



Technologie wodorowe

inż. Michał Maciejewicz



Pierwsze ograniczenie pracy instalacji fotowoltaicznych w 2024 już za nami

Piotr Pająk 05-03-2024



- Pierwsze nierynkowe redysponowanie instalacji fotowoltaicznych PSE zarządził wiosną zeszłego roku (2023) – 23 i 30 kwietnia – a następnie 2 lipca i 8 października 2023 r. Za każdym razem miało to miejsce w niedziele w godzinach południowych przy dużej generacji elektrowni fotowoltaicznych i ograniczonym zapotrzebowaniu na energię w kraju.
- Redukcja mocy 3 marca 2024 wyniosła:
815 MW w godz. 12.00-13.00
741 MW w godz. 13.00-14.00
594 MW w godz. 14.00-15.00

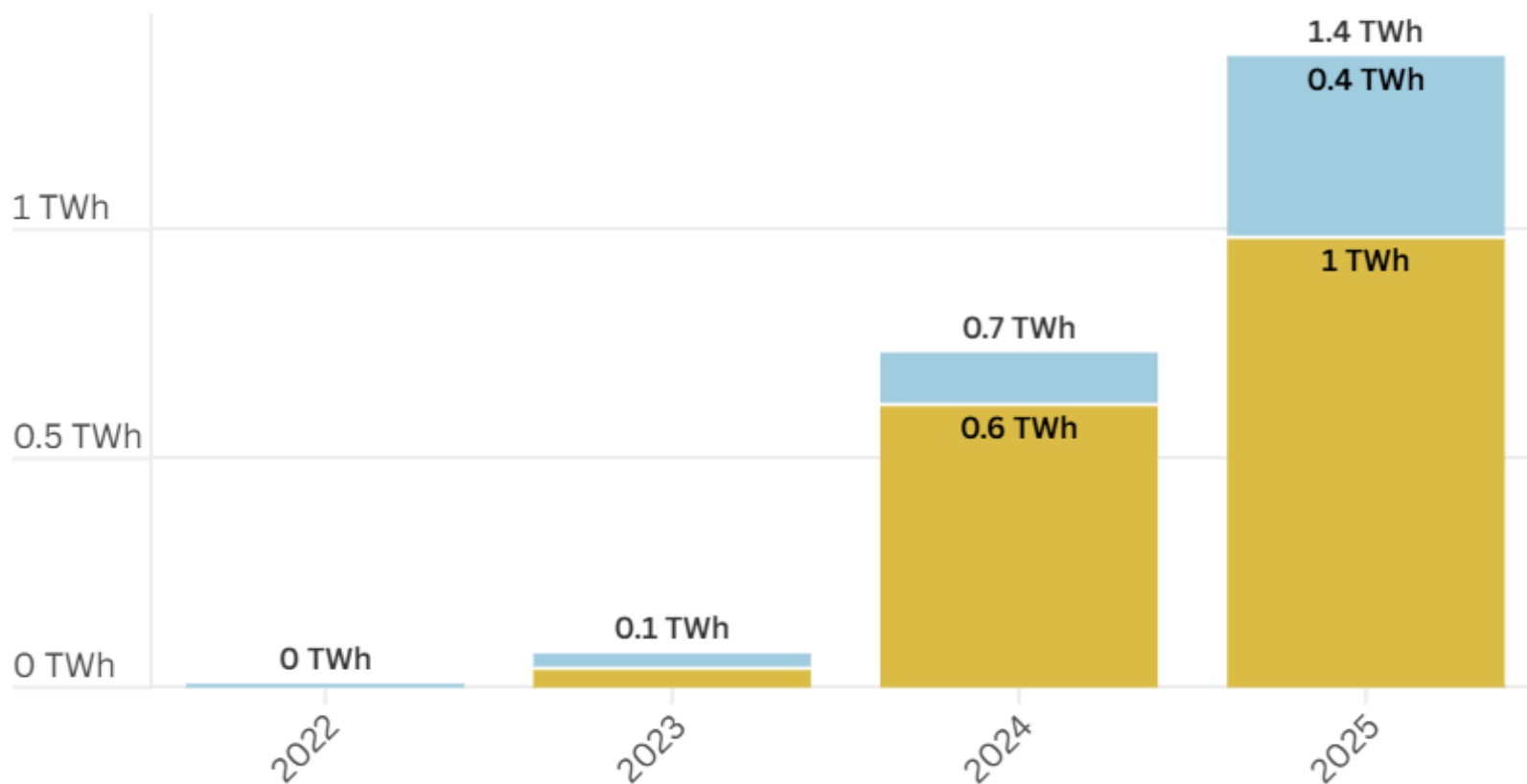
Źródło:

<https://www.gramwzielone.pl/bez-kategorii/20187934/pierwsze-ograniczenie-pracy-instalacji-fotowoltaicznych-w-2024-juz-za-nami>

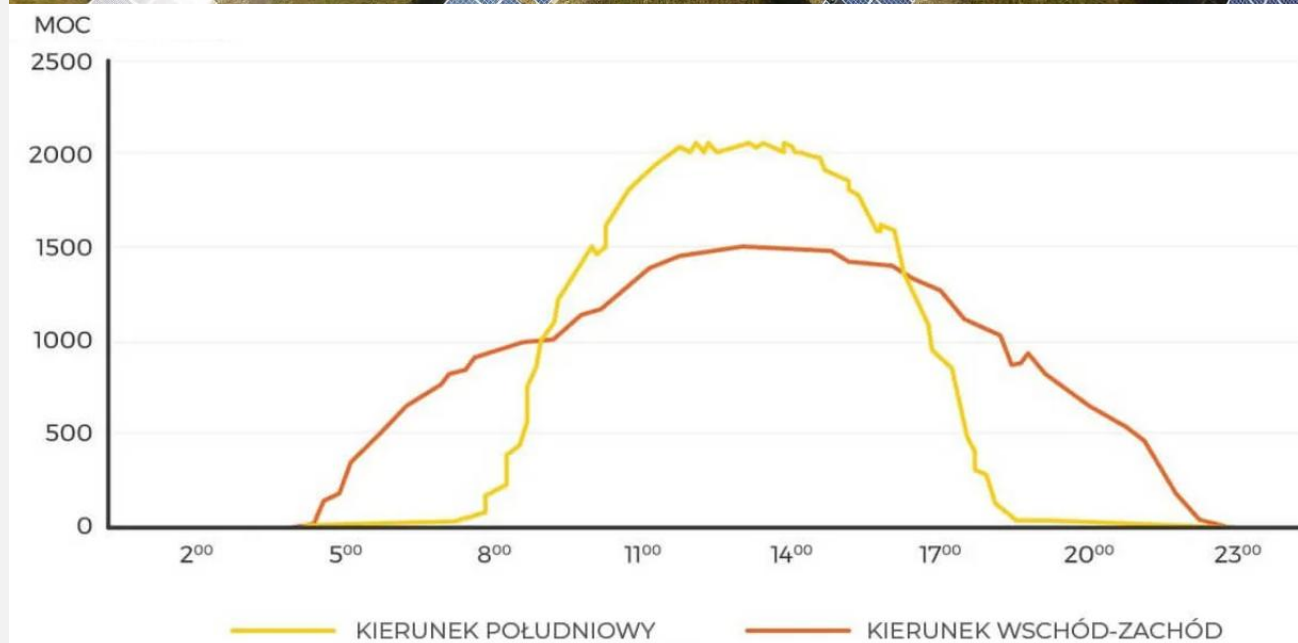
Rok	Wolumen energii ograniczonej (GWh)	Dynamika wzrostu	Kluczowe fakty
2023	ok. 24 GWh	-	Pierwsze znaczące redukcje na polecenie PSE.
2024	ok. 597 GWh	+2362% r/r	Rekordowa redukcja chwilowa 1 maja: 4 749 MW .
2025	ok. 6%	-	Szacunkowy udział energii niedostarczonej w całkowitej produkcji PV.

Nierynkowe redysponowanie farm wiatrowych i nieprosumentckich instalacji PV

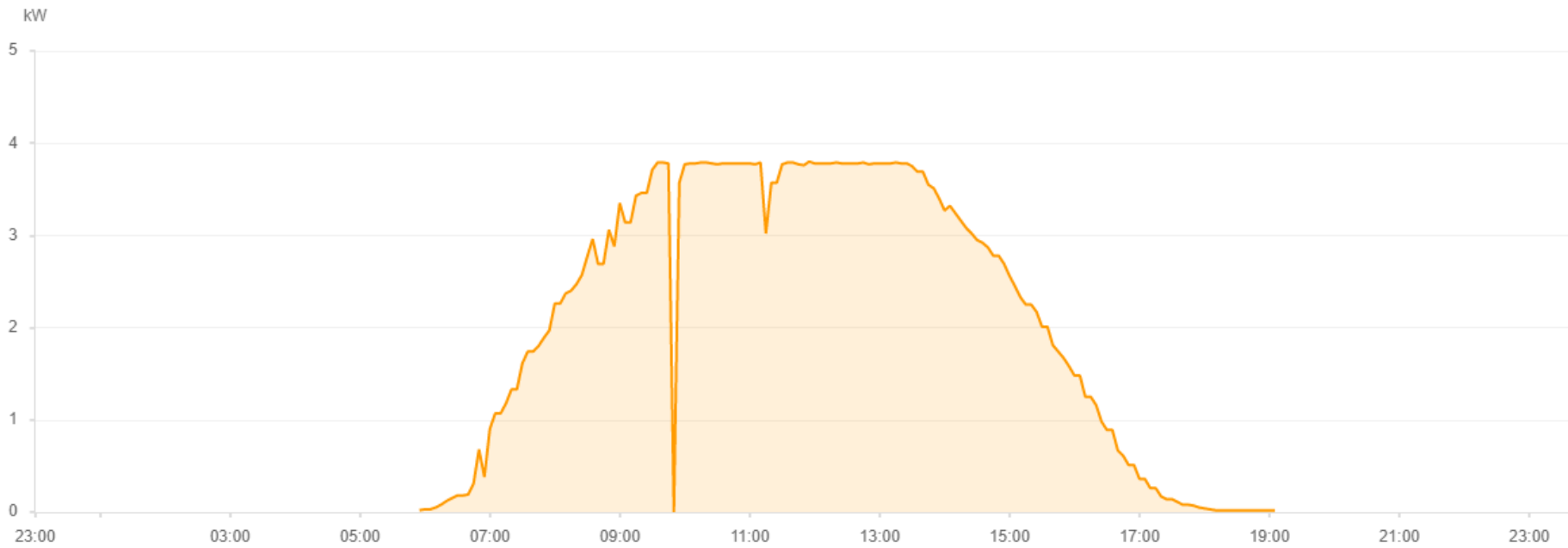
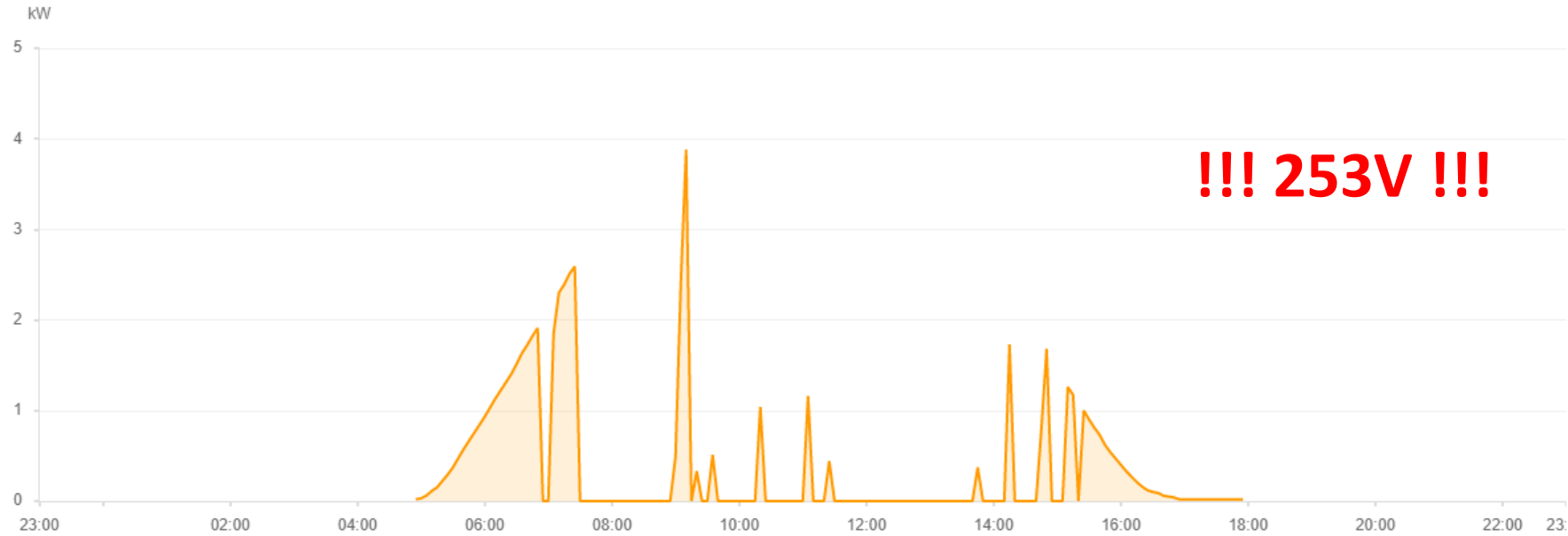
 PV (nieprosumentckie)  Wiatr onshore



