



Politechnika Śląska w Gliwicach
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

POTENCJAŁ ZASTOSOWANIA WODORU W POLSKIM SYSTEMIE ENERGETYCZNYM

Tadeusz Chmielniak, Anna Skorek – Osikowska, Łukasz Bartela

XXXIV Konferencja z cyklu: Zagadnienia Surowców Energetycznych i Energii w Gospodarce Krajowej

Zakopane 17-20 października 2021



**Politechnika
Śląska**

www.kmiue.polsl.pl

Plan wystąpienia

- 1. Wprowadzenie**
- 2. Technologie wodorowe – ogólna wizja**
- 3. Scenariusze produkcji wodoru**
- 4. Potencjalne możliwości produkcji zielonego wodoru w Polsce**
- 5. Zapotrzebowanie na wodór w energetyce – możliwe zastosowania i ograniczenia**
- 6. Stan dojrzałości technologicznej instalacji wodorowych w energetyce**
- 7. Uwagi końcowe**



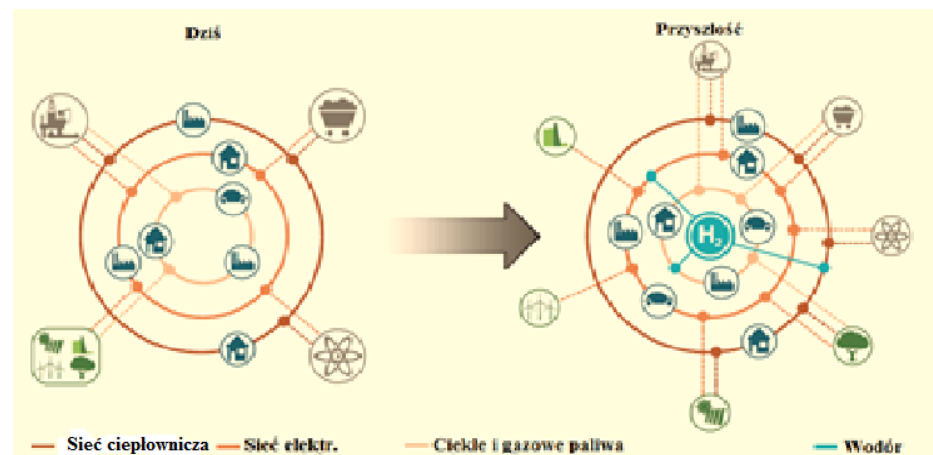
Wprowadzenie

Mimo różnych wahań współcześnie utrwała się przekonanie o istotnej roli wodoru w transformacji energetyki. Potwierdzeniem jest wiele przeprowadzonych studiów i analiz oraz programów opracowanych i opracowywanych w wielu krajach. Warto w tym miejscu przytoczyć, że według scenariusza przedstawionego w *Hydrogen scaling up. A sustainable pathway for the global energy transition* udział wodoru w końcowym zapotrzebowaniu na energię w 2050 **będzie wynosić 18 %, umożliwiając eliminację emisji 6 Gt ditlenku węgla** przez zastosowanie odpowiednich technologii jego utylizacji w różnych działach gospodarki i transportu. **Dynamika upowszechnienia technologii wodorowych według rozpatrywanego 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, zaś między 2040 a 2050 przewidziano wzrost z 28 EJ do 78 EJ (1 Eksajoul \cong 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). Wskazuje to na duży potencjał technologii wodorowych w dekarbonizacji transportu i doskonalenia procesów przemysłowych. **Wszystkie scenariusze są optymistyczne, należy je traktować jako określenie możliwego potencjału.**

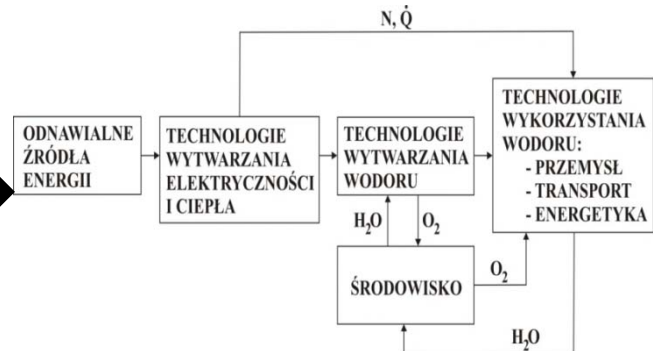
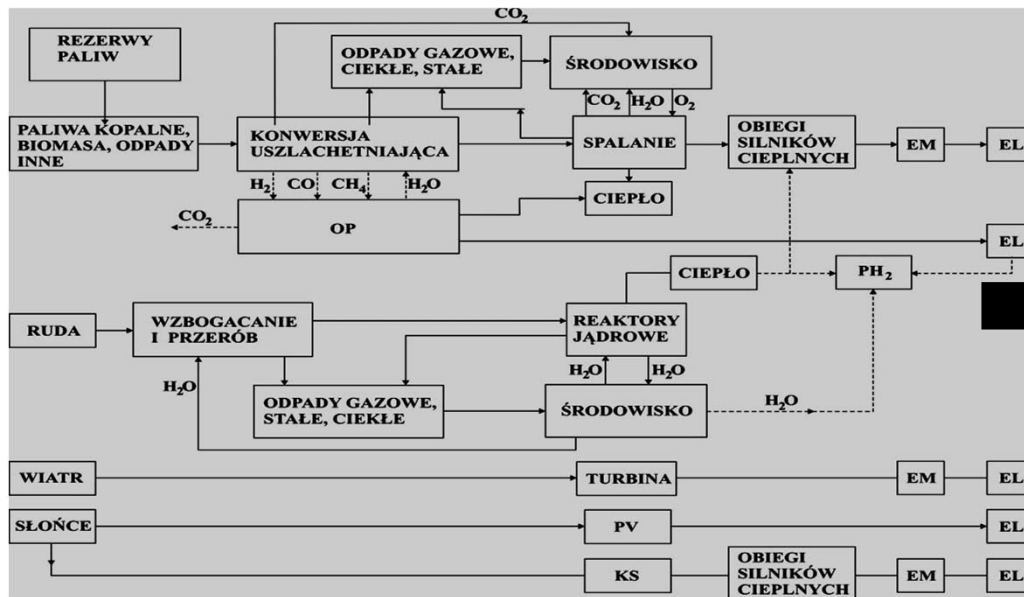


Technologie wodorowe – ogólna wizja

Cechy: **różnorodność** (różne źródła napędowe procesów elektrolizy, termolizy, różne procesy konwersji paliw organicznych w wodór, itd.); **hybrydowość** (integracja różnych procesów fizyko–chemicznych i różnych technologii energetycznych wytwarzania elektryczności i ciepła); mała szkodliwość ekologiczna.



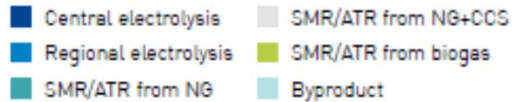
Technologie wodorowe – ogólna wizja



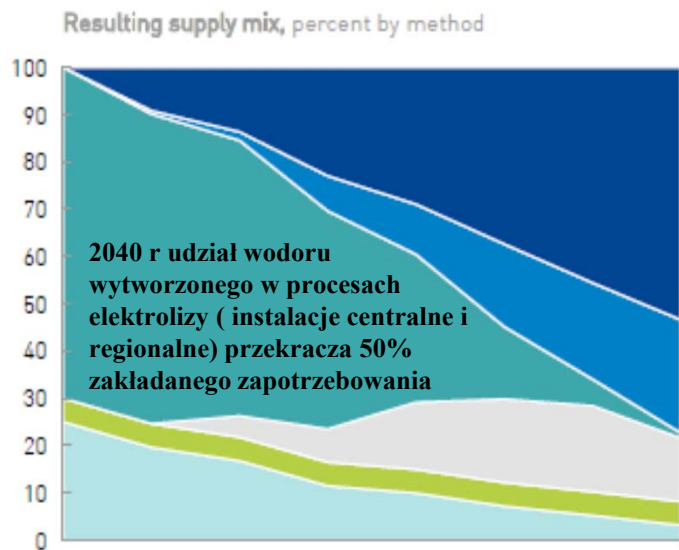
Struktura oczekiwana (pożądana)

Struktura integracji obecnych technologii z generacją wodoru i jego wykorzystaniem

