zagadnienie komplikuje się, gdy weźmie się pod uwagę możliwość wykorzystania nadwyżek energii elektrycznej do produkcji wodoru. W trakcie prac modernizacyjnych i opracowywania struktury nowej sieci energetycznej należałoby uwzględnić potrzeby wynikające z produkcji wodoru, podstawowego składnika gospodarki wodorowej.

Metody konwersji energii wodoru

Gospodarka wodorowa oprócz metod produkcji, magazynowania i transportu wymaga

również optymalizacji technologii konwersji energii zgromadzonej w wodorze, tak aby zwykły użytkownik nie musiał rezygnować z żadnych udogodnień, jakie ma obecnie zagwarantowane. Technologie wodorowe można podzielić na następujące grupy:

- transport (drogowy, kolejowy, morski, lotniczy),
- stacjonarne układy generacji energii (energetyka rozproszona),
- urządzenia przenośne.

Transport

Najprostszym sposobem wykorzystania wodoru jest zastosowanie go w silniku spalinowym do wewnętrznego spalania. Technologia jest relatywnie tania, niezawodna i charakteryzuje się długą żywotnością. Do spalania wodoru, syngazu bogatego w wodór lub mieszaniny wodoru i gazu ziemnego można wykorzystać używane obecnie silniki spalinowe po ich stosownej modyfikacji.

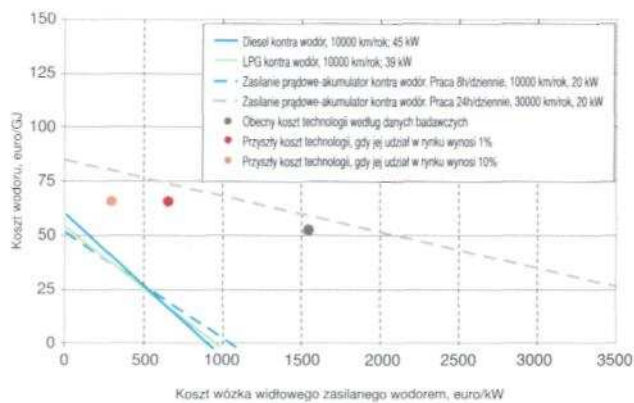
Konieczne jest przeprowadzenie badań dotyczących wytrzymałości materiałów oraz przeanalizowanie warunków spalania gazu w silniku pod kątem zapłonu, szybkości spalania i lepkości. Do zalet powyższego rozwiązania zalicza się wzrost sprawności (technologia bezpośredniego wtrysku) i zmniejszenie emisji NO_x (spalanie ubogiej mieszanki). Indie wiążą duże nadzieje z powyższą technologią. Opracowany został nawet szczegółowy plan jej rozwoju [13].

Innym rozwiązaniem do wykorzystania w samochodach jest ogniwo paliwowe, które w wyniku reakcji elektrochemicznej wytwarza energię elektryczną z wodoru. Wyprodukowana energia napędza silnik elektryczny, wprawiając tym samym pojazd w ruch. Zaleca się wyposażanie aut osobowych w polimerowe ogniwa paliwowe PEM zasilane czystym wodorem. W układzie hybrydowym często stosuje się akumulator, który gromadzi energię wytworzoną przez stos ogniw. Akumulator może dodatkowo magazynować energię odzyskaną w czasie hamownia auta, polepszając tym samym sprawność całego układu.

Oprócz aut osobowych istnieje również szeroko rozumiana grupa pojazdów ciężkich, których przeznaczenie i użytkowanie odbiega od wcześniej omawianego przypadku. Biorąc pod uwagę koszt takich pojazdów i specyfikę ich pracy, można znaleźć kilka przykładów idealnych do zastosowań technologii wodorowych. Dotyczy to np. pojazdów używanych do rozładunku i przewozu towarów w zamkniętych pomieszczeniach oraz na lotniskach. Wykorzystywane są one w obszarach, gdzie kwestia jakości powietrza jest bardzo ważna, a emisja spalin - niewskazana. Uważa się, że podnośniki widłowe będą pierwszymi, zasilanymi wodorem pojazdami, które pojawią się na rynku.