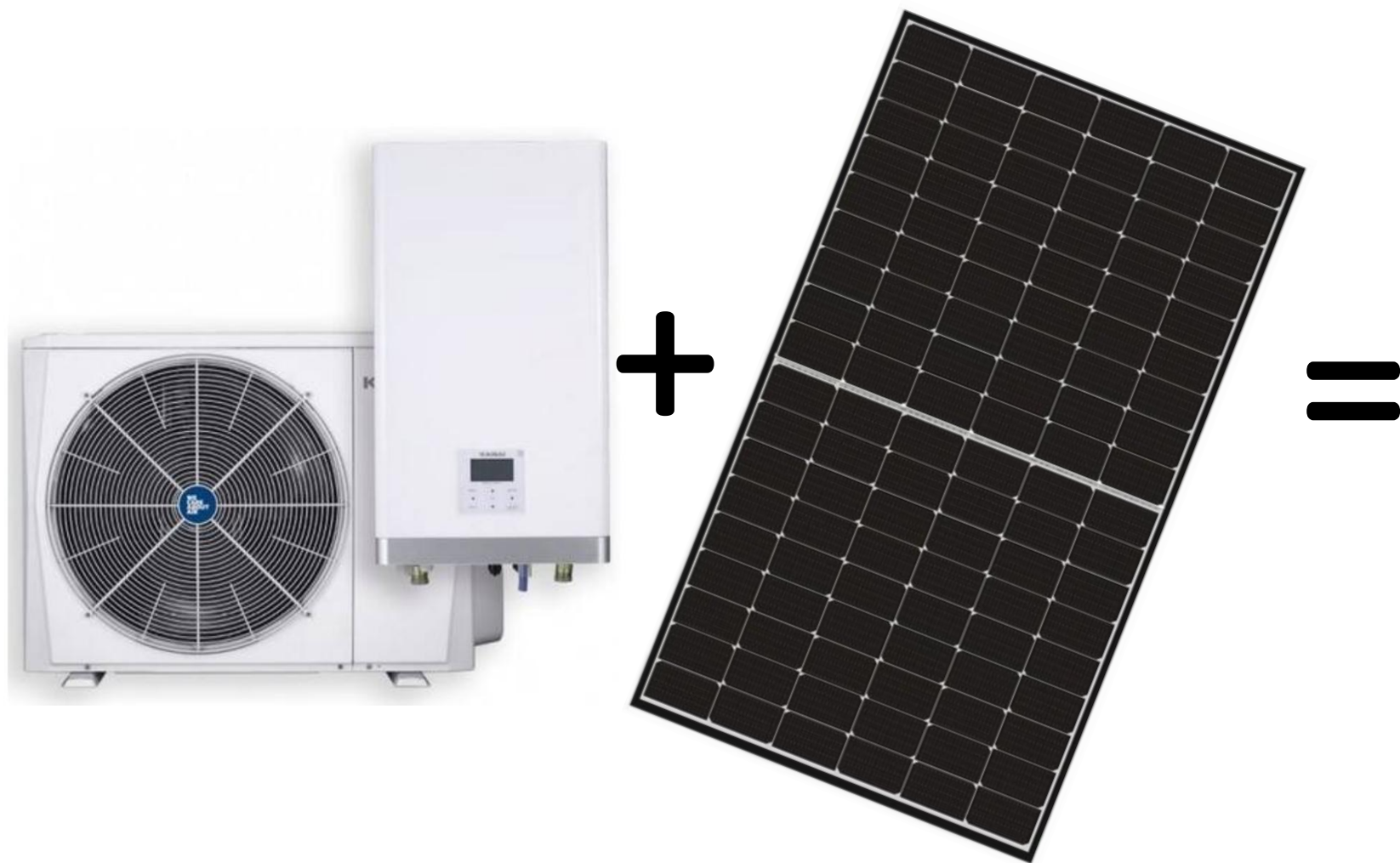
Najnowsze trendy w fotowoltaice



A co z Prosumentami?



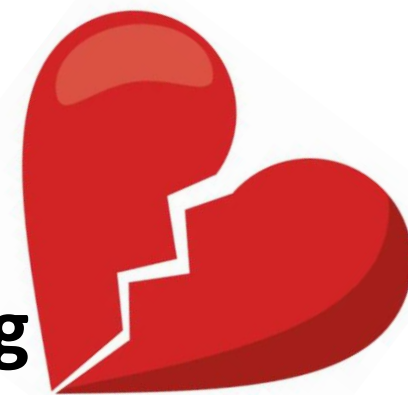
Pompy ciepła i fotowoltaika?



Net-metering



Net-billing

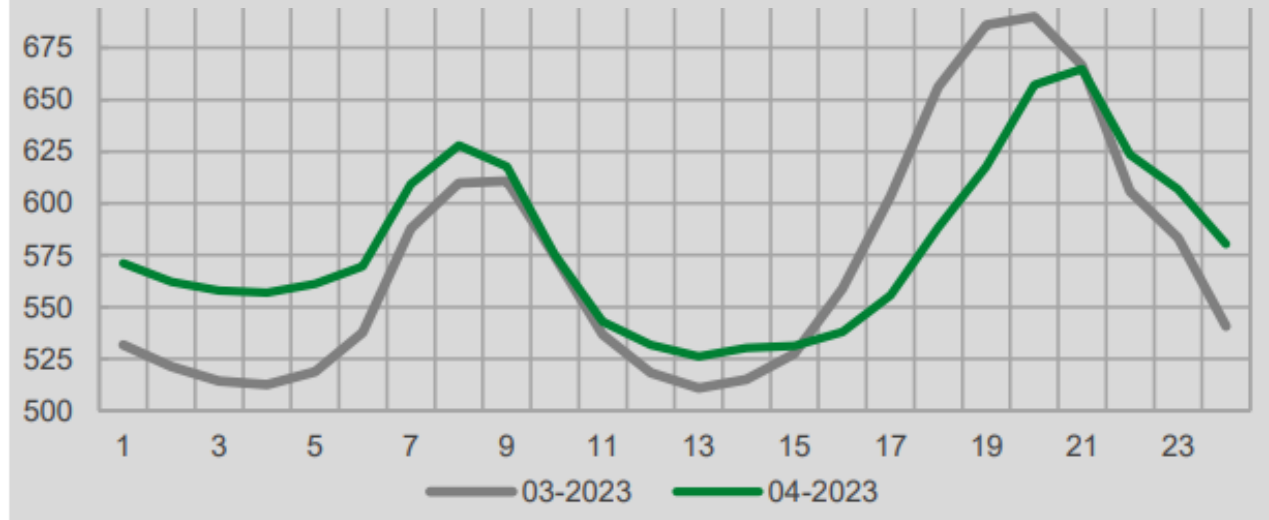
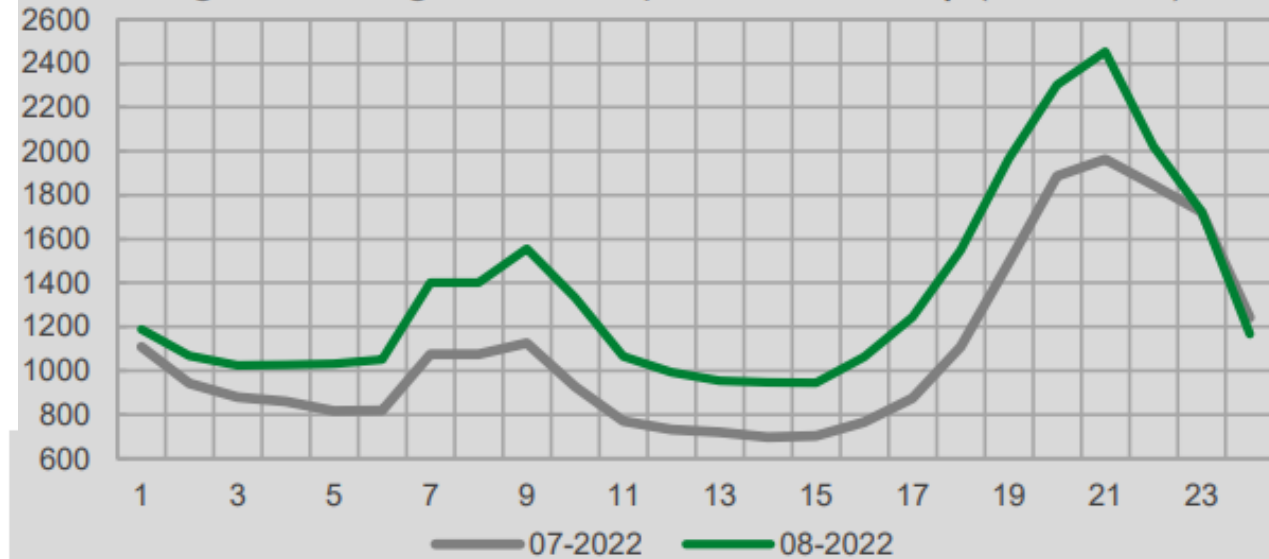