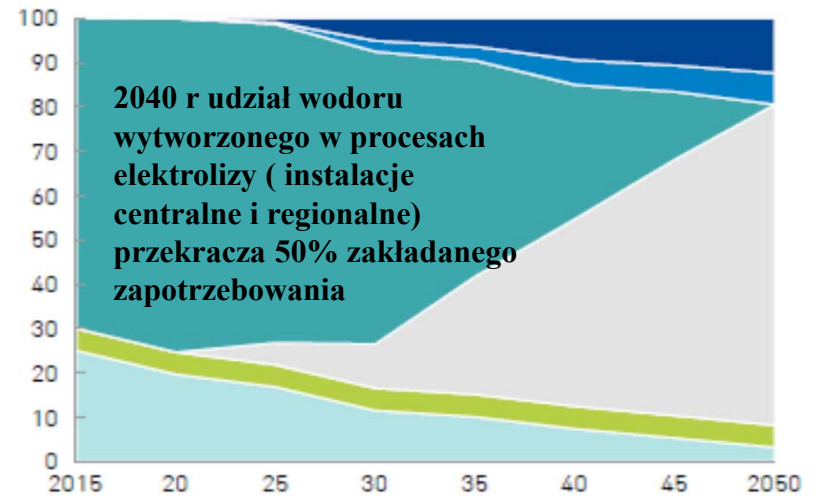
Scenariusze produkcji wodoru



Na rys. przedstawiono dwa możliwe scenariusze udziału różnych technologii w produkcji wodoru (*Hydrogen Roadmap Europe. A Sustainable Pathway for The European Energy transition. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking 2019, fh.europa.eu*)



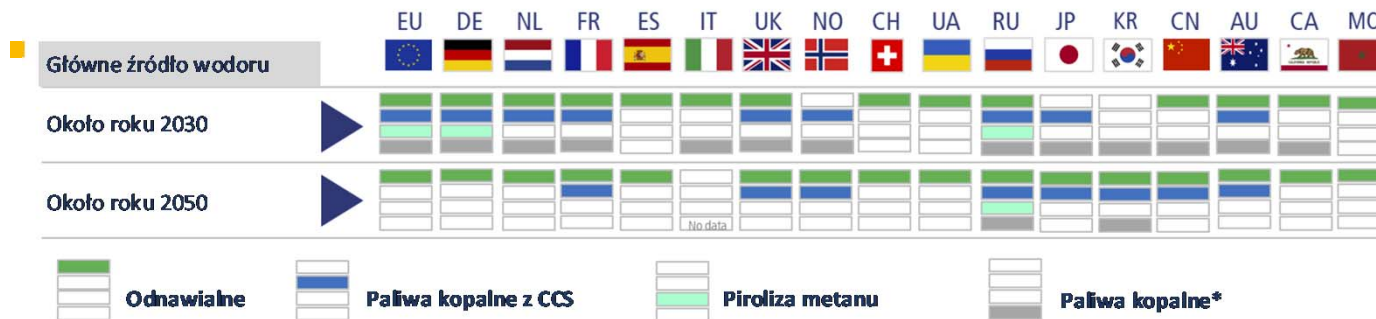
Udział procentowy różnych technologii produkcji wodoru (scenariusz 1, 1. Nastąpi istotny spadek kosztów produkcji elektrolizy i kosztów elektryczności generowanej z OZE, 2. Występuje istotny potencjał OZE, 3. Możliwy jest import ciekłego wodoru z regionów o dużym potencjale OZE, 4. Występuje niska akceptacja technologii CCS z procesów generacji wodoru z paliw kopalnych. 5. Istnieją korzystne warunki do produkcji lokalnej i świadczenia usług w sieci)



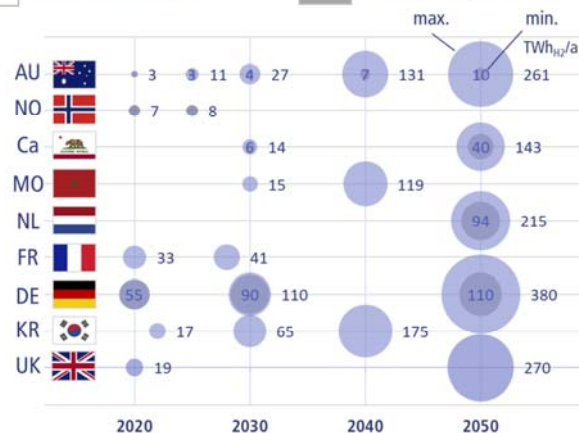
Udział procentowy różnych technologii produkcji wodoru (scenariusz 2, a. W wytwarzaniu wodoru dominują technologie reformingu parowego oraz autotermalnego gazu, jako najbardziej efektywne ekonomicznie, b. Występuje wysoka akceptacja (polityczna i społeczna) technologii CCS z procesów generacji wodoru z paliw kopalnych, c. Elektrolizy to głównie instalacje lokalne sprzęgnięte bezpośrednio z wyspami OZE.



STRATEGIE WODOROWE WYBRANYCH KRAJÓW



* W Rosji w 2050 roku oparty głównie na energii jądrowej



Rys. Przewidywane sposoby produkcji wodoru

[Źródło: *International Hydrogen Strategies: LBST expertise for the World Energy Council, Germany, Wrzesień 2020*]

Rys. Przewidywane roczne zużycie wodoru (TWh/rok)

[Źródło: *International Hydrogen Strategies: LBST expertise for the World Energy Council, Germany, Wrzesień 2020*]



STRATEGIE WODOROWE WYBRANYCH KRAJÓW

NIEMCY

- Niemiecka Strategia wodorowa została przyjęta 10 czerwca 2020
- Zielony wodór uznano jako jedyne rozwiązanie, które odpowiada potrzebom zrównoważonego rozwoju w długiej perspektywie.
- Podstawowe założenia strategii:
 - **5 GW mocy zainstalowanej w elektrolizerach do 2030 r. (10 GW do 2040 r.), przy produkcji 14 TWh energii wodoru rocznie,**
 - **wsparcie producentów zielonego wodoru,**
 - **zapotrzebowanie na wodór w roku 2030 na poziomie 90-110 TWh,**
 - zastępowania paliw kopalnych wodorem przede wszystkim w przemyśle oraz w transporcie ciężkim,
 - rekompensata strat dla producentów stali, wynikających ze stosowania wodoru w miejsce węgla (tzw. Carbon Contracts for Difference),
 - dopłaty do zakupu samochodów wodorowych,
 - ustalenie minimalnego udziału OZE w zużywanych paliwach powyżej ustalonej w dyrektywie REDII granicy 14% do 2030 roku oraz zobowiązanie linii lotniczych do stosowania paliwa z minimum dwuprocentową domieszką syntetycznej kerozyny,
 - **zwiększenie roli wodoru w ciepłownictwie oraz w transporcie lekkim,**
 - zwiększenie liczby stacji tankowania wodoru,
 - **stworzenie infrastruktury przesyłowej dla przemysłu w oparciu o istniejącą infrastrukturę przesyłową gazu ziemnego**

Hiszpania

- Szacuje się, że realizacja celów Strategii wodorowej będzie kosztować Hiszpanię do 2030 r. **8,9** miliarda euro. Oczekuje, że większość środków będzie pochodziła z sektora prywatnego, nie ma jasnej deklaracji wsparcia publicznego
- Podstawowe założenia strategii (na rok 2030):
 - **4 GW mocy zainstalowanej w elektrolizerach (1/10 celu Unijnego), przy czym do 2024 r. ma powstać 300-600 MW (UE: 6 GW)**
 - **25% zapotrzebowania wodoru w przemyśle ma być zastąpione zielonym wodorem (ok. 125 tys. ton wodoru z OZE)**
 - 150-200 autobusów, 5000-7000 lekkich i ciężkich pojazdów, 2 linie kolejowe zasilane wodorem
 - 100-150 stacji tankowania wodoru (maksymalna odległość między stacjami tankowania ma wynosić 250 km)
 - **Redukcja emisji CO₂: 4,6 Mt**



Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r. - Projekt

Cel 1 - wdrożenie technologii wodorowych w energetyce

- uruchomienie pierwszych przemysłowych instalacji **PtoG klasy 1MW(2025), 10+MW(2027), 50+(2030) na bazie krajowej technologii – wsparcie dla stabilizacji pracy sieci dystrybucyjnych;**
- instalacja układów ko i poligeneracyjnych dla bloków mieszkalnych, małych osiedli oraz obiektów użyteczności publicznej od 10 kW do 250 kW z wykorzystaniem **ogniw paliwowych.**

Cel 2 – wykorzystanie wodoru jako paliwa alternatywnego w transporcie

Cel 3 - wsparcie dekarbonizacji przemysłu

Cel 4 - produkcja wodoru w nowych instalacjach

- uruchomienie instalacji do produkcji wodoru ze źródeł niskoemisyjnych m.in. w procesie elektrolizy, z biometanu, gazów odpadowych, **z gazu ziemnego z wykorzystaniem CCS/CCU, w drodze pirolizy oraz innych alternatywnych technologii pozyskiwania wodoru;**
- uruchomienie wytwarzania gazów syntetycznych w procesie metanizacji wodoru;
- wykorzystanie mocy zainstalowanej w OZE dla potrzeb produkcji wodoru i paliw syntetycznych w oparciu o proces elektrolizy. Zainstalowana moc elektrolizerów sięgnie w 2030 r. **2 GW** (UE: **40 GW** mocy elektrolizerów i roczna produkcja co najmniej **10 mln ton** wodoru z OZE);
- zapewnienie warunków do budowy instalacji do produkcji wodoru przy elektrowniach jądrowych.