Istotną przewagą w porównaniu z pojazdami elektrycznymi jest krótki czas uzupełniania paliwa. Wyniki analizy opłacalności powyższego przedsięwzięcia zostały w sposób obrazowy przedstawione na rysunku 4. Porównanie zostało wykonane dla wózka widłowego zasilanego dieslem, LPG, prądem z akumulatorów i wodorem. Koszt pojazdów został odniesiony do 2030 r. Obszar pod krzywą jest obszarem korzystnym dla technologii wodorowej. Obszar nad krzywą informuje, że dana technologia nie jest konkurencyjna w stosunku do obecnie wykorzystywanych urządzeń i aby mogła zaistnieć na rynku potrzebne są do niej dopłaty. Zakup wózka zasilanego wodorem jest opłacalny, gdy pojazd jest użytkowany 24 godziny na dobę, nawet gdy udział w rynku takiego wózka nie przekracza 1 %. Nie należy jednak przekreślać szans wózków zasilanych dieslem lub prądem z akumulatorów. Do niektórych

zastosowań są one bowiem lepsze niż wózki zasilane wodorem.



Rys. 4. Konkurencyjność wózka widłowego zasilanego ogniwami paliwowymi w porównaniu z konwencjonalnymi rozwiązaniami w 2030 roku

Autobusy miejskie również są postrzegane jako idealne rozwiązanie. Jeżdżą bowiem po z góry ustalonym terenie, gdzie kwestia jakości powietrza jest bardzo ważna, a tankowanie może odbywać się na jednej centralnej stacji. Dodatkowo intensywność ich użytkowania pozwala w krótkim czasie uzyskać maksimum informacji na temat charakteru ich pracy.

Technologia ogniw paliwowych, bez względu na typ ogniwa, wymaga dalszej optymalizacji w celu zwiększenia żywotności, zmniejszenia rozmiarów układu i kosztów. Ogniwa wykorzystywane w transporcie muszą dodatkowo być zdolne do pracy w ekstremalnie gorących lub zimnych warunkach pogodowych. Istotnym zagadnieniem jest również cena i jakość podzespołów, takich jak kompresor powietrza, pompy, system chłodzenia. Muszą one być przystosowane do pracy ze stosem ogniw paliwowych. Montaż wszystkich komponentów powinien być szybki i tani. Jeśli koszt stosu ogniw wyniesie mniej niż 200 €/kW, a żywotność będzie rzędu 20 000 godzin [3], to system będzie konkurencyjny na rynku.

Auta osobowe zaleca się wyposażać w ogniwa polimerowe PEM, ale w przypadku ciężkich pojazdów dopuszcza się stosowanie ogniw typu SOFC (stałotlenkowych). Wdrożenie technologii wodorowej na szeroką skalę we wszystkich typach pojazdów pozwoliłoby ograniczyć emisję spalin i tym samym zmniejszyć efekt cieplarniany.

Stacjonarne układy generacji energii

Stacjonarne układy generacji energii można podzielić pod kątem zastosowań na cztery grupy:

- system mikro-CHP o mocy 1-2 kW (dom jednorodzinny),
- system mini-CHP o mocy do 10 kW (dom wielorodzinny),
- przemysłowe systemy CHP o mocy do 100 kW,
- systemy o mocy powyżej 1 MW.

Oprócz ogniw alkalicznych i zasilanych metanolem wszystkie pozostałe można wykorzystywać w stacjonarnych układach generacji energii. Za najlepsze uważa się jednak ogniwa wysokotemperaturowe MCFC (ogniwo ze stopionym węglanem) i SOFC, które mogą być zasilane gazem ziemnym lub syngazem i są bardziej odporne na zanieczyszczenia niż

instalacji i lepszego wykorzystania surowców.

Metody magazynowania wodoru odgrywają istotną rolę w każdej technologii, zwłaszcza jeśli jest mowa o szeroko rozumianych środkach transportu. Bez względu na wybraną metodę wysiłki badaczy są skierowane głównie na zmniejszenie kosztów budowy i obsługi instalacji oraz zwiększenie pojemności zmagazynowanego wodoru. Najlepsze obecnie metody magazynowania wodoru są około pięciu razy kosztowniejsze i dwukrotnie cięższe niż to wynika z narzuconych im minimalnych wymagań.

Do przesyłu wodoru lub mieszaniny wodoru i gazu ziemnego wykorzystywane są rurociągi. W Europie zbudowano około 1600 km takich rurociągów. Na potrzeby stacji napełniania wodorem zaleca się jednak stosować zarówno ciekły jak i sprężony wodór, przewożony w specjalnych kontenerach. W Europie użytkowanych jest 35 takich stacji, przy czym większość z nich jest zlokalizowana w Niemczech. Wkrótce ich liczba się powiększy z racji budowy kolejnych stacji przy autostradzie łączącej Szwecję, Norwegię i Danię.

