

Prof. dr hab. inż. Tadeusz Chmielniak,
Instytut Maszyn i Urządzeń Energetycznych, Politechnika Śląska

Hybrydowa energetyka wodorowa

W ostatnich latach w wielu ośrodkach badawczych koncentruje się uwagę na zagadnieniach energetyki wodorowej. Nie wszystkie opinie dotyczące jej potencjału techniczno-ekonomicznego są pozytywne. Mimo to wiele przygotowanych prognoz i analiz scenariuszowych pokazuje jej perspektywiczne znaczenie w wielu obszarach gospodarki. W opracowaniu ^[1] wyraża się opinię, że wodór może spełnić podstawową rolę w procesie transformacji energetycznej wymaganej do ograniczenia wzrostu temperatury globu do dwóch stopni Celsjusza (two-degree scenario).

Głównym celem ekologicznym transformacji jest ograniczenie emisji ditlenku węgla w procesach energetycznych do 2050 r. o 60%. W tym procesie wodór może spełniać wiele funkcji, w tym przez:

- wzrost upowszechnienia źródeł odnawialnych i ich optymalnej integracji w procesach wytwarzania elektryczności i paliw,
- dystrybucję energii w różnych sektorach i regionach,
- działając jako bufor i rezerwa strategiczna mocy, zwiększając odporność systemu energetycznego,
- dekarbonizację transportu,
- dekarbonizację technologii przemysłowych,
- obniżenie emisyjności procesów wytwarzania ciepła i elektryczności w gospodarce komunalnej i mieszkalnictwie,
- zapewnienie czystego surowca dla przemysłu.

Dynamika upowszechnienia technologii wodorowych według rozpa-

trywanego scenariusza jest największa w dekadzie 2040-2050. Między 2015, a 2050 roczne zapotrzebowanie na energię wodoru powinno wzrosnąć około 10-krotnie - z 8 EJ do 78 EJ. Między 2040, a 2050 przewidziano zaś wzrost z 28 EJ do 78 EJ (1 Eksajoul \approx 277.8 TWh). Struktura technologiczna wykorzystania wodoru w 2050 obejmuje zużycie 10 EJ w obszarach gospodarki, w których jest wykorzystywany obecnie, 9 EJ w nowych procesach przemysłowych (CCU, bezpośrednia redukcja rudy żelaza - DRI), 11 EJ w gospodarce komunalnej i mieszkalnictwie, 16 EJ w przemysłowej gospodarce energetycznej, 22 EJ w transporcie i 9 EJ w procesach wytwarzania elektryczności (buforowanie, rezerwa strategiczna, magazynowanie).

W opracowaniu IEA dla szczytu G20 w Japonii [2] przedstawiono aktualny stan w zakresie technologii i ekonomii produkcji wodoru oraz nakreślono scenariusze jego potencjalnych zastosowań, głównie w perspektywie

do 2030 r. Wskazano na współcześnie identyfikowane wyzwania dla upowszechnienia technologii wodorowych. Ogólnie rzecz biorąc są one następujące:

- Produkcja wodoru z wykorzystaniem niskoemisyjnej energii napędowej jest obecnie kosztowna (według analizy IEA koszt produkcji wodoru z wykorzystaniem elektryczności ze źródeł odnawialnych może się zmniejszyć o 30% w 2030 w wyniku spadku kosztów energii odnawialnej i zwiększenia skali w produkcji wodoru. Sprzyjać to będzie doskonaleniu technologii elektrolizerów, rozwojowi i upowszechnieniu ogniw paliwowych oraz sprzętu do tankowania).
- Rozwój infrastruktury wodorowej jest powolny, co nie sprzyja jej powszechnemu upowszechnieniu (ma to wpływ na ceny wodoru dla konsumentów, które w dużym stopniu zależą od ilości stacji tankowania i niezawodności dostaw).

Rozwiązanie tego problemu może wymagać planowania i koordynacji, które na szczeblu międzynarodowym i poszczególnych krajów oraz także zaangażowania samorządów i władz lokalnych, instytucji przemysłowych i inwestorów prywatnych).