Ceny energii elektrycznej

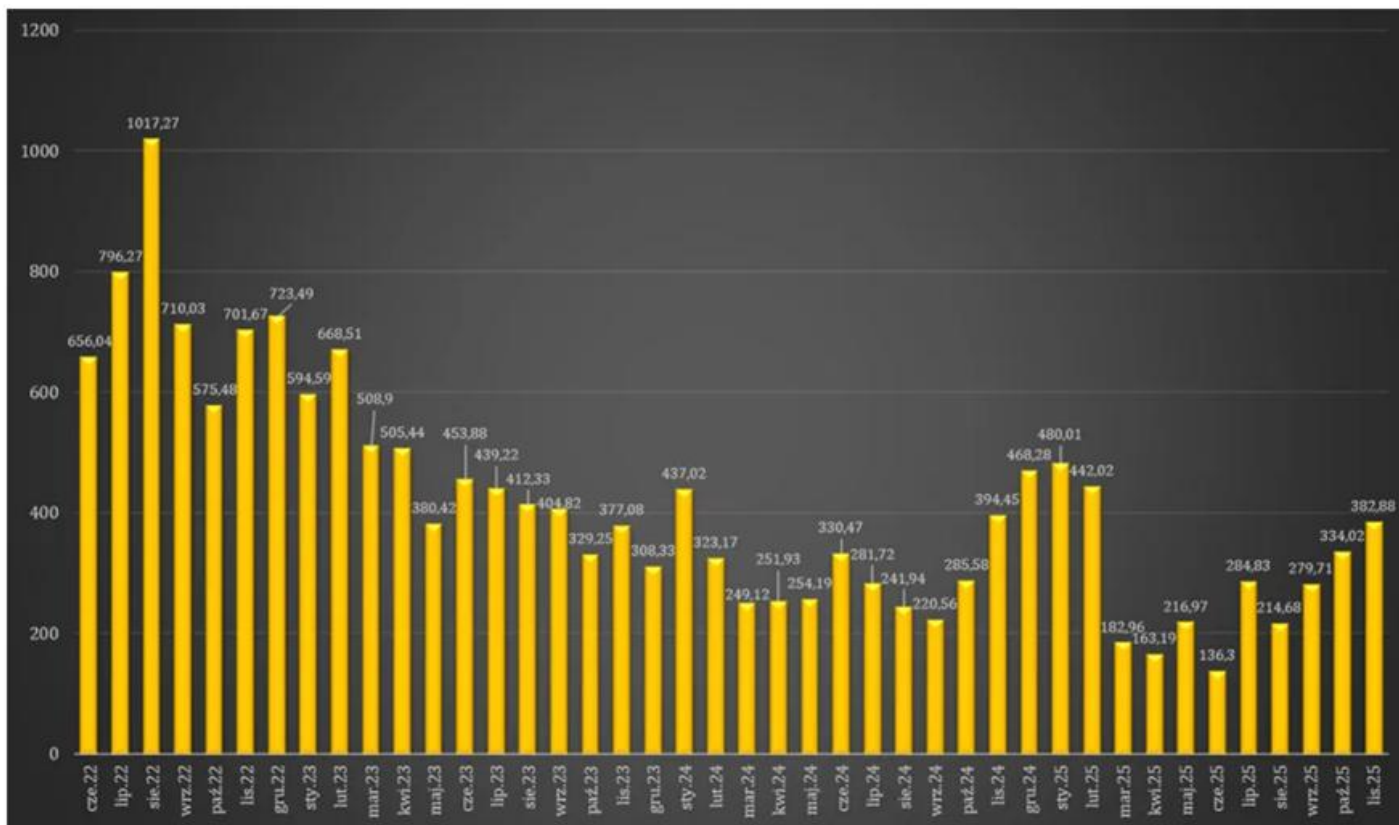
2022			
	cena [zł/MWh]**	data publikacji	różnica skorygowanej RCEm od poprzednio obliczonej ceny [%]
czerwiec			
RCEm	659,29	11.07.2022	-
skorygowana RCEm*	648,16	11.08.2022	-1,69
skorygowana RCEm*	656,04	11.10.2022	1,22
lipiec			
RCEm	799,79	11.08.2022	-
skorygowana RCEm*	796,27	11.09.2022	-0,44
sierpień			
RCEm	1023,42	11.09.2022	-
skorygowana RCEm*	1019,06	11.10.2022	-0,43
skorygowana RCEm*	1017,27	11.08.2023	-0,18
wrzesień			
RCEm	711,92	11.10.2022	-
skorygowana RCEm*	710,03	11.01.2023	-0,27

2025			
czerwiec			
RCEm	136,30	11.07.2025	-
skorygowana RCEm*	-	-	-
lipiec			
RCEm	284,83	11.08.2025	-
skorygowana RCEm*	-	-	-
sierpień			
RCEm	214,68	11.09.2025	-
skorygowana RCEm*	-	-	-
wrzesień			
RCEm	279,71	11.10.2025	-

Miesięczne średnioważone ceny dla 24 godzin doby | Monthly Weighted Average Prices for particular hours | (PLN/MWh)



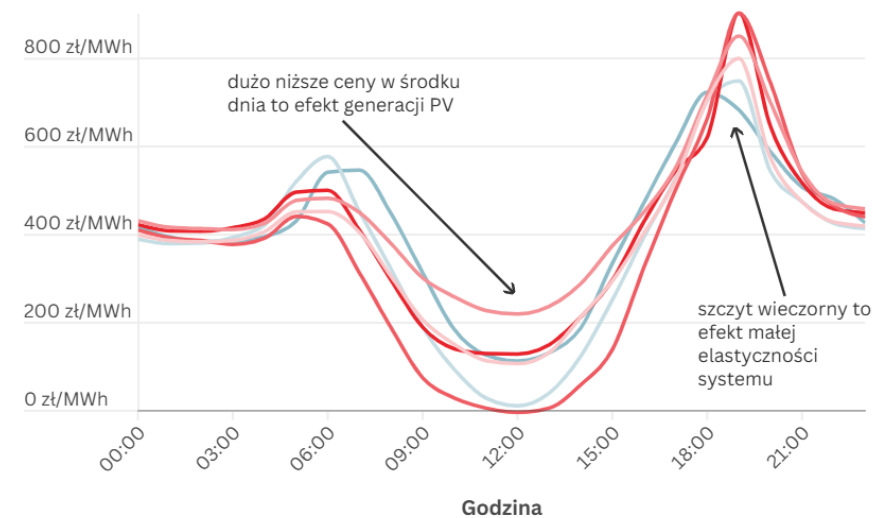
Źródła: www.pse.pl/, www.tge.pl/dane-statystyczne



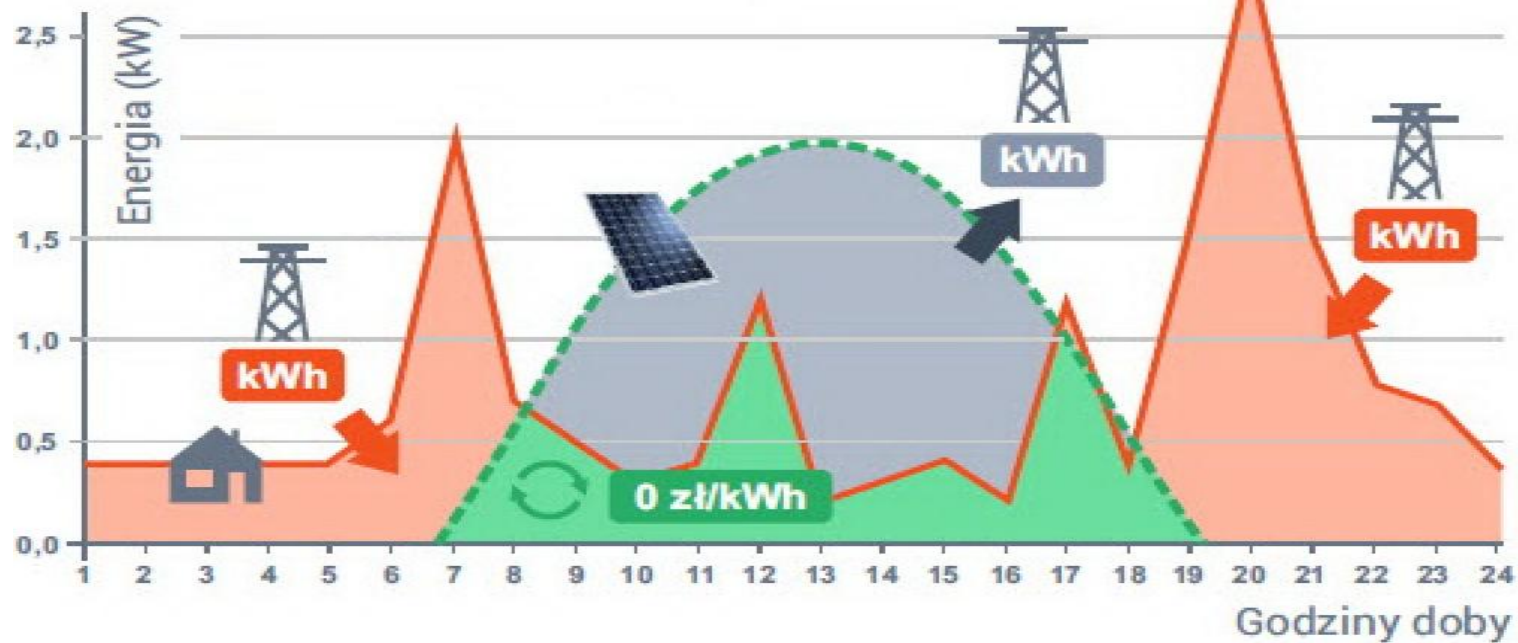
Cena energii elektrycznej na Rynku Dnia Następnego w 2025



■ sty
 ■ lut
 ■ mar
 ■ kwi
 ■ maj
 ■ cze
 ■ lip
 ■ sie
 ■ wrz
 ■ paź
 ■ lis
 ■ gru



Magazyny energii elektrycznej



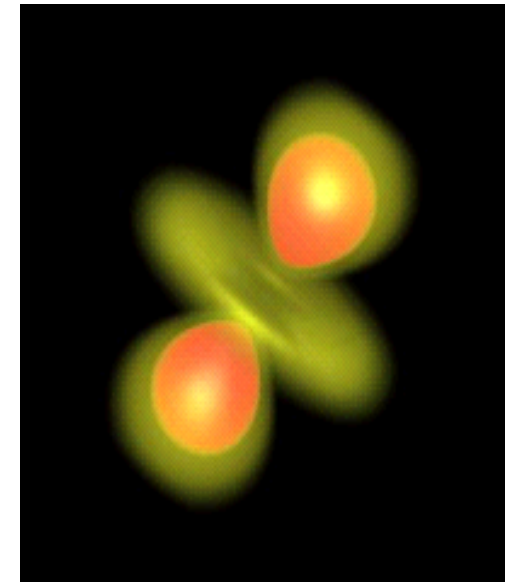
Źródło: pvinfo.pl



Czy wodór rozwiąże nasze problemy?

Wodór i jego charakterystyka:

- bezbarwny i bezwonny gaz
- gęstość zaledwie $0,0899 \text{ kg/m}^3$
- najlżejszy pierwiastek występujący we Wszechświecie
- ma najwyższą wartość energii spalania z jednostki masy
- ma małą energię inicjacji zapłonu - przez co jego spalanie jest sprawniejsze
- ma szeroki zakres zapalności - od 4 do 75% wodoru w mieszaninie z powietrzem
- produktem spalania wodoru jest czysta woda
- jego zapasy są praktycznie niewyczerpalne - można go uzyskać przez rozkład wody, a po spalaniu ponownie tworzy wodę