Cel 5 - sprawny i bezpieczny przesył wodoru

Cel 6 - stworzenie stabilnego otoczenia regulacyjnego



Potencjalne możliwości produkcji zielonego wodoru w Polsce

Określenie zapotrzebowania na wodór w energetyce nie jest prostym zadaniem. Wyniki są bowiem zależne nie tylko od stopnia dojrzałości technologii jego wykorzystania ale także, i to w decydującym stopniu, od polityki energetycznej danego kraju, charakterystyki ekonomicznej i ekologicznej sposobów jego wytwarzania oraz potencjału jego produkcji z wykorzystaniem OZE. Ważnym jest także przyjęta polityka dekarbonizacji całej gospodarki i transportu.

W analizach i oszacowaniach, których wyniki podano w niniejszym wystąpieniu wykorzystano: PEP 2040, Polski Projekt Strategii Wodorowej 2030 z perspektywą do 2040, wybrane europejskie i światowe mapy drogowe upowszechnienia wodoru w gospodarce oraz transporcie, a także literaturę dokumentującą stan technologii wodorowych dla energetyki.



Potencjalne możliwości produkcji zielonego wodoru w Polsce. Polityka energetyczna Polski 2040

Rozpatruje się dwa scenariusze kształtowania sektora paliwowo-energetycznego w horyzoncie do 2040r. Pierwszy z nich powstał przy założeniu zrównoważonych wzrostów cen uprawnień do emisji CO₂, zbieżnych z prognozami Międzynarodowej Agencji Energii. Drugi opracowano przy założeniu scenariusza wysokich cen uprawnień do emisji CO₂. Dodatkowo uwzględniono koszty środowiskowe i systemowe. Różne założenia skutkują inną strukturą paliwową zainstalowanej mocy i produkcji elektryczności, a także innymi wartościami mocy zainstalowanej w 2040 i innymi poziomami produkcji elektryczności.

Dla pierwszego scenariusza moc zainstalowana netto w 2040r. wynosi 72.103 GW, produkcja elektryczności (brutto) zaś 225.8 TWh. Odpowiednie wartości dla drugiego scenariusza to: 60.014 GW i 204.2 TWh. Główne różnice dotyczą udziału węgla (zmiana z 27.9 % w S1 do 11.2 % w S2) oraz udziału gazu (zmiana z 17% w S1 do 33.1 % w S2). Ponadto istotnie wzrasta udział morskiej energetyki wiatrowej w S2.



Potencjalne możliwości produkcji zielonego wodoru w Polsce. Polityka energetyczna Polski 2040

Produkcja elektryczności, TWh	S1 (%)	S2 (%)
Węgiel kamienny	45.7 (20.2)	18.2 (8.9)
Węgiel brunatny	17.3 (7.7)	4.6 (2.3)
Paliwo gazowe	38.4 (17.0)	67.6 (33.1)
Energia jądrowa	30.6 (13.6)	33.4 (16.4)
Energia słoneczna	14.8 (6.6)	9.6 (4.7)
Energia wiatrowa lądowa	24.6 (10.9)	22.1 (10.8)
Energia wiatrowa morską	30.6 (13.5)	39.4 (19.3)
Biomasa i biogaz	16.1 (7.1)	7.5 (3.6)
Energia wodna	4.6 (2.1)	1.9 (0.9)
Inne (olej op. i inne)	3.0 (1.3)	-
Razem	225.8	204.2
	100%	90.4%

	En. W. lądowa	En. W. morska	PV	Biomasa i biogaz	Woda
Moc, MW	9 761	7 985	16 062	2 366	2 645
Elektryczność, TWh	24.6	30.6	14.8	16.1	4.6
Czas, h wykorzystania mocy, h	2 520	3 932	921	6 804	1 739

Generacja elektryczności ze OZE i czas wykorzystania mocy zainstalowanej (2040) S1

	En.W. lądowa	En.W. morska	PV	Biomasa i biogaz	Woda
Moc, MW	6 939	9 590	9 814	1 423	2 419
Elektryczność, TWh	22.1	39.4	9.6	7.5	1.8
Czas wykorzystania mocy zainstalowanej, h	3 184	4 108	978	5 270	747

Generacja elektryczności ze OZE i czas wykorzystania mocy zainstalowanej (2040) S2



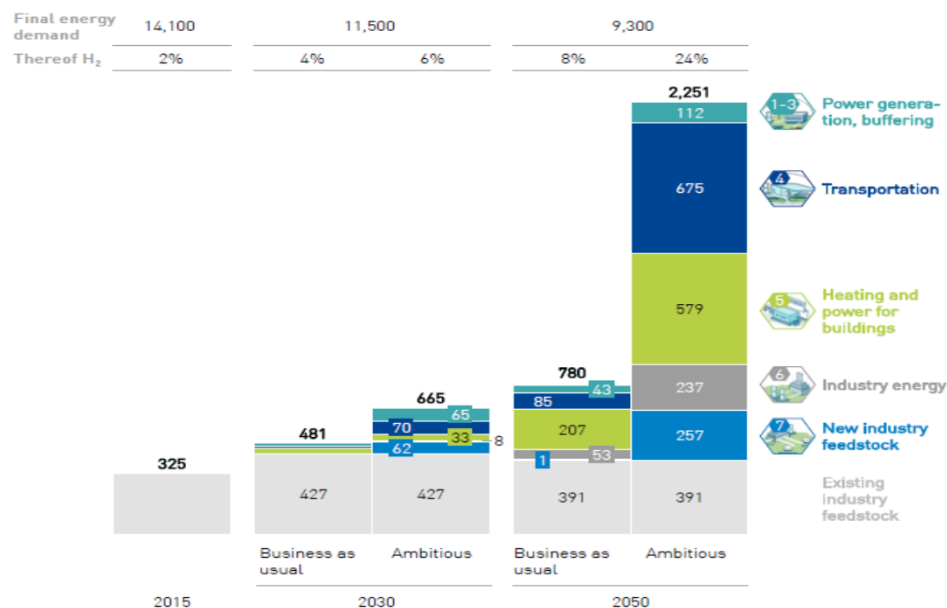
POTENCJALNE MOŻLIWOŚCI PRODUKCJI ZIELONEGO WODORU W POLSCE. Polityka energetyczna Polski 2040

Z przedstawionych danych wynika, że czasy wykorzystania mocy zainstalowanych OZE są duże, przewyższają aktualne wykorzystanie OZE. Wobec braku zaplanowanych magazynów w S2 należy założyć, że dobór mocy poszczególnych źródeł zapewnia bezpieczeństwo dostaw i systemu energetycznego. Z analizowanych dokumentów wynika, że prognozowana produkcja energii elektrycznej odpowiada zapotrzebowaniu. Powstaje więc pytanie o możliwość produkcji zielonego wodoru przy założonym miesie paliwowym. Dla pełnego wykorzystania elektryczności generowanej z wykorzystaniem OZE dla scenariusza S2 maksymalna produkcję wodoru można oszacować następująco:

- Zakładając zastosowanie elektrolizerów o energochłonności 5 kWh/Nm³, wykorzystanie 1 TWh energii elektrycznej umożliwia wyprodukowanie 200 mln Nm³ wodoru, czyli 16.476 tys. ton.
- Wykorzystanie rocznej produkcji elektryczności z energetyki wiatrowej i słonecznej (S2) dałoby więc produkcję 1.175 mln ton. To odpowiada aktualnej produkcji wodoru w Polsce z innych źródeł.



ZAPOTRZEBOWANIE NA WODÓR W ENERGETYCE – możliwe zastosowania i ograniczenia



Rys. Struktura wykorzystania wodoru w gospodarce dla scenariuszy: *Business as usual* i *optymistycznego (ambitnego)*

Nie cały generowany wódór jest wykorzystywany w energetyce. Na rys. pokazano strukturę jego wykorzystania według *Hydrogen Roadmap Europe. A Sustainable Pathway for The European Energy transition. Fuel Cells and Hydrogen 2 Joint Undertaking 2019, fh.europa.eu*