- Wodór jest obecnie prawie w całości wytwarzany z gazu ziemnego i węgla. Mimo zaawansowania technologicznego ta generacja jest odpowiedzialna za duże ilości emisji ditlenku węgla (roczna emisja CO₂ równa emisji Indonezji i Wielkiej Brytanii łącznie). Konieczna jest intensyfikacja generacji wodoru z wykorzystaniem energii źródeł odnawialnych, a także wychwytywanie ditlenku węgla w procesach wykorzystania paliw kopalnych i jego zastosowanie w technologiach przemysłowych.
- Obecne przepisy ograniczają rozwój przemysłu czystego wodoru. Koniecznym jest m.in. opracowanie wspólnej międzynarodowej normy bezpieczeństwa transportu i przechowywania dużych ilości wodoru oraz śledzenie wpływu różnych technologii dostaw wodoru na środowisko.

Powyższe uwagi wskazują, że 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, a także badań i działań w dziedzinie prawa i polityki. Wybór odpowiedniej strategii jest kluczowy dla dalszego spostrzegania szans na rozwój technologii wodorowych. W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia hybrydowej energetyki wodorowej. Pod pojęciem tej klasy energetyki rozumie się w artykule integrację technologii, u podstaw których leżą różniące się od siebie procesy fizyko-chemiczne. W rozważanym wypadku są to np. procesy konwersji oparte na bezpośredniej zamianie energii

chemicznej w elektryczność i odwrotnie, procesy oparte o zamianę ciepła w pracę i inne. Dodatkowo wskazano na rodzaj przedsięwzięć, które mogłyby służyć szybszemu upowszechnieniu tej klasy technologii.

■ Ogólna charakterystyka struktur technologicznych

Wodór ma wielorakie zastosowania. Potencjalne możliwości jego pozyskania i wykorzystania w gospodarce ilustruje rys. 1. Schemat ten może być podstawą do określenia optymalnej ścieżki rozwoju technologii wodorowych (z uwzględnieniem zasobów naturalnych i odnawialnych) i ich wykorzystania w całej gospodarce oraz energetyce dla przyjętych kryteriów ekonomicznych i ograniczeń ekologicznych [np. 3].

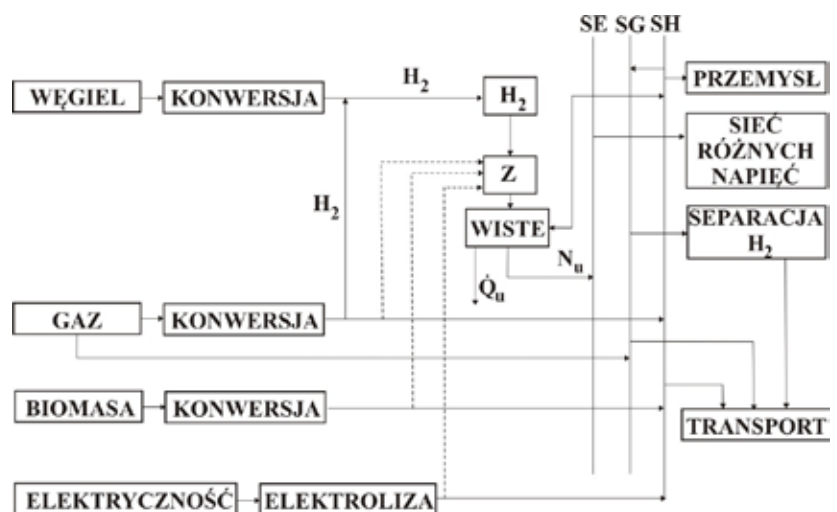
Na schemacie wyodrębniono trzy podstawowe sieci energetyczne i wzajemne możliwe połączenia technologiczne. Wodór może być generowany w procesach konwersji energii chemicznej węgla (zgazowanie, piroliza), gazu (głównie reforming parowy), biomasy (zgazowanie, fermentacja i inne) w energię chemiczną wodoru. Ważnym

dla rozwoju technologii wodorowych jest wytwarzanie wodoru w procesach elektrolitycznych i innych z wykorzystaniem energii źródeł odnawialnych i jądrowych. Należy jednak podkreślić, że energetyczne wykorzystanie wodoru nie może być tylko ograniczone do ścieżek charakterystycznych dla generacji wodoru ze źródeł odnawialnych, czyli technologii:

- Elektryczność - Elektryczność (Power to Power),
- Elektryczność - Gaz (Power to Gas: mieszanina H₂ + CH₄, metanizacja),
- Elektryczność - Paliwa ciekłe (Power to Liquid).