Wizualizacja wodoru

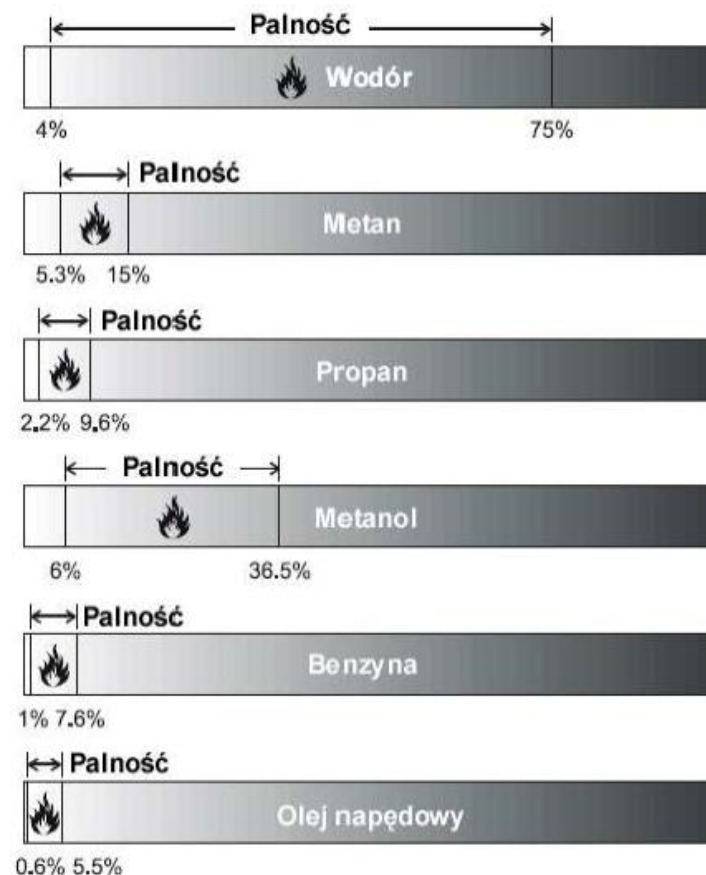
GŁÓWNE WŁAŚCIWOŚCI WODORU

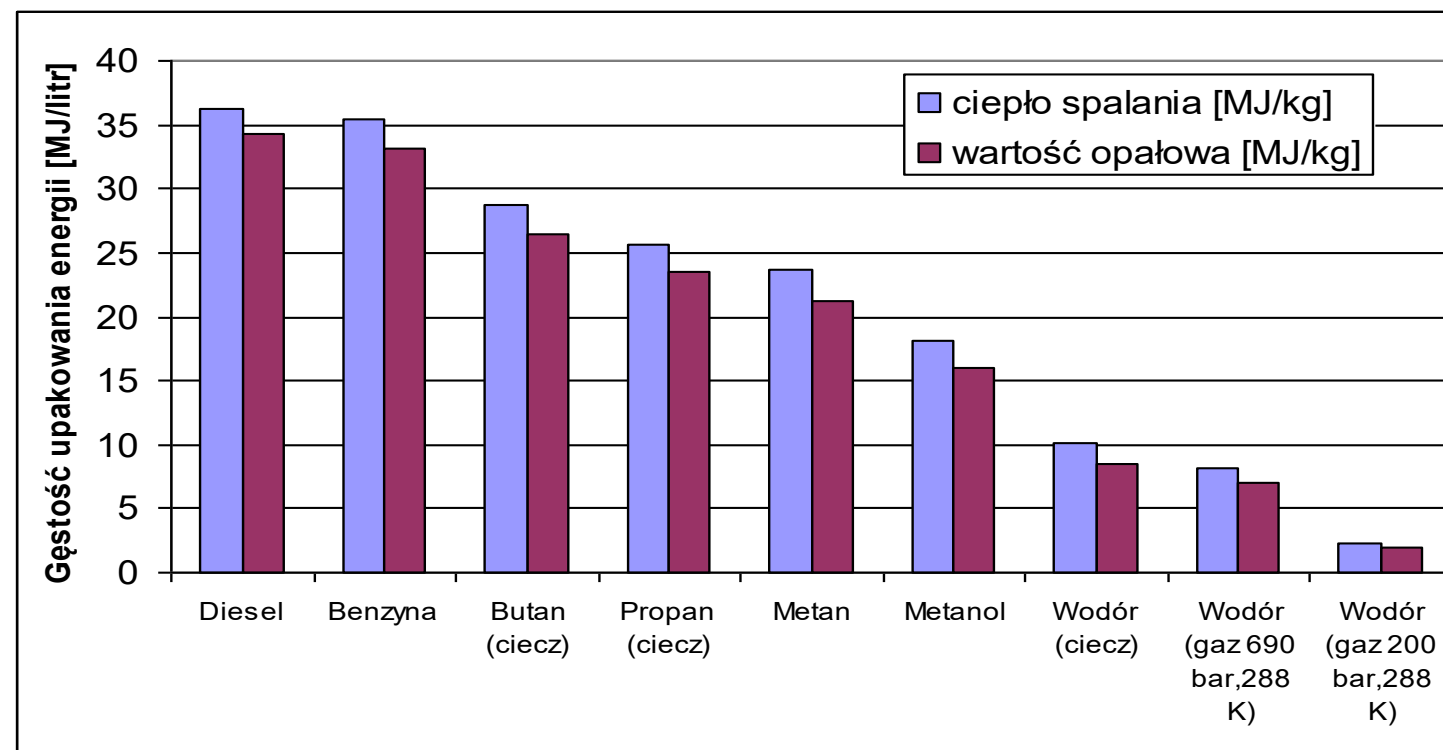
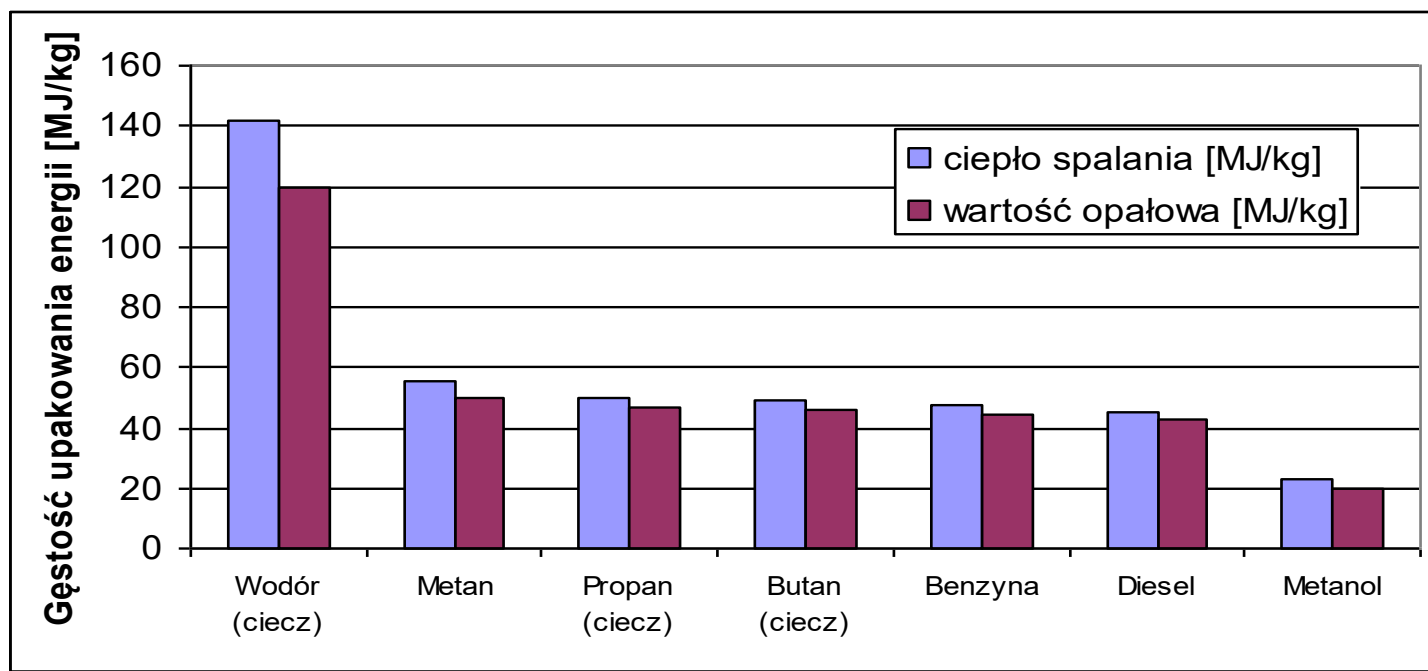
Wartość opałowa różnych paliw:

PALIWO	WARTOŚĆ OPAŁOWA (25°C, 1atm) [kJ/g]
Wodór	119,93
Metan	50,02
Propan	45,60
Benzyna	44,50
Olej napędowy	42,50
Metanol	18,05

Wodór posiada najwyższą wartość opałową w przeliczeniu na gram, około pięciokrotnie więcej od węgla i trzykrotnie więcej od gazu ziemnego.

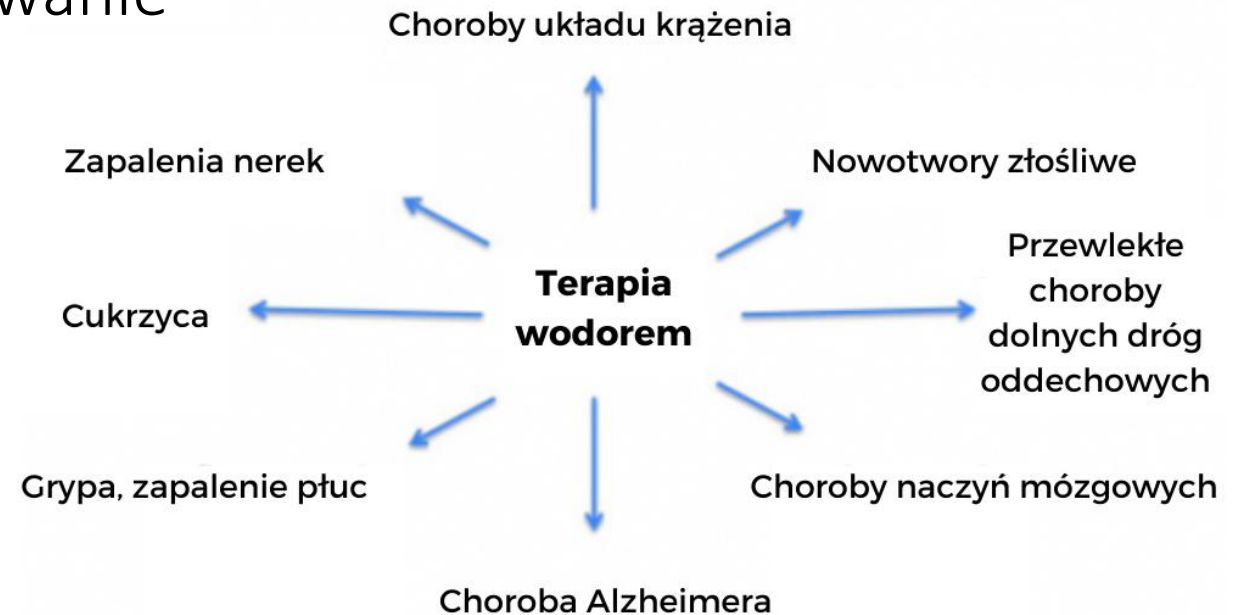
Granice palności różnych paliw:





Inne zastosowania wodoru:

- przemysł spożywczy - produkcja margaryny, konserwant E949
- przemysł rolniczy – nawozy (amoniak)
- przemysł petrochemiczny – polepszenie jakości paliw – przerabianie nafty
- przemysł motoryzacyjny – jako paliwo
- przemysł metalurgiczny – do produkcji stali
- przemysł medyczny - pozytywne zastosowanie wodoru w leczeniu ok 170 chorób



Skąd wziąć wodór?

Metody wytwarzania wodoru

- Reforming węglowodorów parą wodną
- Gazyfikacja:
 - węgla i koksu
 - biomasy
- Dysocjacja termiczna
- Elektroliza
- Fotoelektroliza
- Procesy biologiczne
 - fermentacja mikroorganizmów
 - fotosynteza glonów (algi morskie)

Metody produkcji wodoru – podział na kolory

- **ZIELONY (ODNAWIALNY)** – elektroliza wody z wykorzystaniem energii odnawialnej, a także reforming biogazu, czyli biochemiczne przekształcanie biomasy
- **(ŻÓŁTY)** - elektroliza wody z wykorzystaniem energii słonecznej -podtyp zielonego wodoru
 - **CZARNY** - gazyfikacja węgla kamiennego
 - **BRAŹOWY** - gazyfikacja węgla brunatnego
- **SZARY** - reforming gazu ziemnego lub innych węglowodorów powstałych w procesie rafinacji ropy naftowej
- **FIOLETOWY** - elektroliza wody z wykorzystaniem energii elektrycznej produkowanej w elektrowniach atomowych
- **NIEBIESKI** – procesy wykorzystujące paliwa kopalne, uzupełnione o technologie wychwytywania, składowania lub przetwarzania CO₂
 - **BIAŁY** - pochodzi z naturalnych źródeł geologicznych
 - **TURKUSOWY** - piroliza metanu lub przetwarzanie odpadowych tworzyw sztucznych



Przegląd metod pozyskiwania wodoru

POZIOMY GOTOWOŚCI TECHNOLOGICZNEJ

(ang. TRL – Technology Readiness Levels)



ŹRÓDŁO: OPRACOWANIE WŁASNE AGENCJI ROZWOJU PRZEMYSŁU S.A.