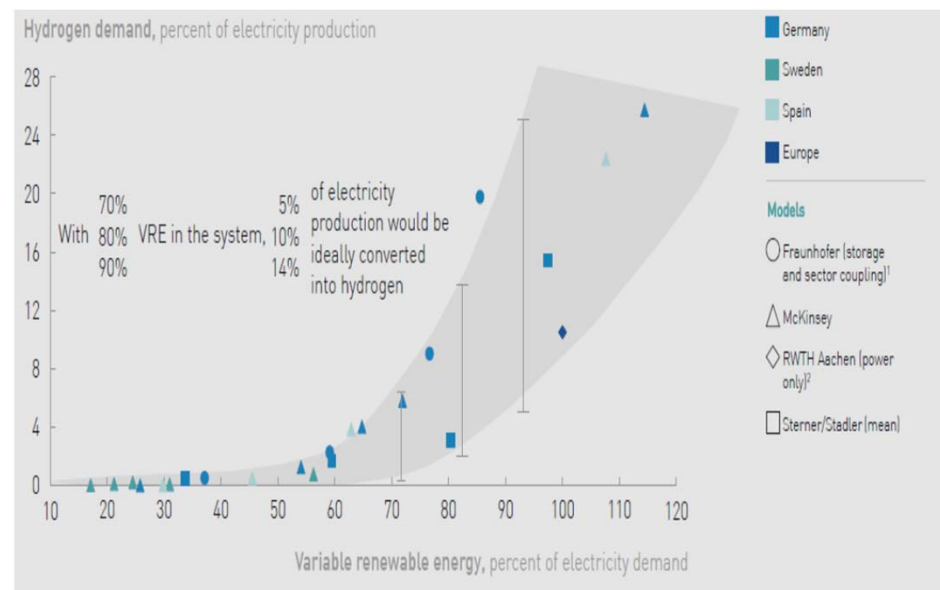
Udział wodoru w końcowym zużyciu energii w scenariuszu optymistycznym w 2050 (UE) wynosi 24% (2 251 TWh). **Przewidywana struktura jego zużycia to: 112 TWh (ok. 5%) – wytwarzanie elektryczności, bilansowanie systemu (power generation, buffering, sektor 1); 675 TWh (30%) – transport (sektor 2); 579 TWh (25.7%) – ogrzewanie i energia dla mieszkalnictwa (heating, power for buildings, sektor 3); 237 TWh (10.5%) – energia dla procesów przemysłowych (industry energy, sektor 4); 257 TWh (11.4%) – Nowe zastosowania przemysłowe (new industry feedstock, sektor 5); 391 TWh (17.4%, sektor 6) – istniejące obszary zastosowań przemysłowych (existing industry feedstock).**

W scenariuszu *business as usual* udział wodoru w końcowym zużyciu energii jest równy 8% (780 TWh). **Procentowy udział zużycia dla sektora 1 to 5.5%, 2 – 11 %, 3 – 26.5%. Dominuje sektor 6 – 50%. W 2030r. scenariusz optymistyczny zakłada 6 % (665 TWh) udziału wodoru w końcowych zużyciu energii (z tego sektor 1 – 8.8%, sektor 3 – 5%), zaś scenariusz *business as usual* – 4 % (481 TWh), z tego sektor 1 ok.2.5%, sektor 3 – 5.5%.**



ZAPOTRZEBOWANIE NA WODÓR W ENERGETYCE – możliwe zastosowania i ograniczenia

Ważne jest pytanie, który scenariusz jest najprawdopodobniejszy w Polsce. Biorąc pod uwagę aktualny potencjał OZE oraz przewidywany ich rozwój do 2040r., wydaje się, że elektrolityczna produkcja wodoru w Polsce z wykorzystaniem OZE nie będzie zbyt wysoka. Wydaje się, że założenie 2 GW mocy elektrolizerów w 2030 r. w Polskiej strategii wodorowej jest bardzo (zbyt) optymistyczne (Niemcy 5 GW, Hiszpania 4 GW). Trudno natomiast przesądzić jakie będzie upowszechnienie innych technologii wytwarzania, zwłaszcza trudno ocenić udział CCS. (POLSKA STRATEGIA WODOROWA DO ROKU 2030 Z PERSPEKTYWĄ DO 2040 R. – PROJEKT: Zainstalowana moc elektrolizerów sięgnie w 2030 r. 2 GW. Produkcja wodoru – 100 – 130 tys. ton rocznie (przy 3000 – 4000 h pracy rocznie))



Przy 70% udziale OZE w systemie wytwarzania średnio 5% stanowić może energię napędową elektrolizy i odpowiednio dla 80% – 10%, 90% - 15%. Polskim scenariuszom miksu energetycznego w 2030 (S1 – 32 % wytwarzania elektryczności z OZE, S2 – 29%) , 2040 (S1 – 40%, S2 – 36%) odpowiada zgodnie z tą analizą 1-1.2% wyprodukowanej elektryczności, czyli ok. 2-3 TWh, na produkcję wodoru. Tej wartości energii napędowej odpowiada produkcja 35 – 50 tys. ton wodoru rocznie. W Polskiej strategii wodorowej założono, że w 2030 moc zainstalowanych elektrolizerów będzie wynosić 2 GW. Jeśli przyjąć w 2030 roku produkcję wodoru z OZE na poziomie 35 tys. Mg, to zainstalowana moc 2 GW będzie wykorzystywana w granicach 1000 h w ciągu roku.

ZASTOSOWANIA WODORU W ENERGETYCE (WYTWARZANIE ELEKTRYCZNOŚCI I CIEPŁA)

Należy rozpatrywać technologie:

1. Energetyka średniej i dużej mocy

- węgla: **brak uzasadnienia**

- gazowa średniej mocy: wodór dla mocy szczytowych

- gazowa - układy kombinowane: wodór domieszkowy, paliwo syntetyczne, głównie po 2040 r

2. Ciepłownictwo dużej i średniej mocy

- elektrociepłownie węglowe: zastąpienie kotłów węglowych kotłami wodorowymi – wymagana analiza ekonomiczna, zakres wykorzystania wodoru ograniczony

- elektrociepłownie gazowo- parowe - wodór domieszkowy, paliwo syntetyczne, głównie po 2030

3. Układy kogeneracyjne małej mocy, w tym układy hybrydowe

- ogniwa paliwowe: wodór (możliwa szersza implementacja wspólnie)

- układy hybrydowe: turbina gazowa sprzężona z ogniwem paliwowym: wodór – po upowszechnieniu komercyjnych instalacji (2030 -2040).

4. **Inne potrzeby w mieszkalnictwie:** częściowe zastąpienie gazu wodorem w przygotowaniu posiłków (wykorzystanie infrastruktury gazowej w mieszkalnictwie)

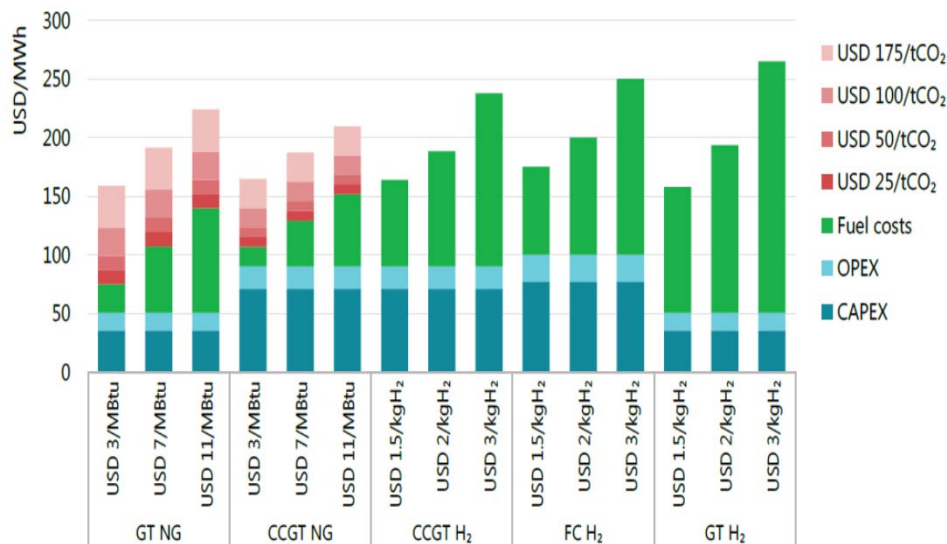


ZASTOSOWANIA WODORU W ENERGETYCE (WYTWARZANIE ELEKTRYCZNOŚCI I CIEPŁA). Turbiny gazowe

Biorąc pod uwagę wartość opałową wodoru, łatwo obliczyć np., że zastąpienie 3600 MW gazowych turbin szczytowych pracujących z 15% wykorzystaniem mocy (1316h rocznie) turbinami wodorowymi wymagałoby przy sprawności 40% ok. 0.35 mln ton wodoru (zastąpienie 0.84 mln ton gazu ziemnego wysokometanowego, 1.26 mld Nm³). Obecnie nie ma na rynku turbin gazowych umożliwiających spalanie czystego wodoru. Takie konstrukcje większej mocy są zapowiadane po 2030 (2040) roku. Aktualnie możliwe jest spalanie mieszanki wodoru z gazem ziemnym przy 30% udziale objętościowym wodoru (udział energetyczny ok. 13%). Zastosowanie takich jednostek wymagałoby dla powyżej określonych danych ok. 46 tys. ton wodoru rocznie.