Istnieją bowiem rozwiązania wykorzystania niskoemisyjnych technologii paliw kopalnych (węgla i gazu z separacją ditlenku węgla) i jądrowych, które mogą okazać się konkurencyjne z technologiami źródeł odnawialnych (w zależności od ich stadiów rozwoju).

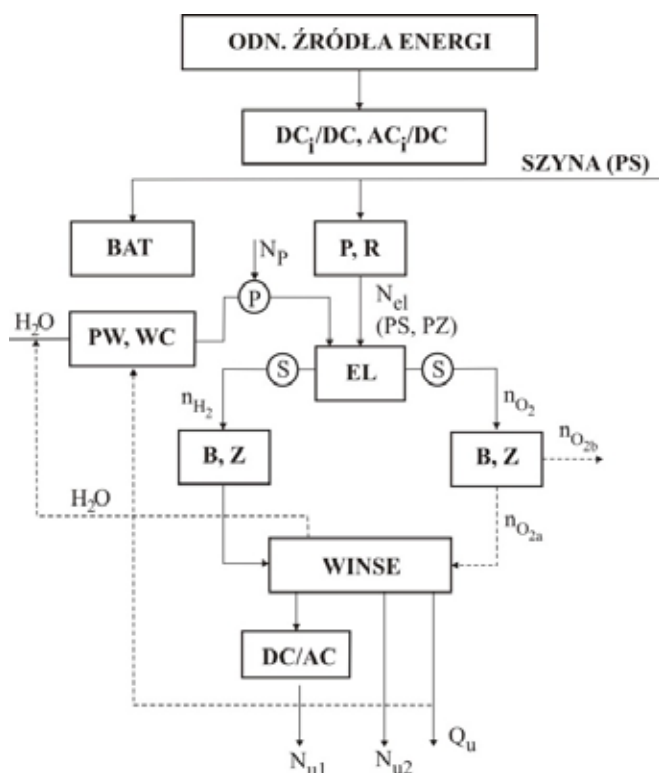
Dla losowej energii napędowej (wiatr, słońce) analiza efektywności technologii powinna obejmować moduł wytwarzania mocy napędowej i jego integrację z produkcją i wykorzystaniem wodoru. Dla biomasy, geotermii, energetyki jądrowej oraz paliw kopalnych wzajemny dobór charakterystyk po-



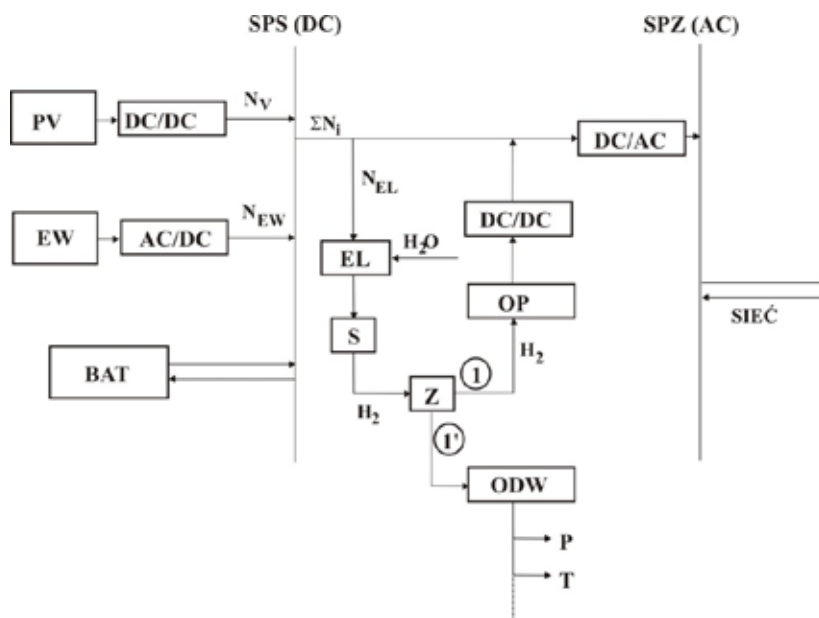
Rys. 1. Ogólna struktura technologiczna systemu wytwarzania i wykorzystania wodoru. Z - zasobnik wodoru, WISTE - wodorowe instalacje energetyczne, SE - sieć elektryczna, SG - sieć gazowa, SH - sieć wodorowa