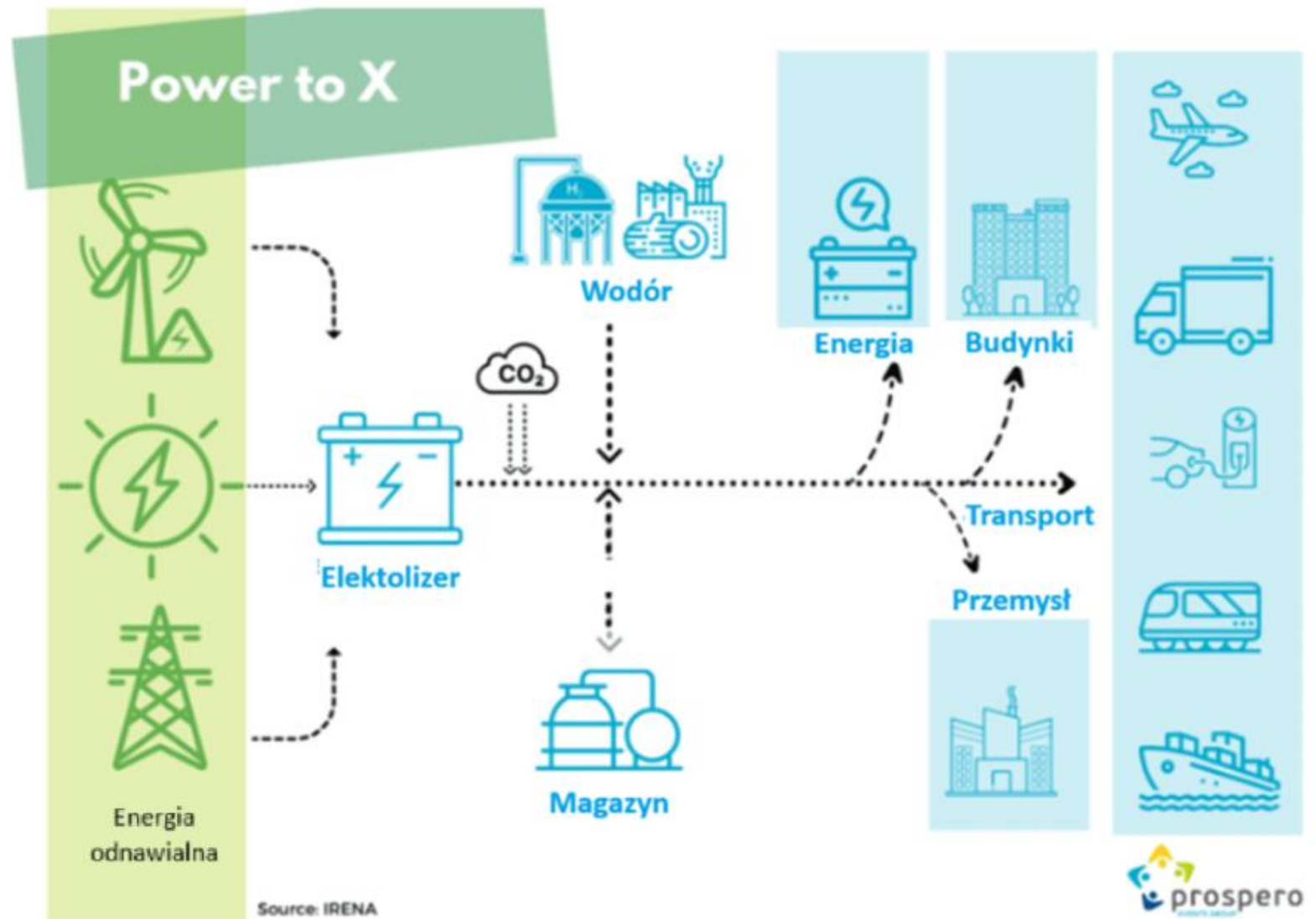
Metoda pozyskiwania wodoru	Emisyjność CO ₂ (kgCO ₂ /kg H ₂)	TRL	Koszt produkcji (EUR/kg)
Elektroliza zasilana z OZE (farmy wiatrowe)	0-0,2	7-9	4-6
Elektroliza zasilana z OZE (fotowoltaika)	0-0,2	7-9	5-7
Elektroliza zasilana z siłowni jądrowych	0-0,2	6-7	5-7
Elektroliza zasilana z sieci krajowej	0-30 (zależna od struktury produkcji energii elektrycznej w kraju)	7-9	3-9 (zależna od struktury produkcji energii elektrycznej w kraju)
Gazyfikacja węgla	15-20	9	3-5
Reforming parowy metanu	8-12	9	2-4
Przerób odpadów	7-9	5-7	7-9
Procesy termochemiczne	0-15	5-6	3-9
Piroliza gazu ziemnego	0	4-5	5-7
Reforming parowy biogazu	2-3	5-7	6-7
Gazyfikacja biomasy	2-3	6-8	4-6
Pozostałe metody (m.in. membrany do separacji wodoru, fotoliza, ciemna fermentacja biomasy, procesy biologiczne, deoksydacja wody)	bardzo niska	2-3	powyżej 10

Power-to-x

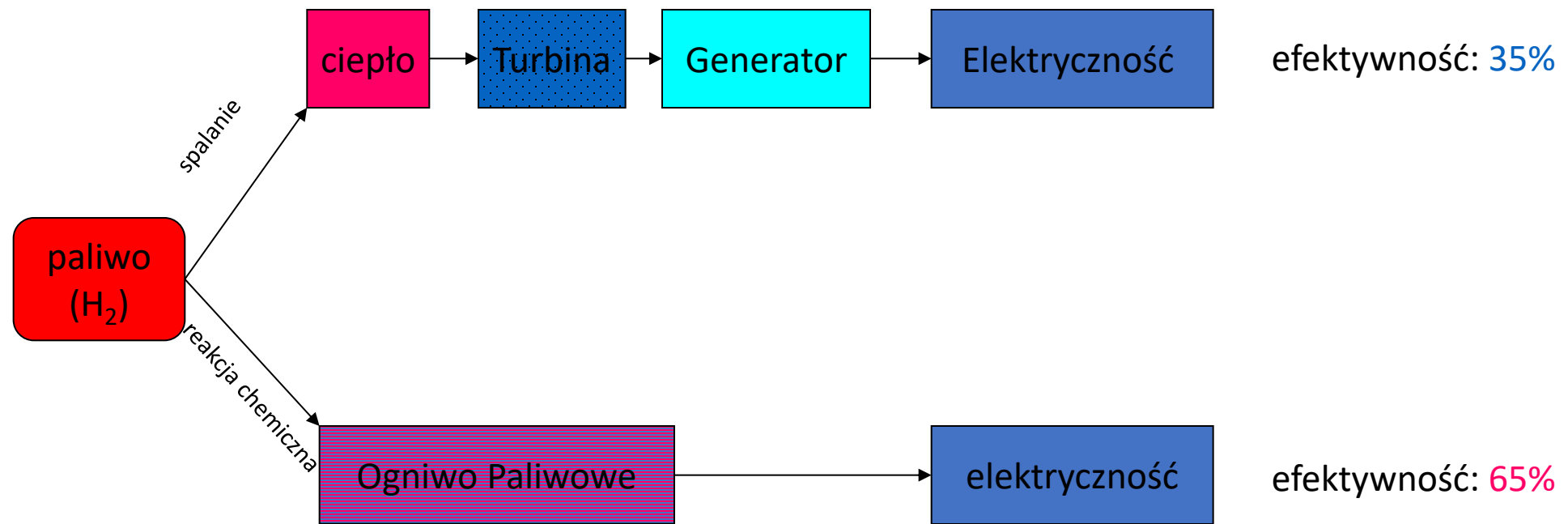
Termin **Power-to-X (P2X)** obejmuje procesy przekształcania energii elektrycznej pochodzącej ze źródeł odnawialnych w substancję lub nośnik energii („X”).

P2X może być odpowiedzią na wszystkie sektory gospodarki i gałęzie przemysłu, które nadal opierają się na paliwach kopalnych. Wyróżniamy między innymi:

- **Power-to-Gas** - „X” może być w postaci gazowej, takiej jak gazowy wodór lub metan syntetyczny.
- **Power-to-Liquid** - „X” może być płynnym paliwem syntetycznym.