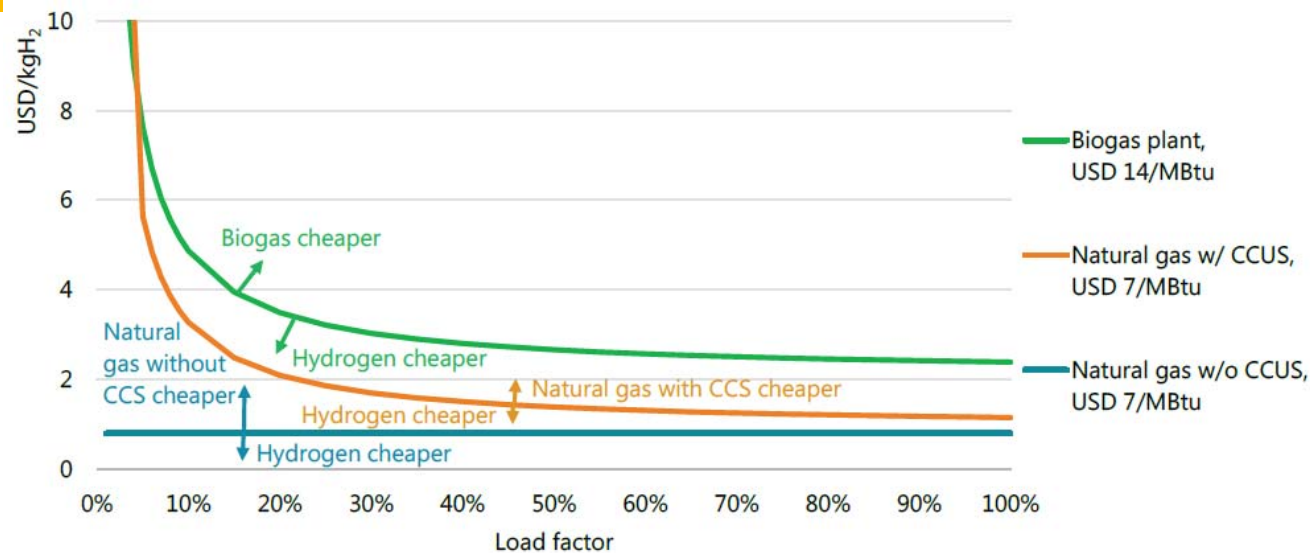
ZASTOSOWANIA WODORU W ENERGETYCE (WYTWARZANIE ELEKTRYCZNOŚCI I CIEPŁA). Turbiny gazowe



Konkurencyjność elektrowni wodorowych z wytwarzaniem energii na gaz ziemny dla równoważenia obciążenia i generowania obciążenia szczytowego zależy od ceny gazu i potencjalnego poziomu cen emisji dwutlenku węgla. Dla 15% współczynnika obciążenia i ceny gazu ziemnego wynoszącej 7 USD / MBtu (MBtu = 1.0551GJ) cena CO₂ musiałaby wynosić 100 USD / tCO₂, aby generacja wodorowa przy cenie wodoru 1,5 USD / kgH₂ była konkurencyjna w stosunku do gazu ziemnego. Dla ceny wodoru 2 USD / kg H₂, dla konkurencyjnej generacji cena CO₂ musiałaby wynosić 175 USD/tCO₂



ZASTOSOWANIA WODORU W ENERGETYCE (WYTWARZANIE ELEKTRYCZNOŚCI I CIEPŁA). Turbiny gazowe



Notes: Arrows indicate areas where hydrogen costs and load factors mean that competing generation technologies or hydrogen are cheaper. CAPEX = USD 1 000/kW for CCGT without CCS and hydrogen-fired CCGT, USD 1 870/kW for CCGT with CCS, USD 2 000/kW for biogas engine; gross efficiencies (LHV) = 61% CCGT without CCS and hydrogen-fired CCGT, 53% CCGT with CCS, 45% biogas engine. Economic lifetime = 25 years. More information on the assumptions is available at www.iea.org/hydrogen2019.

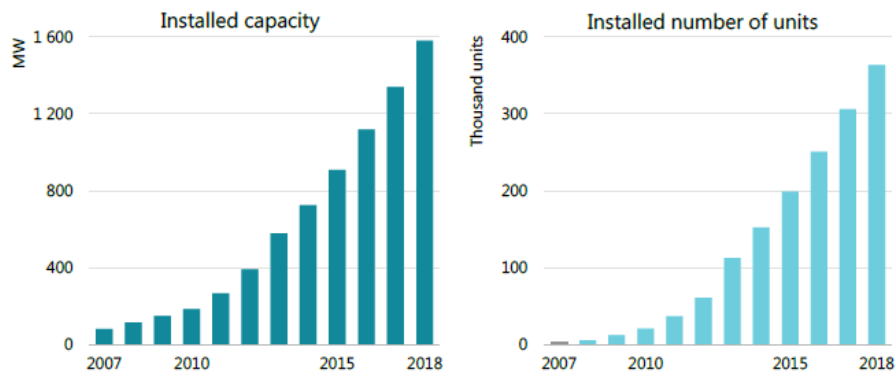
Source: IEA 2019. All rights reserved.

Zastąpienie gazu ziemnego w UGP (7 700 MW- 2040) eksploatowanych przez 5600 h (sprawność 0.6) rocznie wodorem wymagałoby 2.16 mln ton wodoru lub 8.83 mln ton amoniaku (zastąpienie 5.184 mln ton gazu ziemnego, 7.77 mld Nm³). **Praktycznie rzecz biorąc taka transformacja paliwowa do 2040r. jest niemożliwa do realizacji. Można natomiast wziąć pod uwagę zastąpienie częściowe gazu, kierując się możliwościami wytwarzania wodoru i strukturą jego zastosowania. Oba aspekty mają istotne znaczenie dla oceny zapotrzebowania na wodór w energetyce.**



ZASTOSOWANIA WODORU W ENERGETYCE (WYTWARZANIE ELEKTRYCZNOŚCI I CIEPŁA). Ogniwa paliwowe

Ogniwa paliwowe – technologia w ciągłym rozwoju. Dynamicznie wzrasta liczba instalacji i moc zainstalowana (ponad 1.6 GW, w tym tylko ok. 90 MW na wodorze). Moce jednostkowe zależą od typów ogniw. **Zakres zastosowania : instalacje energetyki rozproszonej, instalacje rezerwujące , kogeneracja małej mocy, transport. Udział w generacji elektryczności 0.02%**. Przykłady szerszych zastosowań : 59-MW Gyeonggi Green Energy fuel cell park in Hwasung City, South Korea , ENE – Farm (Japonia: 300 tys. instalacji w 2020 do 5.3 mln w 2050). Główne wyzwania: obniżenie Capexu (do 500 – 800 USD/kW w 2030) i zwiększenie żywotności. Możliwość produkcji krajowej



Sources: E4tech (various years), The Fuel Cell Industry Review, S&P Global Platts (2018), World Electric Power Plants Database.



59-MW Gyeonggi Green Energy fuel cell park in Hwasung City, South Korea



Aktualny stan rozwoju technologii stacjonarnych ogniw paliwowych

Technologia	Moc	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
Polimerowe ogniwa transportowe	80-100 kW	Do 60%(HHV)	Okolo 500 USD/kW	Do 5 tys. h	Wstępne stadium rynkowe



ZASTOSOWANIA WODORU W ENERGETYCE (WYTWARZANIE ELEKTRYCZNOŚCI I CIEPŁA). Ciepłownictwo dużej i średniej mocy

Elektrociepłownie węglowe: zastąpienie kotłów węglowych kotłami wodorowymi – wymagana analiza ekonomiczna, zakres wykorzystania wodoru ograniczony

Kotły gazowe (wodor, amoniak)

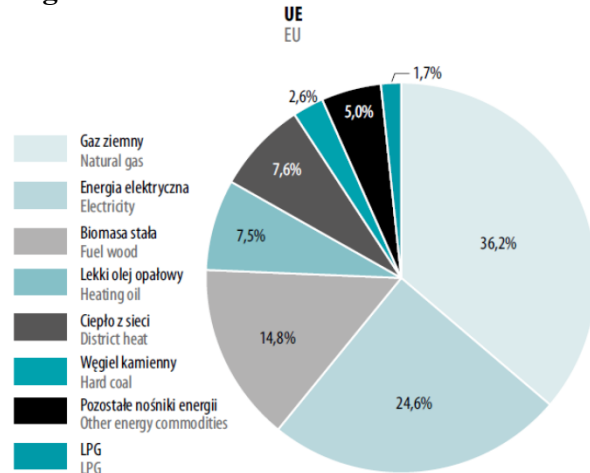
- kotły rusztowe (adaptacja komory spalania)- przykład: Projekt Rafako (*C₂H Transformacja lokalnych źródeł kogeneracyjnych z węglowych na gazowe wzbogacone wodorem*)
- kotły małej mocy na mieszaninę gazy ziemnego i wodoru (udział wodoru od 30 do 70 % objętościowo)- analizy studialne
- współspalanie amoniaku w kotłach węglowych (instalacje demonstracyjne, w 2017 instalacja demonstracyjna *Chugoku Electric Power Corporation* współspalania 1 % amoniaku – udział energetyczny - z węglem w bloku 120 MW, 20% udział energetyczny nie powinien powodować istotnych kłopotów)