szczególnych modułów instalacji jest na ogół mniej skomplikowany.

Ścieżka Power to Power z wykorzystaniem energii napędowej wiatru i słońca w procesie elektrolizy, może w ogólnym rozwiązaniu zawierać moduły pokazane na rys. 2. Moduł instalacje energetyczne (WINSE) może obejmować w konkretnych rozwiązaniach ogniwa paliwowe, turbiny gazowe (spalanie powietrzne lub tlenowe, paliwo: mieszanina wodoru i metanu), silniki spalinowe, silniki Stirlinga. W zależności od rodzajów źródeł i odbiorników, a także elektrolizera (prąd stały PS lub zmienny PZ) w układzie stosowane są różne przekształtniki P (DC/DC, DC/DA) oraz regulatory R. Produktami są moc użytkowa i ciepło użytkowe. Według schematu przedstawionego na rys. 2 mogą być budowane różne instalacje,



Rys. 2. Ogólny schemat technologiczny integracji elektrolizy z odnawialnymi napędowymi źródłami energii dla procesu elektrolizy. BAT - moduł baterii, WINSE - wodorowe instalacje energetyczne, B,Z - bufor, zasobnik, P - pompa, S - sprężarka, DC/AC - przekształtnik prądu stałego na zmienny



Rys. 3. Jeden ze sposobów integracji elektrolitycznej generacji wodoru z siecią i ogniwem paliwowym. PV - ogniwa fotowoltaiczne, EW - energetyka wiatrowa, EL - elektrolizery, OP - ogniwo paliwowe, ODW- odbiorniki wodoru, P - przemysł, T - transport

od najprostszych zawierających jedno źródło napędowe (energia wiatrowa, czy energia słoneczna) i jeden odbiornik wytworzonego wodoru do złożonych, w których mamy do czynienia z wieloma źródłami energii napędowej elektrolizerów (równolegle: energia wiatrowa, słoneczna, sieć elektroenergetyczna), różnymi technologiami wykorzystania wodoru i sposobami magazynowania wodoru. Im bardziej złożone układy, tym większa możliwość organizacji różnych strategii eksploatacyjnych. Optymalizacja takich układów zależy od przyjętych strategii i preferowanych postaci końcowych postaci energii. Dobór charakterystyk (wydajność, sprawność) poszczególnych modułów składających się na instalacje nie jest łatwy, ze względu na losowy charakter źródeł napędowych i ograniczony dostęp do typoszeręgów poszczególnych urządzeń (elektrolizerów i ogniwa paliwowych).

Technologie z ogniwem paliwowym mogą być w szczególności organizowane według schematu pokazanych na rys. 3 [4].