Wprowadzenie technologii ogniwi paliwowych w transporcie i w energetyce rozproszonej ma duże znaczenie z punktu widzenia ochrony środowiska naturalnego, gdyż może znacznie zmniejszyć emisję gazu cieplarnianego (dwutlenku węgla) do atmosfery. Technologia ogniwi paliwowych, bez względu na typ ogniwa, wymaga optymalizacji w celu zwiększenia żywotności, zmniejszenia rozmiarów układu i kosztów. Ogniwa wykorzystywane w transporcie muszą być zdolne do pracy w ekstremalnie gorących lub zimnych warunkach pogodowych. Istotnym zagadnieniem jest również cena i jakość podzespołów, takich jak kompresor powietrza, pompy, system chłodzenia. Muszą one być przystosowane do pracy ze stosem ogniwi paliwowych.

¹⁾ Projekt inicjujący powstanie funkcjonujących „społeczności wodorowych” w Unii Europejskiej.

LITERATURA

- [1] Gas Processes 2002, Hydrocarbon Processing, May 2002
- [2] RiisT, Hagen E.F., Vie P.J.S., Ulleberg O.: Hydrogen Production -Gaps and Priorities, IEA/HIA2005, http://www.ieahia.org/pdfs/HIA_ProductionJ3&P_Final_with_Rev.pdf
- [3] R&D Topics and expected milestones for Hydrogen and fuel cell Technologies, Document Number R2H6034PU.1, datę: 19 January 2009 [www.roadsh2hy.com]
- [4] Celiński Z.: Przewidywany rozwój energetyki jądrowej – Generacja reaktorów energetycznych, *Energetyka 2004* nr 3, s. 137-144
- [5] "The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R & D Needs", Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use; National Research Council; Copyright 2004 - National Academy of Sciences
- [6] Schultz K.R.: Use of the Modular Helium Reactor for Hydrogen Production, World Nuclear Association Annual Symposium, 3-5 Sept. 2003 - London

[7] The Hydrogen Economy: Opportunities, Costs, Barriers, and R & D Needs, Committee on Alternatives and Strategies for Future Hydrogen Production and Use; National Research Council; Copyright 2004 - National Academy of Sciences

[8] Mueller-Langer F., Tzimas E., Kaltschmitt M., Peteves S.: Tech-no-economic assessment of hydrogen production processes for the hydrogen economy for the short and medium term, *Int. Journal of Hydrogen Energy*, in press

[9] Liu H., Grot S. and Logan B.E.: Electrochemically assisted microbial production of hydrogen from acetate, *Environ. Sci. Technol.* 2005, 39, 4317-4320

[10] Steinberger-Wilckens R., Trumper S.Ch.: European Hydrogen Infrastructure Atlas and Industrial Excess Hydrogen Analysis. Executive Summary of Part I, II, III. Document Number: R2H2004PU.1. Date: 3 July 2007

[11] Christodoulou Ch., Karagiorgis G, Poulikkas A., Lymperoloulos N, Varkaraki E. (2003): A review on hydrogen storage technologies. *The Cyprus Journal of Science and Technology*, Vol. 3, No 4, 72-145

[12] Zuttel A.: Materials for hydrogen storage, *Materialstoday*, review feature, September 2003

[13] Ross, D.K. (2006): Hydrogen storage: The major technological barrier to the development of hydrogen fuel cell cars, *Vacuum* 80, 1084-1089

[14] Perrin J., Steinberger-Wilckens R., Trumper S.Ch.: European Hydrogen Infrastructure Atlas and Industrial Excess Hydrogen Analysis. PART III: Industrial distribution infrastructure. Document Number: R2H2007PU.1, date: 3 July 2007

[15] Golec T, Błesznowski M., Steinberger-Wilckens R., Trumper S.Ch.: Linking Distributed European Hydrogen Production Sources. PART II: Analysis of Electricity Grid Development Strategies and Constraints. Document Number: R2H2014PU, date: 2 October 2008

[16] National Hydrogen Energy Board, Ministry of New and Renewable Energy Government of India 2006, *National Hydrogen Energy Road Map*

[17] Lebutsch P., KraaijG., WeedaM., Analysis of Opportunities and Synergies in Fuel Cell and Hydrogen Technologies. Document Number: R2H4007PU.3, date: 14 April 2009

Opracowanie merytoryczne artykułów:

prof. dr hab. inż. Ludwik Cwynar, mgr Marta Fiedler, doc. dr inż. Albert Kotkowski, doc. dr inż. Jerzy Kulikowski, doc. dr hab. inż. Jerzy Przybysz