Elektrociepłownie gazowo- parowe - wodor domieszkowy, paliwo syntetyczne, głównie po 2030

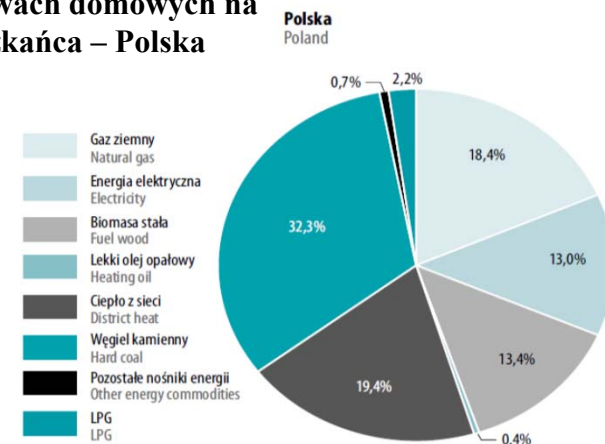


ZASTOSOWANIA WODORU W ENERGETYCE (WYTWARZANIE ELEKTRYCZNOŚCI I CIEPŁA). Gospodarstwa domowe

Struktura zużycia energii finalnej w gospodarstwach domowych na jednego mieszkańca – UE 2018



Struktura zużycia energii finalnej w gospodarstwach domowych na jednego mieszkańca – Polska 2018



Zasadnicze różnice między Polską a krajami UE tkwią w zużyciu węgla, elektryczności i gazu. **Wysoki udział węgla w polskich gospodarstwach (32.3%) jest powodem istotnych problemów ekologicznych. Zwraca także uwagę stosunkowo niskie zużycie elektryczności (UE – 24.6%, Polska – 13%). Pozytywnym elementem jest natomiast stosunkowo duży udział w zużyciu energii ciepła sieciowego, znacznie większy niż w gospodarstwach UE**

Zmiana struktury energetycznej w gospodarstwach domowych powinna być istotnym zadaniem gospodarki i ochrony środowiska. Dostrzegać należy tu istotną rolę wodoru.



ZASTOSOWANIA WODORU W ENERGETYCE (WYTWARZANIE ELEKTRYCZNOŚCI I CIEPŁA). Układy kogeneracyjne małej mocy, w tym układy hybrydowe

Ogniwa paliwowe: wodór (możliwa szersza implementacja współcześnie)

Głównym kryterium podziału instalacji kogeneracyjnych (CHP) wykorzystujących ogniwa paliwowe jest moc elektryczna ogniwa. Wyróżniamy [*Advancing Europe's energy systems: Stationary fuel cells in distributed generation. A study for the Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking, Luksemburg 2015*]:

1. **Micro-CHP**: $N_{el} \leq 1kW, N_{th} \approx 1.5kW$. Zastosowanie: domy jednorodzinne
2. **Mini-CHP**: $N_{el} \approx 5kW, N_{th} \approx 4kW$. Zastosowanie: domy wielomieszkaniowe,
3. **CHP_{bup}**: $N_{el} \approx 50kW, N_{th} \approx 40kW$. Zastosowanie: budynki użyteczności publicznej
4. **CHP_{gen.rozp}**: $N_{el} = 100 \div 250kW, N_{th} \approx 75 \div 230kW$. Generacja rozproszona
5. **CHP_{przem}**: 1.Paliwo – gaz ziemny: $N_{el} \approx 1.4MW, N_{th} \approx 1.1MW$. Zastosowanie w różnych gałęziach przemysłu; 2.Paliwo –gaz ziemny/ biogaz: $N_{el} \approx 0.4MW, N_{th} \approx 0.315MW$. Zastosowanie – przemysł spożywczy (np. browary), oczyszczanie ścieków i inne.



ZASTOSOWANIA WODORU W ENERGETYCE (WYTWARZANIE ELEKTRYCZNOŚCI I CIEPŁA). Układy kogeneracyjne małej mocy, w tym układy hybrydowe. Parametry

1. A. Sprawność ogólna (stopień wykorzystania paliwa): 88% (95%), B. Sprawność elektryczna: 36% (42%), C. Trwałość – dwukrotna zmiana ogniwa paliwowego w ciągu 10 lat (jedna zmiana w ciągu 15 lat);
 2. A. Sprawność ogólna (stopień wykorzystania paliwa):87% (98%), B. Sprawność elektryczna: 50% (60%), C. Trwałość –jednokrotna zmiana ogniwa paliwowego w ciągu 10 lat (jedna zmiana w ciągu 17 lat);
 3. A. Sprawność ogólna (stopień wykorzystania paliwa):85% (99%), B. Sprawność elektryczna: 53% (65%), C. Trwałość – dwukrotna zmiana ogniwa paliwowego w ciągu 10 lat (jedna zmiana w ciągu 20 lat);
 4. A. Sprawność ogólna (stopień wykorzystania paliwa):76% (85%), B. Sprawność elektryczna: 46% (55%), C. Trwałość – bez danych
- 5.1. A. Sprawność ogólna (stopień wykorzystania paliwa):80% (83%), B. Sprawność elektryczna: 49% (52%), C. Trwałość –trzykrotna zmiana ogniwa paliwowego w ciągu 16 lat (trzykrotna zmiana w ciągu 17 lat);
 - 5.2. A. Sprawność ogólna (stopień wykorzystania paliwa):81% (85%), B. Sprawność elektryczna: 46% (50%), C. Trwałość –trzykrotna zmiana ogniwa paliwowego w ciągu 17 lat (trzykrotna zmiana w ciągu 18 lat



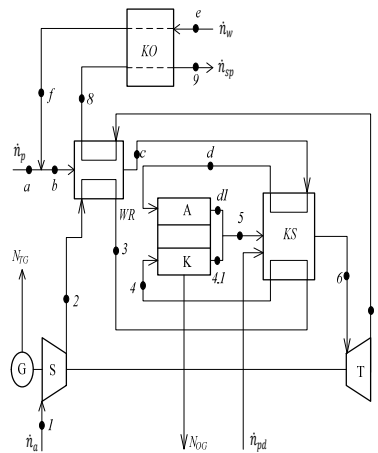
ZASTOSOWANIA WODORU W ENERGETYCE (WYTWARZANIE ELEKTRYCZNOŚCI I CIEPŁA). Układy kogeneracyjne małej mocy, w tym układy hybrydowe

- Na rynku dostępne są dla mieszkalnictwa jednorodzinnego instalacje o mocach (parametry dotyczą modułu ogniwa, nie obejmują dodatkowych urządzeń np. kotłów gazowych do pokrywanie obciążeń szczytowych) : a. $N_{el} = 1kW, N_{th} \approx 2kW$ – instalacje firmy HEXIS, sprawność ogólna 90%, sprawność elektryczna: 30-35% - ogniwo SOFC; b. $N_{el} = 0.7kW, N_{th} \approx 0.7kW$ – instalacje firmy Buderus (FC 10), sprawność ogólna 90%, sprawność elektryczna: 45% - ogniwo SOFC; c. $N_{el} = 0.75kW, N_{th} \approx 1 kW$ – instalacje firmy Viessmann (Vitovalor 300 – P), sprawność ogólna 90%, sprawność elektryczna: 37% - ogniwo PEM; d. $N_{el} = 1 kW, N_{th} = 2kW$ – instalacje firmy Vaillant, sprawność ogólna 90%, sprawność elektryczna: 31% - ogniwo PEM; e. $N_{el} = 1.5 kW, N_{th} = 0.6 kW$ – instalacje firmy CFCL, sprawność ogólna 80%, sprawność elektryczna: 60% - ogniwo SOFC.
- Podobne zróżnicowanie dotyczyć może Mini – CHP: $N_{el} = 4.6 kW, N_{th} = 6.5 kW$ – instalacje firmy Vaillant, sprawność ogólna 88%, sprawność elektryczna: 30% - ogniwo PEM; $N_{el} = 4.6 kW, N_{th} = 6.5 kW$ – instalacje firmy Bosch, sprawność ogólna 80%, sprawność elektryczna: 29% - ogniwo PEM).