■ Stan technologii ogniw paliwowych i elektrolizerów

Wybrane dane dotyczące stanu rozwoju stacjonarnych ogniw paliwowych zawiera tab. 1. Największe nadzieje wiąże się z upowszechnieniem ogniw polimerowych (temperatura pracy 50-80) i tlenkowych (temperatura pracy 800-1000). Spektakularnym przykładem zastosowania ogniw paliwowych w stacjonarnych instalacjach jest japoński program upowszechnienia mikro-kogeneracji (ogniwa PEM i tlenkowe). Program uruchomiony w 2009 r. z pierwotną dotacją 10 000 USD doprowadził do uruchomienia w 2016 r. 200 000 instalacji. Wskutek obniżenia kosztów w tym okresie czasu o 75%, przewiduje się, że w 2020 dotacje zostaną wycofane, a w 2030 liczba instalacji zwiększy się do 5.6 mln. Podobne programy są uruchamiane w Niemczech i Korei Południowej. Szczegółową dyskusję stanu rozwoju ogniw dla zastosowań stacjonarnych zawiera opracowanie [7]. Obecny stan i perspektywy rozwoju elektrolizerów można prześledzić na podstawie danych zawartych w tab. 2. W eksploatacji są obecnie zarówno elektrolizery typu PEM (w latach 2015-

Stan rozwoju	Elektrolizery alkaliczne			Elektrolizery polimerowe (PEM)			Elektrolizery tlenkowe (SOEC)			
	Obecnie (2018)	2030	>2030	Obecnie (2018)	2030	>2030	Obecnie (2018)	2030	>2030	
- sprawność elekt. (% Wd)	63-70	65-71	70-80	56-60	63-68	67-74	74-81	77-84	77-90	
- CAPEX (USD/kW _{el})	500	400	200	1100	650	200	2800	800	500	
- ciśnienie pracy, bar	1-30	-	-	30-80	1800	1500	900	5600	2800	1000
- temperatura pracy)	60-80	-	-	50-80	-	-	1	-	-	
- czas pracy, h	60 000	90 000	100 000	30 000	60 000	100 000	650-1000	10 000	40 000	75 000
- zakres obciążenia (% w stosunku do nominalnego)	90 000	100 000	150 000	90 000	90 000	150 000	20-100	30 000	60 000	100 000
- wskaźnik powierzchniowy (m ² /kW _{el})	0.095	-	-	0.048	-	-	Bez danych	-	-	-

Tab. 2. Stan rozwoju elektrolizerów [2]

2019 [2] moc uruchomionych tej klasy elektrolizerów wyniosła ok. 85 MW_{el}, średnia moc pojedynczej instalacji wynosiła ok. 1 MW_{el}), jak i elektrolizery alkaliczne. W ostatnim okresie czasu w instalacjach demonstracyjnych przeważają elektrolizery typu PEM. Dla obu klas elektrolizerów prowadzone są prace studialne dla mocy 5 i 100 MW [8].

W tab. 3 w formie przykładu przed-

Technologia	Moc lub wydajność	Sprawność	Początkowe nakłady inwestycyjne	Żywotność (trwałość)	Stan rozwoju technologii
Alkaliczne ogniwa paliwowe	Do 250 kW	Okolo 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	Dojrzały do wdrożenia
Ogniwa węglanowe	kW- szeregu MW	Ponad 60% (HHV)	4000-6000 USD/kW	20-30 tys. h	Wstępne stadium rynkowe

Tab. 1. Aktualny stan rozwoju technologii stacjonarnych ogniw paliwowych [5, 6]



stawiono producentów i parametry elektrolizerów alkalicznych. Informacje o producentach i charakterystykach elektrolizerów polimerowych zawierają opracowania [9-11]. Największą instalacją z elektrolizerami PEM jest instalacja zainstalowana w Energiepark Mainz [12]. Ma moc 6 MW. Jest połączona z farmą wiatrową o mocy 8 MW, wykorzystuje moduły elektrolityczne SILYZER 200 (Siemens). Produkcja wodoru: 1000 Nm³/h (ok. 90 kg/h).

■ Przykład prostej instalacji hybrydowej z ogniwem paliwowym

Rysunek 4 ilustruje instalację hybrydową z ogniwem wysokotemperaturowym i turbiną powietrzną.