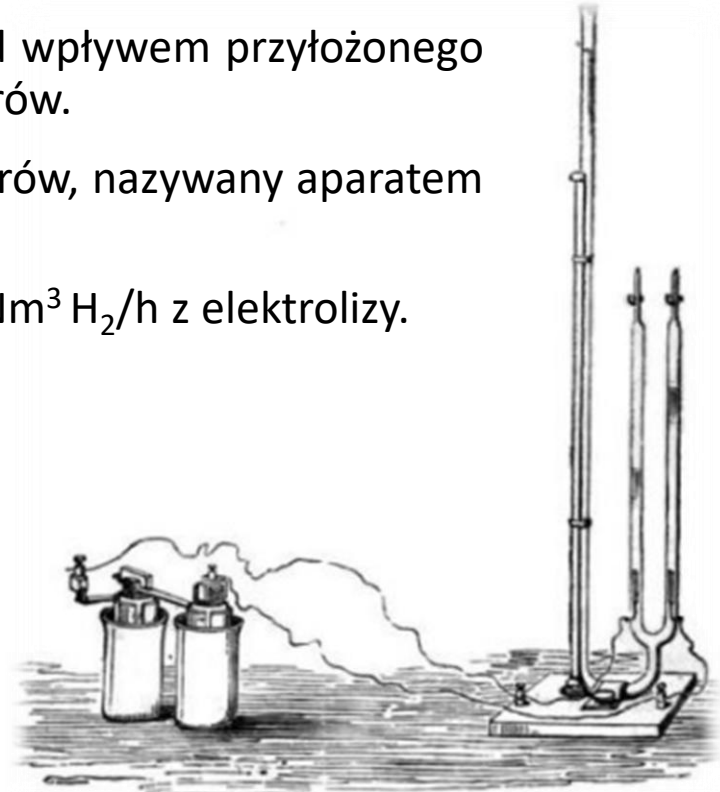


Produkcja energii elektrycznej



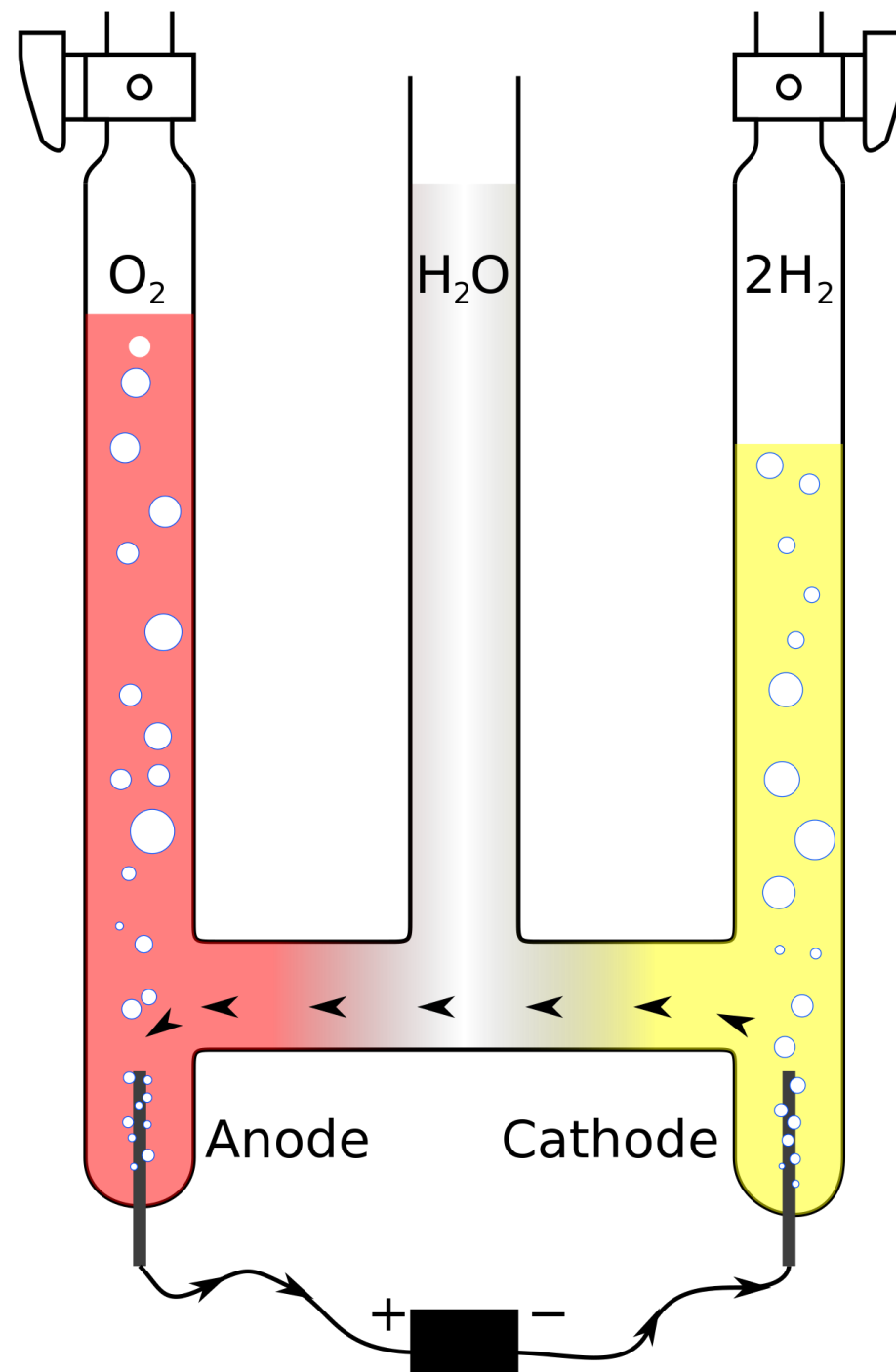
Rys historyczny

- 1671 r. - irlandzki chemik Robert Boyle odkrył wodór poprzez reakcję metali i kwasów, nazwał go łatwopalnym powietrzem.
- 1776 r. - Henry Cavendish wyodrębnił wodór jako osobną substancję oraz opisał reakcję spalania, właściwości i zastosowanie wodoru.
- 1800 r. - Nicholson i Carlisle odkryli zjawisko rozpadu wody na jony pod wpływem przyłożonego napięcia, a sto lat później działało ponad 400 przemysłowych elektrolizerów.
- 1866 r. - August von Hoffman wynalazł jeden z najprostszyc elektrolizerów, nazywany aparatem Hofmanna lub eudiometrem Hofmanna.
- 1939 r. - działanie rozpoczął pierwszy duży zakład wytwarzający 10 000 Nm³ H₂/h z elektrolizy.



Aparat Hofmanna

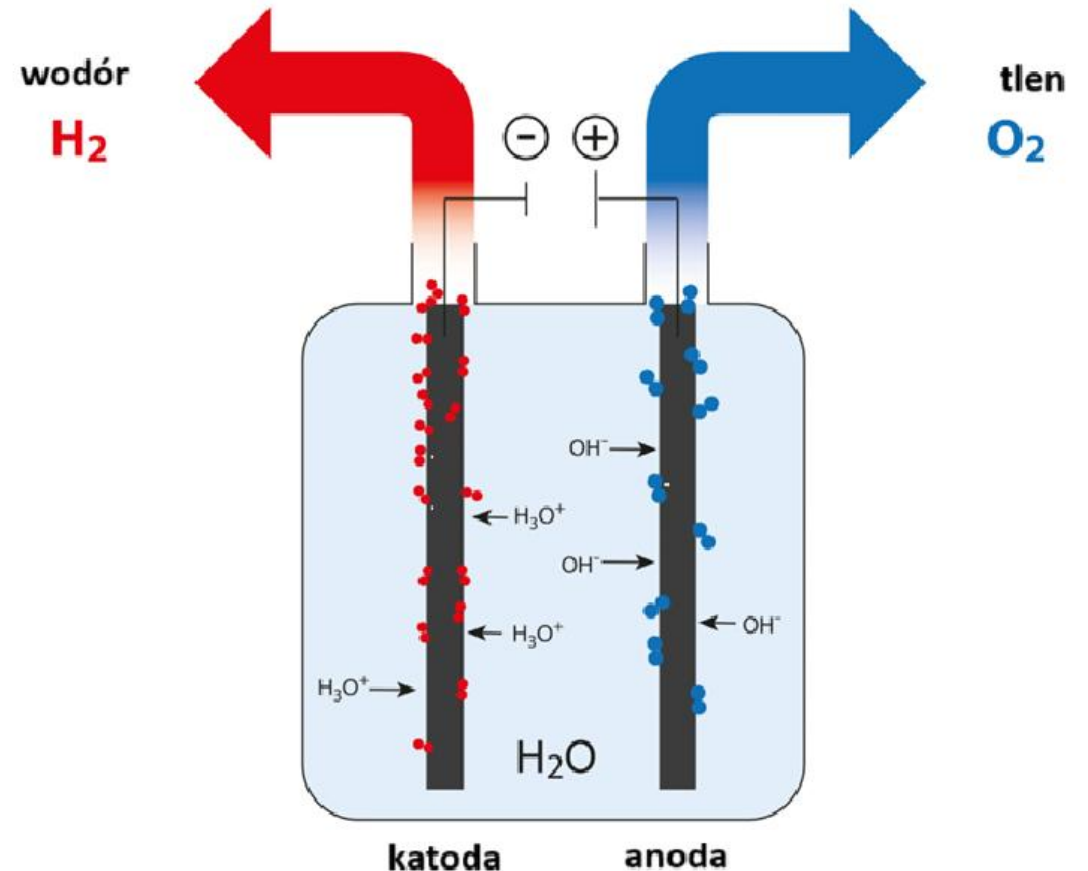
- Składa się z dwóch szklanych rurek z kranikami na szczycie i podziałką, połączonych z pojemnikiem na wodę. Na katodzie zachodzi redukcja i wydzielanie się cząsteczkowego wodoru, a na anodzie utlenienie z wydzieleniem cząsteczkowego tlenu.
- Aparat napełnia się wodą destylowaną z dodatkiem kwasu siarkowego(VI) bądź innego elektrolitu do maksymalnego poziomu w obu rurkach.
- Na końcach rurek znajdują się korki z elektrodami platynowymi, które podpinają się do źródła prądu - katodę do ujemnego bieguna baterii, a anodę do dodatniego.
- Podczas procesu woda jest wypierana przez gaz z obu rurek. Tam, gdzie znajdowała się anoda, poziom wody jest znacznie wyższy niż w przypadku rurki z katodą. Stosunek objętości zebranych gazów powinien wynosić 1:2, czyli tyle, ile moli gazów otrzymujemy podczas rozkładu dwóch moli wody.



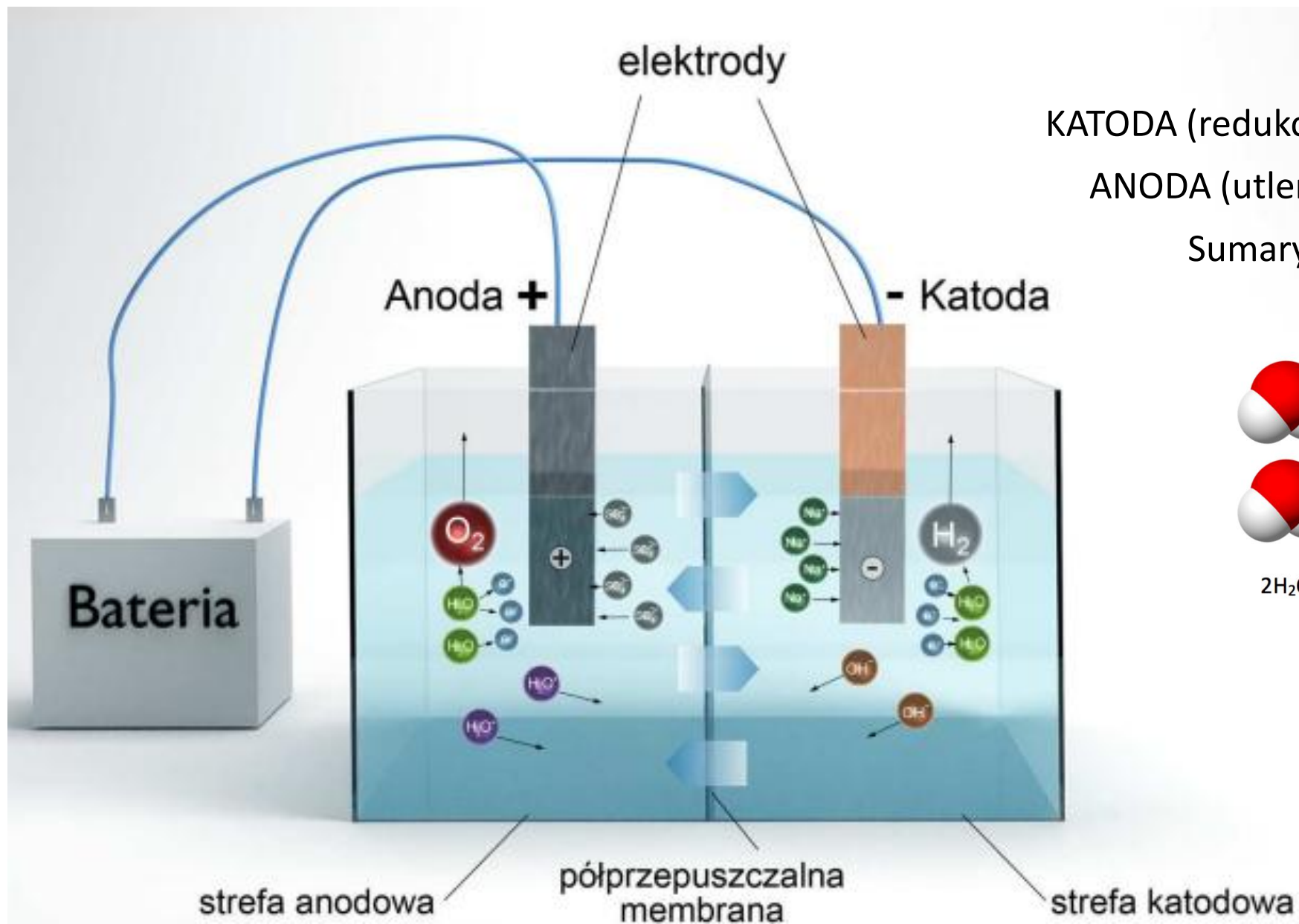
Elektroliza – podstawowe informacje

Proces elektrolizy jest dość prosty i pozwala uzyskać wodór o czystości do 99,999% objętościowych (uzyskany po wysuszeniu wodoru i usunięciu zanieczyszczeń tlenowych). Podczas procesu elektrolizy wody elektrony są wychwytywane lub uwalniane przez jony na powierzchni dwóch elektrod:

- **katoda (połączona z ujemnym biegunem źródła prądu)** – migrują do niej jony dodatnie (na przykład kationy metali), zachodzi *redukcja* - wydziela się **wodór**.
- **anoda (połączona z dodatnim biegunem źródła prądu)** – migrują do niej jony ujemne (aniony), zachodzi *utlenianie* – wydziela się **tlen**.