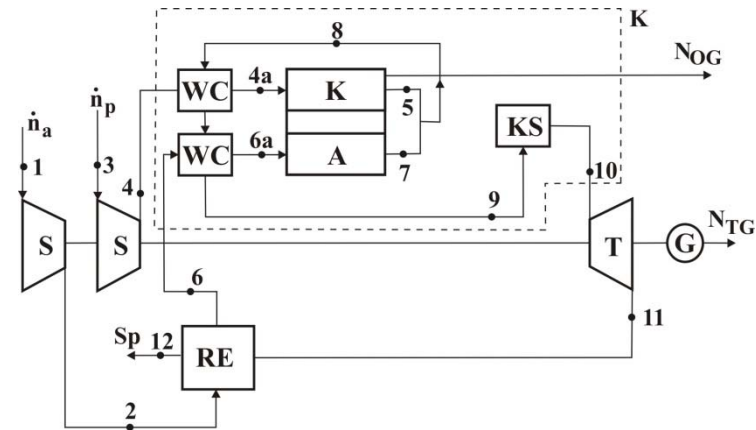


ZASTOSOWANIA WODORU W ENERGETYCE (WYTWARZANIE ELEKTRYCZNOŚCI I CIEPŁA). Układy kogeneracyjne małej mocy, w tym układy hybrydowe

Układy hybrydowe: turbina gazowa sprzężona z ogniwo paliwowym: wodór – po upowszechnieniu komercyjnych instalacji (2030-2040).



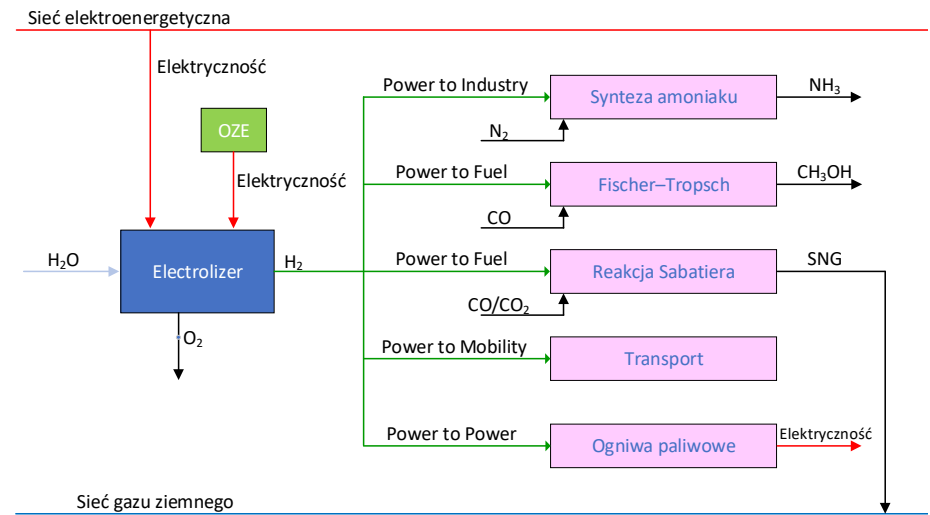
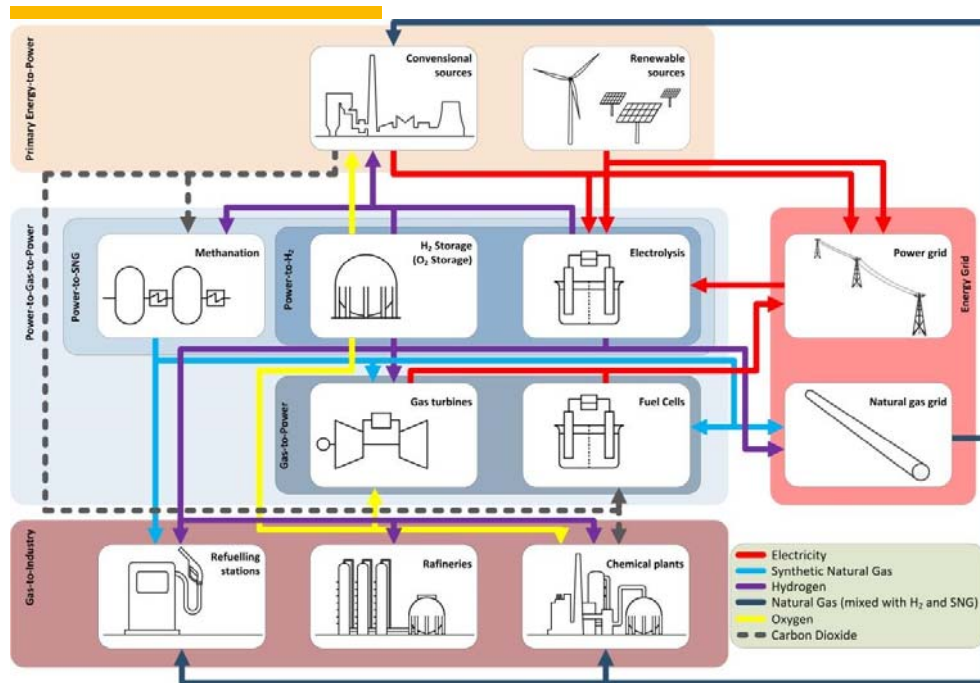
Należy oczekiwać, że w najbliższym czasie dostępne będą typoszeregi układów hybrydowych: ogniwo - mikroturbina gazowa o mocach w zakresie 250 kW do 1 MW (np. System *Megamie* firmy Mitsubishi Power System



Inne potrzeby w mieszkalnictwie: częściowe zastąpienie gazu wodorem w przygotowaniu posiłków (wykorzystanie infrastruktury gazowej w mieszkalnictwie)



Technologie Power-to-X

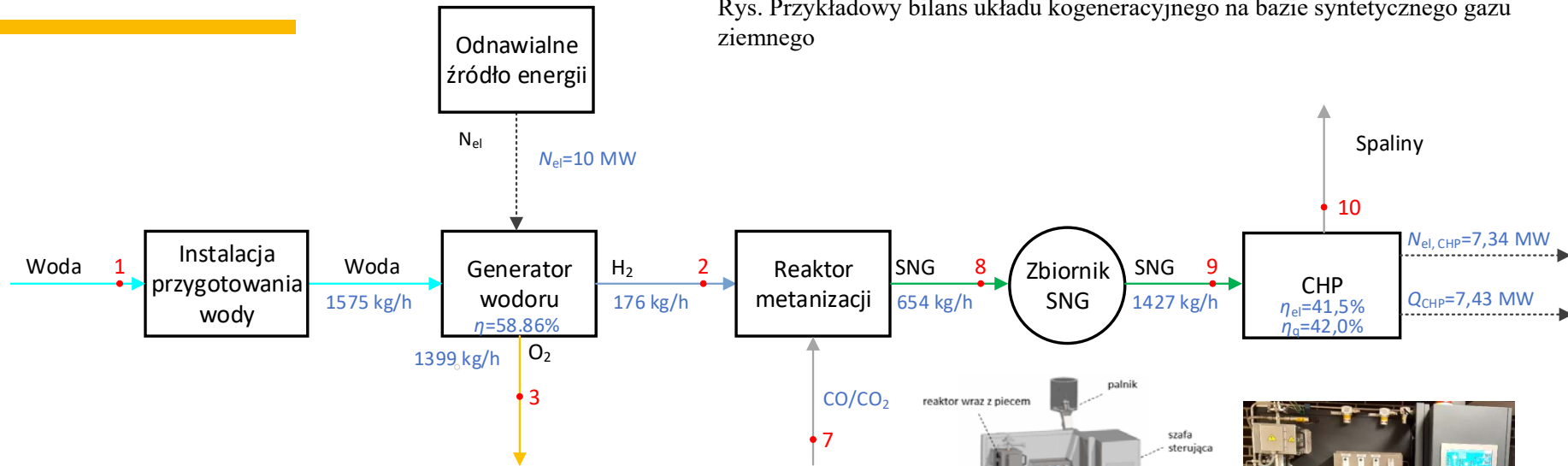


Rys. Potencjalne ścieżki wykorzystania wodoru produkowanego z odnawialnych źródeł energii

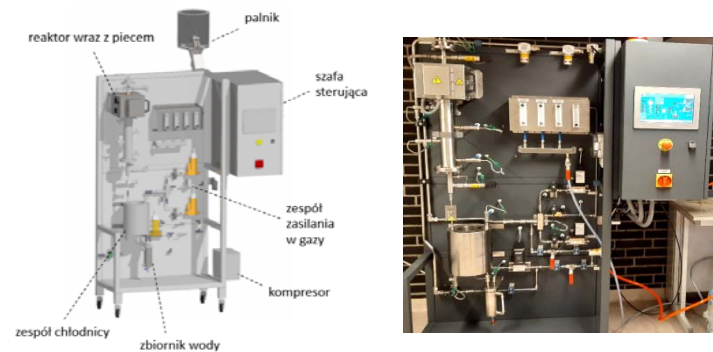


Technologie paliw syntetycznych

Rys. Przykładowy bilans układu kogeneracyjnego na bazie syntetycznego gazu ziemnego