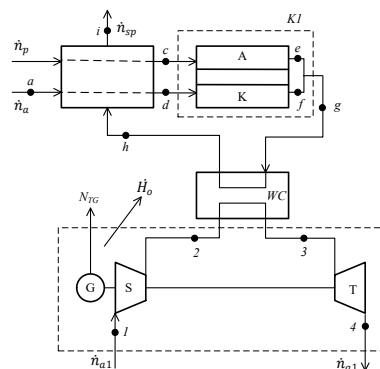
Dla układu pokazanego na rys. 4 można zdefiniować sprawność układu hierarchicznego i stosunek mocy ogniw i turbiny gazowej; napisać związeki ważne dla rozpatrywanego układu hierarchicznego:

$$1) \eta_{uh} = \frac{N_{TG} + N_{OG}}{\dot{n}_A(x_{H_2})_2 \alpha \bar{h}_{H_2, ch}} = \frac{\eta_m \eta_g N_{ob, TG} (1 - \eta_{OG})}{Q_g} + \eta_{OG} = \eta_{TG} (1 - \bar{\eta}_{OG}) + \eta_{OG}$$

$$2) \frac{N_{OG}}{N_{TG}} = \frac{\eta_{OG}}{(1 - \bar{\eta}_{OG}) \eta_{TG}}$$



Gdzie $\dot{n}_A(x_{H_2})_2 \alpha \bar{h}_{H_2, ch}$ - energia chemiczna wodoru wykorzystana w ogniwie paliwowym, η_{TG} - sprawność instalacji turbiny gazowej, η_{OG} - sprawność ogniwa paliwowego.



Rys. 4. Instalacja turbiny powietrznej z ogniwem paliwowym

Ważne są ponadto definicje:

$$\eta_{OG} = N_{OG} / \dot{n}_A(x_{H_2})_2 \alpha \bar{h}_{H_2, ch}, \bar{\eta}_{OG} = \eta_{OG} + \frac{\dot{Q}_w}{\dot{n}_A(x_{H_2})_2 \alpha \bar{h}_{H_2, ch}}$$

$$\dot{Q}_w = \dot{n}_{sp} (\bar{h}_{sp} - \bar{h}_{sp, o})_i$$

Z (1) i (2) wynika, że sprawność układu hierarchicznego istotnie zależy od sprawności ogniwa paliwowego. Moc ogniwa będzie zawsze większa od mocy turbiny gazowej. Dla dostępnych mocy ogniw wysokotemperaturowych

Producent	Model generatora (stosu elektrolizerów)	Moc elektryczna, MW	Maksymalna wydajność, Nm ³ /h	Zużycie energii elektrycznej przy wydajności max (kWh/Nm ³ H ₂) [sprawność]
Hydrogenics Corporation (Kanada)	HySTAT™60	0.515 (7)	60 (1300)	5.2 [68%]
NEL HYDROGEN (Norwegia)	NEL A-series	2.134	485	4.4
Wasserelektrolyse, Hydrotechnik GmbH (Niemcy)	EV 150/160	1.188	206	5.28
ELT Elektrolyse technik GmbH (Niemcy)	BAMAG LURGI	2.208 6.510	480 1400	4.3-4.6 4.3-4.65
AccaGen SA	AGEN	0.75	bd	5.0
IHT (Szwajcaria)	S-556	3,534 MW	760 Nm ³ /h	4.3 -4.65
Suzhou Yingli Hydrogen (Chiny)	DQ-1000/1.6	4,4 MW	1000 Nm ³ /h	≤ 4,4[81%] (elektrolizer) 5 (generator) [74%]
Teledyne Energy Systems				
Mc Phy Group (Francja)	McLyzer	2 MW	400 Nm ³ /h	bd

Tab. 3. Główni producenci i charakterystyki elektrolizerów alkalicznych

moc turbiny będzie rzędu 30-40 kW.

Dla doboru mocy turbiny gazowej do danego ogniwa (zazwyczaj w praktyce będziemy dobierać turbinę do stałej wartości ciepła doprowadzonego do obiegu turbiny) ważne jest określenie charakterystyki wymiennika (WC).