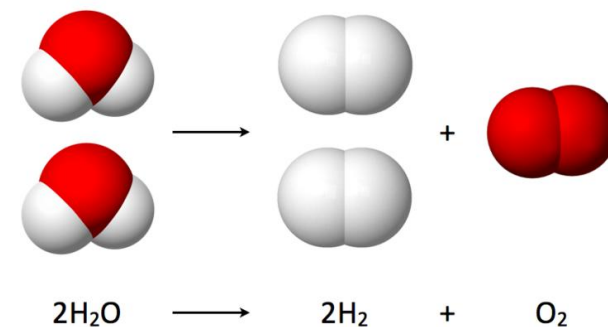
Reakcja elektrolizy



KATODA (redukcja): $2\text{H}_2\text{O} + 2\text{e}^- \rightarrow \text{H}_2 + 2\text{OH}^- / \cdot 2$

ANODA (utlenianie): $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$

Sumarycznie: $2\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{H}_2 + \text{O}_2$



Napięcie rozkładowe, nadnapięcie

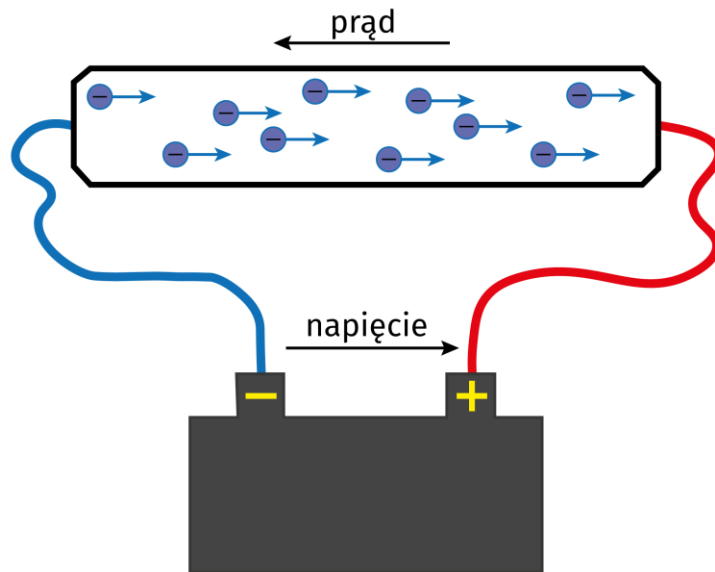
Elektroliza jest procesem wymuszonym przez dostatecznie duże napięcie rozkładowe (U_R), który może zachodzić w roztworach wodnych oraz w stopionych solach, wodorotlenkach i tlenkach metali.

Napięcie rozkładowe

$$U_r = SEM + \eta$$

Nadpotencjał, nadnapięcie elektrolizy

Potencjał elektrody będącej w równowadze



W przypadku elektrolizy wody minimalne przyłożone napięcie to 1,229 V, choć realnie ta wartość musi być wyższa ze względu na występujące opory.

Wartość nadpotencjału η dla danej reakcji elektrodowej zależy od:

- materiału elektrod - najczęściej z platyny lub grafitu, rzadziej miedziane,
- ich porowatości,
- rodzaju elektrolitu, jego pH
- temperatury.

Prawa elektrolizy Faradaya

I prawo Faradaya

$$m = k \cdot I \cdot t$$

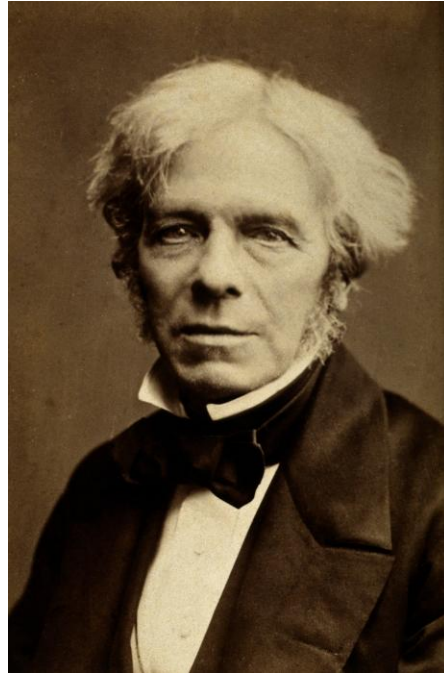
$$k = \frac{M}{n \cdot F}$$

II prawo Faradaya

$$F = \frac{M}{k \cdot z}$$

Prawo elektrolizy

$$m = \frac{M \cdot I \cdot t}{F \cdot z}$$



m – masa substancji, g

k – równoważnik elektrochemiczny, g/s

I – natężenie prądu, A

t – czas trwania elektrolizy, s

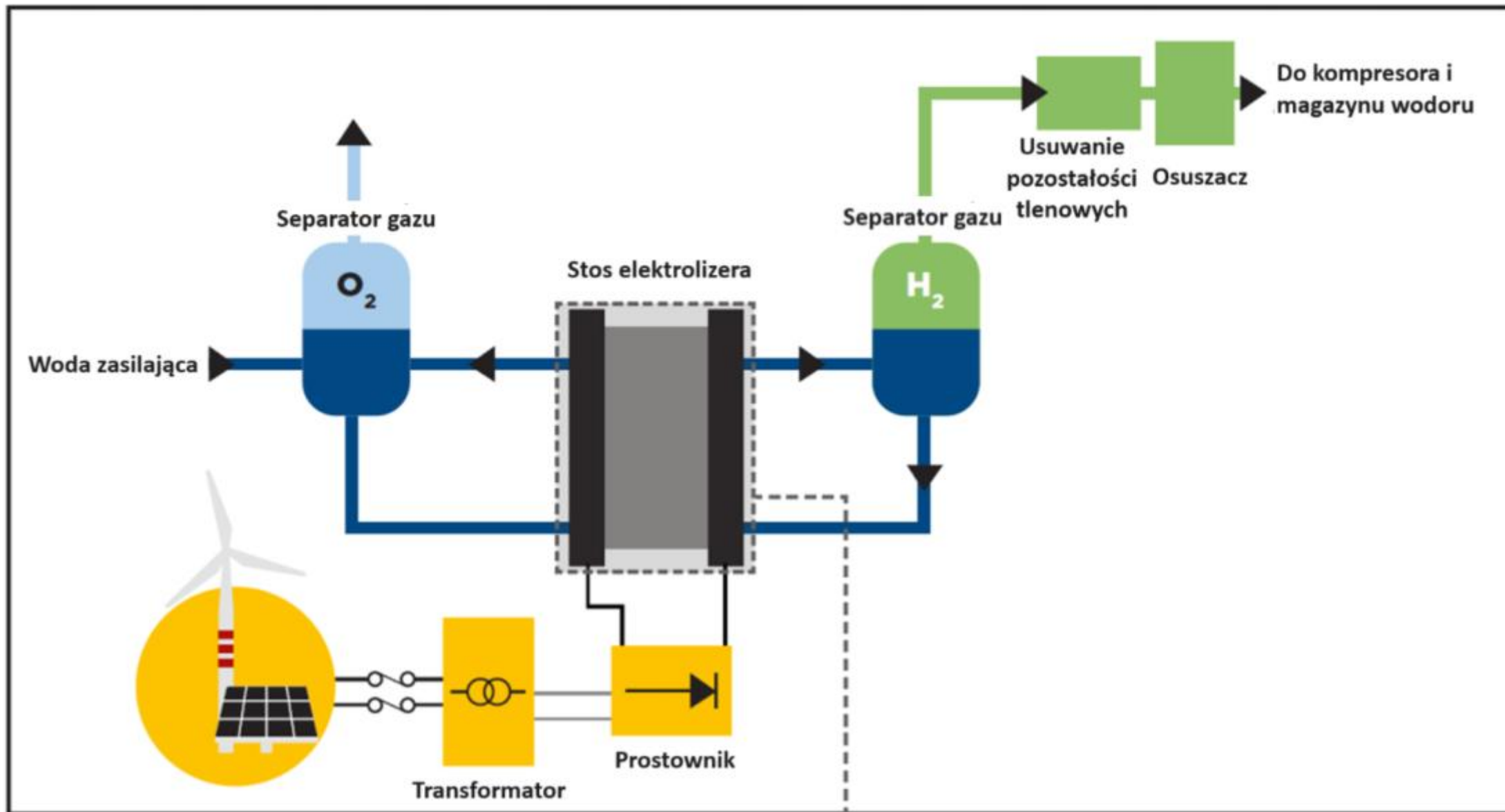
q - ładunek przepływający przez elektrodę $q = I \cdot t$, C