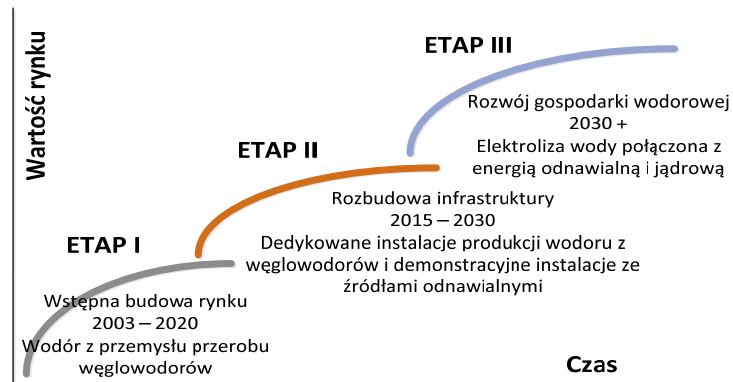


Rys. Laboratoryjna instalacja metanizacji do produkcji max 10 l/min SNG



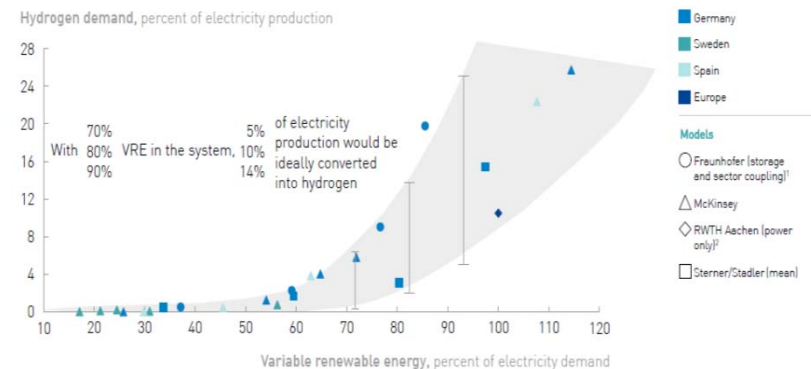
WNIOSKI KOŃCOWE

- **Struktura pozyskiwania w Polsce zarówno energii elektrycznej, jak i pierwotnej, istotnie różni się od struktury charakterystycznej dla UE. Istnieje znaczny potencjał jej dywersyfikacji.**
- **We wszystkich działach energetyki zastosowanie wodoru może ułatwić uzyskanie celów klimatycznych i ekonomicznych (efektywnościowych)**
- **Ostateczne scenariusze technologiczne wytwarzania wodoru będą zależę od stanu rozwoju OZE i ekonomiczności poszczególnych rozwiązań. Dwa główne podejścia to: a. technologie wykorzystujące tylko OZE, b. technologie wykorzystujące paliwa kopalne przy zastosowaniu przedsięwzięć separujących ditlenek węgla w tych procesach. W przyjętych strategiach dominują OZE wspomagane technologiami wykorzystującymi paliwa opalne z CCS**



Możliwe scenariusze rozwoju gospodarki wodorowej

(na podstawie: M. Ściążko, W. Nowak, Bezemisyjna przyszłość energetyki. Energetykon, Kraków 18 10 2018),



STRATEGIE WODOROWE WYBRANYCH KRAJÓW



Rys. Identyfikacja inicjatyw dot. polityk wodorowych wśród 56 krajów na świecie [Źródło: *International Hydrogen Strategies: LBST expertise for the World Energy Council, Germany, Wrzesień 2020*]

Wiele krajowych strategii dotyczących H₂ jest motywowanych redukcją emisji, innowacjami i możliwościami biznesowymi oraz wsparciem rozwoju odnawialnych źródeł energii



WNIOSKI KOŃCOWE

- Ważne jest pytanie, który scenariusz jest najprawdopodobniejszy w Polsce. Biorąc pod uwagę aktualny potencjał OZE oraz przewidywany ich rozwój do 2040r., wydaje się, że elektrolityczna produkcja wodoru w Polsce z wykorzystaniem OZE nie będzie zbyt wysoka. Wydaje się, że założenie 2 GW mocy elektrolizerów w 2030 r. w Polskiej strategii wodorowej jest bardzo (zbyt) optymistyczne (Niemcy 5 GW, Hiszpania 4 GW). Trudno natomiast przesądzić jakie będzie upowszechnienie innych technologii wytwarzania, zwłaszcza trudno ocenić udział CCS. (POLSKA STRATEGIA WODOROWA DO ROKU 2030 Z PERSPEKTYWĄ DO 2040 R. – PROJEKT: Zainstalowana moc elektrolizerów sięgnie w 2030 r. 2 GW. Produkcja wodoru – 100 – 130 tys. ton rocznie (przy 3000 – 4000 h pracy rocznie))
- W najbardziej optymistycznym scenariuszu sformułowanym dla UE udział wodoru w 2050 w końcowym zużyciu energii wynosi 24% (2 251 TWh). Przewidywana struktura jego zużycia to: 112 TWh (ok. 5%) – wytwarzanie elektryczności, bilansowanie systemu (power generation, buffering) oraz 579 TWh (25.7%) – ogrzewanie i energia dla mieszkalnictwa (heating, power for buildings, sektor 3); 237 TWh (10.5%). Ten procentowy udział przeniesiony na grunt Polski można uznać za rozsądny. Aczkolwiek bardzo szkodliwa z ekologicznego punktu widzenia struktura zużycia energii w gospodarstwach domowych, podpowiada zwiększenie udziału wodoru w tym sektorze

WNIOSKI KOŃCOWE

- **Ogólnie rzecz biorąc w energetyce i ciepłownictwie należy rozpatrywać zastosowanie wodoru w następujących obszarach:**

1. Energetyka średniej i dużej mocy

- węglowa: **brak uzasadnienia**
- gazowa średniej mocy: **wodór dla mocy szczytowych**
- gazowa - układy kombinowane: **wodór domieszkowy, paliwo syntetyczne, głównie po 2040 r**

2. Ciepłownictwo dużej i średniej mocy

- elektrociepłownie węglowe: **zastąpienie kotłów węglowych kotłami wodorowymi – wymagana analiza ekonomiczna, zakres wykorzystania wodoru ograniczony**
- elektrociepłownie gazowo- parowe - **wodór domieszkowy, paliwo syntetyczne, głównie po 2030**

3. Układy kogeneracyjne małej mocy, w tym układy hybrydowe

- ogniwa paliwowe: **wodór (możliwa szersza implementacja wspólnie)**
- układy hybrydowe: turbina gazowa sprzężona z ogniwem paliwowym: **wodór – po upowszechnieniu komercyjnych instalacji (2030 -2040).**

- 4. **Inne potrzeby w mieszkalnictwie:** częściowe zastąpienie gazu wodorem w przygotowaniu posiłków (wykorzystanie infrastruktury gazowej w mieszkalnictwie)



DZIĘKUJE ZA UWAGĘ

Tadeusz.chmielniak@polsl.pl



**Politechnika
Śląska**



**Katedra Maszyn
i Urządzeń Energetycznych**

34

www.kmiue.polsl.pl

Ceny wodoru

Koszty wytwarzania wodoru z paliw kopalnych i biomasy potwierdzają fakt największej efektywności termodynamicznej i ekonomicznej technologii reformingu parowego gazu i ropy naftowej. Doskonalenie tej klasy metod wytwarzania wodoru powinno obok zwiększenia efektywności ekonomicznej obejmować redukcję emisji ditlenku węgla z procesów wytwarzania. Zróżnicowanie geograficzne wynika głównie z faktu, że głównym składnikiem kosztu jest cena dostępnego paliwa – substratu. I tak np. cena wodoru z reformingu gazu ziemnego bez instalacji CCUS w USA jest równa ok. 1 USD/kg H₂, po zastosowaniu wychwytu ditlenku węgla wzrasta do 1.5 USD/kg H₂. Odpowiednie ceny dla UE są równe: 1.7 USD/kg H₂, 2.35 USD/kg H₂. Dla Chin można przyjąć: 1.75 USD/kg H₂, 2.4 USD/kg H₂. W wypadku Rosji i krajów Środkowego Wschodu ceny są porównywane do cen w USA [1]. Koszty inwestycyjne mieszczą się w granicach 500 – 900 USD/ kW_{H2} dla układów bez CCUS i 900 – 1600 USD/ kW_{H2} dla CCUS. **W Polsce cena generacji wodoru drogą reformingu parowego wynosi ok. 7zł za kg wodoru przy cenie gazu 1200 zł za 1000m³ (bez separacji ditlenku węgla). Koszt wytwarzania wodoru z węgla zależy od zastosowanej technologii zgazowania, ceny surowca, stosowania lub niestosowania procesu separacji ditlenku węgla w procesie zgazowania. Dostępne źródła podają wartości z przedziału 0.71 – 3.13 USD/ kg H₂. Dane z rynku chińskiego i amerykańskiego to wartości: 1.1 – 1.34 USD/kg H₂ w przypadku bez sekwestracji CO₂ i 1.47 – 1.63 USD/kgH₂ z sekwestracją ditlenku węgla. **Z polskich analiz przeprowadzanych dla różnych instalacji zgazowania węgla koszt dla układu bez separacji CO₂ wynosi 5.5 – 6.5 zł/ kg H₂. Jest on porównywany z reformingiem parowym przy cenie gazu z przedziału 930 – 1100zł/1000m³****