Wnioski

Energetyka wodorowa ma duży potencjał dla unowocześnienia obecnych i przyszłych struktur wytwarzania energii elektrycznej, ciepła i technologii przemysłowych. Decyduje o tym głównie możliwość wykorzystania w technologiach wytwarzania wodoru energii źródeł odnawialnych, wiele sprawdzonych sposobów magazynowania energii w wodorze, a także możliwość bezemisyjnego wykorzystania wodoru w różnych instalacjach energetycznych i przemysłowych oraz w transporcie. Konieczne są jednak dalsze przedsięwzięcia mające na celu doskonalenie elektrolizerów i innych metod

wytwarzania wodoru. Ważne znaczenie ma poszukiwanie optymalnych układów wykorzystania wodoru oraz jego magazynowania. Wiele uwagi należy poświęcić wyborowi metodologii integracji modułów charakterystycznych dla ścieżek *power to power*, *power to gas*, *power to liquid*. Biorąc pod uwagę fakt, że racjonalna energetyka wodorowa w dużej mierze zależy od lokalnego potencjału źródeł odnawialnych (ale także od struktury paliwowej energetyki i transportu), konieczne jest opracowanie krajowych programów rozwoju energetyki wodorowej. Wiele krajów opracowało odpowiednie strategie w tym zakresie i na ich podstawie sformułowano programy badawczo-rozwojowe. Konieczny jest wybór kierunków inwestowania w instalacje pilotowe i demonstracyjne.

Za ważne dla polskich warunków z badawczego punktu widzenia można uznać aktualnie:

- identyfikację badań prowadzonych w zakresie różnych zagadnień ener-

getyki wodorowej w Polsce i podjęcie próby ich koordynacji (w tym także w celu określenia planów budowy instalacji pilotażowych),

- opracowanie założeń programu badawczego ujmującego zagadnienia o dużym potencjale aplikacyjnym dla polskich warunków.
- równoległe prowadzenie prac studialnych nad rolą wodoru w dekarbonizacji transportu (produkcja paliw płynnych, ogniwa paliwowe w transporcie) i energetyki (układy skojarzone z ogniwami paliwowymi, turbiny gazowe, integracja energetyki wiatrowej i słonecznej z technologiami wytwarzania wodoru, technologie biomasowe, rola paliw kopalnych w rozwoju energetyki wodorowej) oraz możliwością i celowością jego metanizacji dla zasilania sieci gazowniczych.

□



fot. unsplash.com

[1] Hydrogen scaling up. A sustainable pathway for the global energy transition. Hydrogen Council, November 2017.

[2] The Future of Hydrogen, IEA, June 2019.

[3] M. Qadrdan, Y. Saboohi, J. Shayegan, A model for investigation of optimal hydrogen pathway, and evaluation of environmental impacts of hydrogen supply system, I. J. of Hydrogen Energy 33, 2008, 7314-7325.

[4] A. Yilanci, I. Dincer, H.K. Ozturk, A review on solar - hydrogen / fuel cell hybrid energy systems for stationary applications, Progress in Energy and Combustion Science 35, 2009, 231-241.

[5] Technology Roadmap Hydrogen and Fuel Cells. IEA 2015.

[6] DOE Hydrogen and Fuel Cell Technologies Program Record, 2015, 2016.

[7] Advancing Europe's energy systems: Stationary fuel cells in distributed generation. A study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Luxemburg 2015.

[8] Studie ueber die Planung einer Demonstrationsanlage zur Wasserstoff - Kraftstoffgewinnung durch Elektrolyse mit Zwischenspeicherung in Salzkavernen unter Druck, Stuttgart 2015.

[9] FLEXCHX. Flexible combined production of power, heat and transport fuels from renewable energy sources.

[10] VTT Technical Research Centre of Finland Ltd, 2017; Review of electrolysis technologies and their integration alternatives, DLR 2018.

[11] Kotowicz J i inni, Produkcja wodoru z energii elektrycznej, Opracowanie wewnętrzne IMIUE Pol. Śląskiej, Gliwice 2016].

[12] Kopp E. i inni, Energiepark Mainz: Technical and economic analysis of the Worldwide largest Power - to - Gas plant with PEM elektrolysis, I. J. of Hydrogen Energy 42, 2017, 13311-13320.