F – stała Faradaya, $F = 96500$ C/mol,

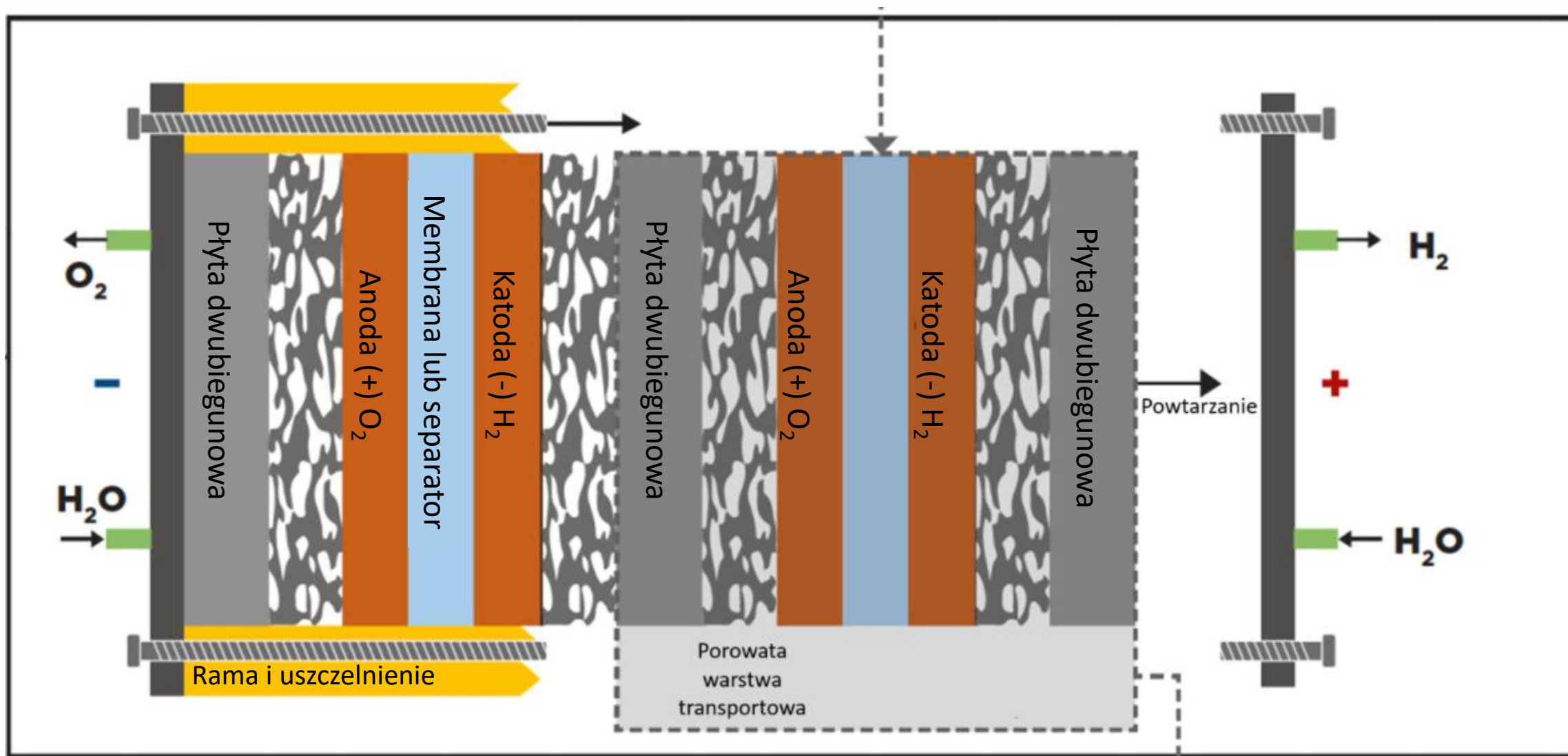
M – masa molowa, g/mol

z – liczba ładunkowa reakcji elektrodowej, -

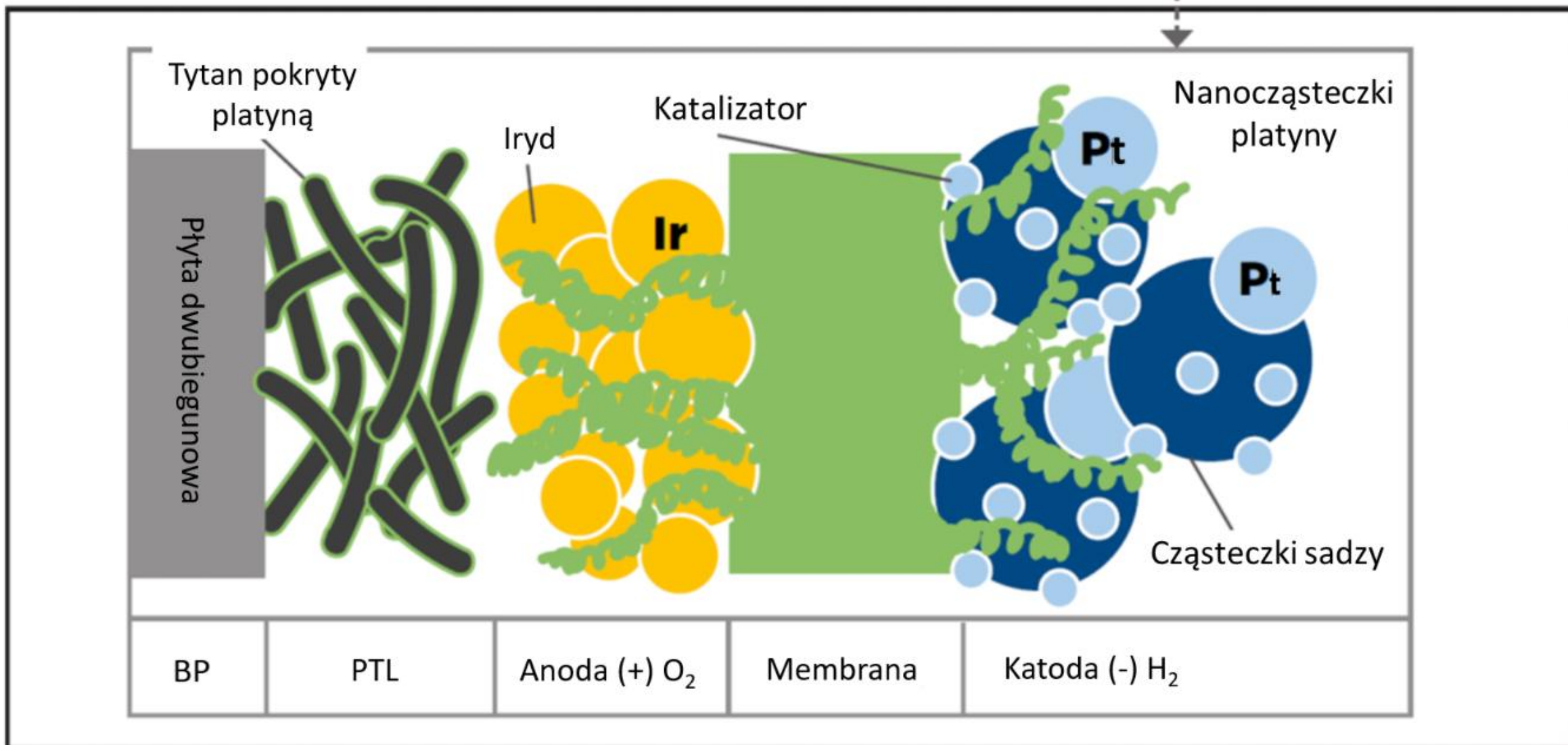
Schemat układu do elektrolizy



Schemat stosu elektrolizera



Schemat ogniwa elektrolitycznego

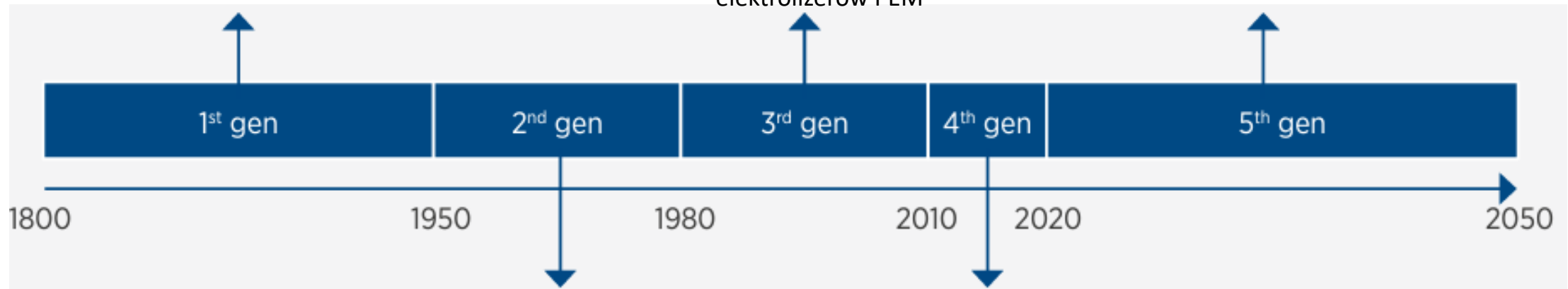


Generacje elektrolizerów

- **Wyzwania:** Uprzemysłowienie
- **Przełom technologiczny:** Zastosowanie membrany
- **Znaczenie:** Uprzemysłowienie elektrolizerów

- **Wyzwania:** Koszt
- **Przełom technologiczny:** Przeprojektowanie zbyt skomplikowanych systemów
- **Znaczenie:** Uprzemysłowienie elektrolizerów PEM

- **Wyzwania:** Sprawność, wytrzymałość i cena
- **Przełom technologiczny:** Nowoczesne materiały
- **Znaczenie:** Elektrolizery gigawatowe

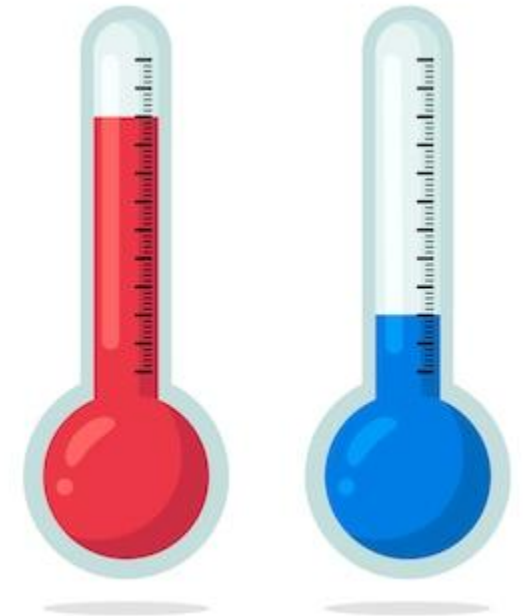


- **Wyzwania:** Gęstość prądu
- **Przełom technologiczny:** Stały elektrolit polimerowy
- **Znaczenie:** Zastosowanie w systemach podtrzymujących życie (programy kosmiczne)

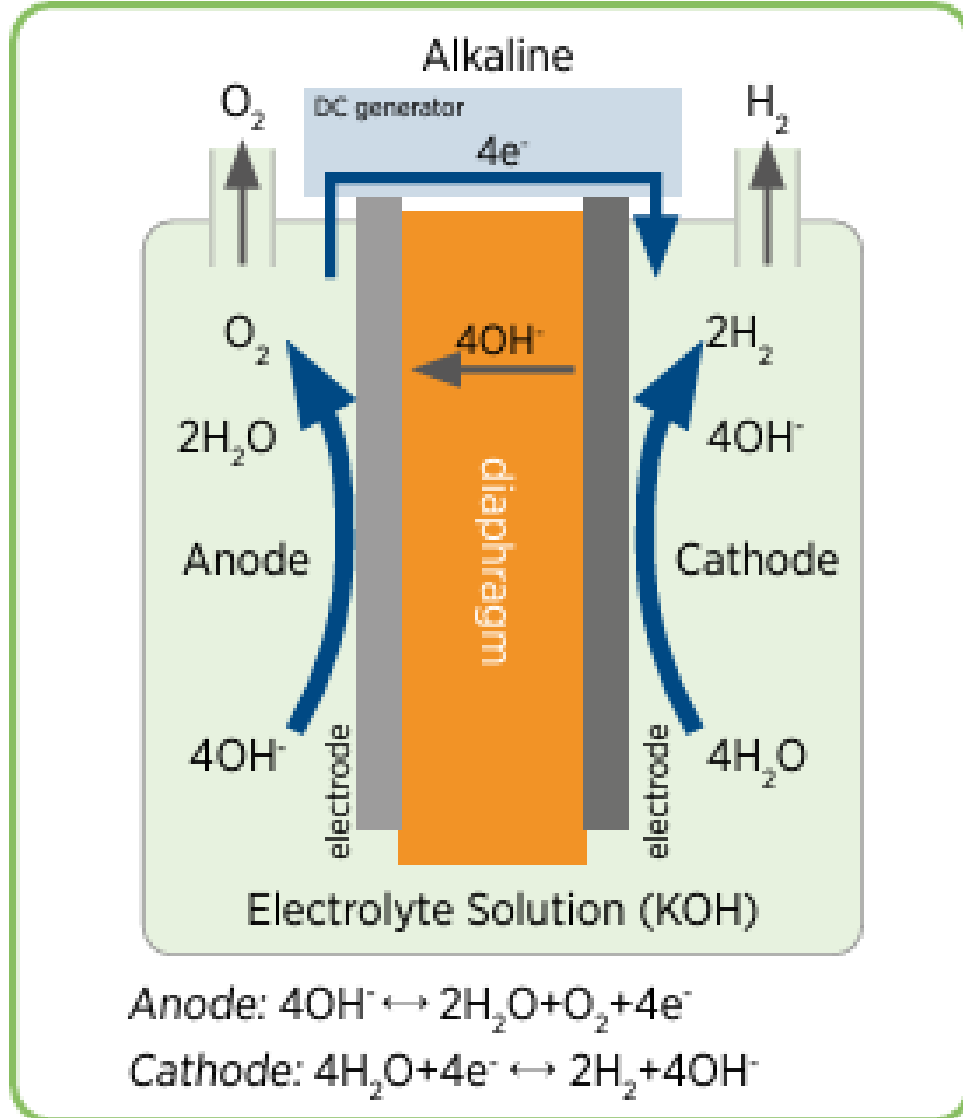
- **Wyzwania:** Wielkość i cena
- **Przełom technologiczny:** Większe stopy 1 MW
- **Znaczenie:** Demonstracja zastosowań na dużą skalę (power-to-gas)

Elektroliza nisko- i wysokotemperaturowa

- Najczęściej stosowane są elektrolizery niskotemperaturowe (**LTE**), takie jak elektrolizery alkaliczne i PEM.
- Wyróżniamy także elektrolizery wysokotemperaturowe (**HTE**), takie jak elektrolizer stałotlenkowy (SOE).
- Wysokotemperaturowa elektroliza pary wodnej odbywa się zazwyczaj w temperaturze 750-950°C.
- Ciepło potrzebne do zwiększenia temperatury do odpowiedniego poziomu może być uzyskane ze źródeł odnawialnych lub być ciepłem odpadowym z elektrowni jądrowych.
- Dzięki wysokiej energii termicznej energia elektryczna wykorzystywana w tym procesie jest mniejsza o ok. 35% w porównaniu z elektrolizą przeprowadzaną w niskiej temperaturze.
- Sprawność elektrolizy wysokotemperaturowej jest bardzo wysoka.
- Jest to stosunkowo nowa technologia, wymagająca jeszcze wielu badań, aby jej wykorzystanie mogło stać się opłacalne.



Elektrolizery alkaliczne AEL



- Pracują w temperaturze 70-90°C
- Wykorzystują ciekły roztwór alkaliczny wodorotlenku sodu lub potasu (KOH, NaOH).
- Działają na zasadzie transportu jonów wodorotlenkowych (OH^-) przez elektrolit od katody do anody, które są oddzielone za pomocą membrany.
- Na katodzie woda jest rozszczepiana w celu utworzenia H_2 i uwalnia aniony wodorotlenkowe, które przechodzą przez membranę i rekombinują na anodzie, gdzie wytwarzany jest tlen.

Elektrolizery alkaliczne AEL

Zalety

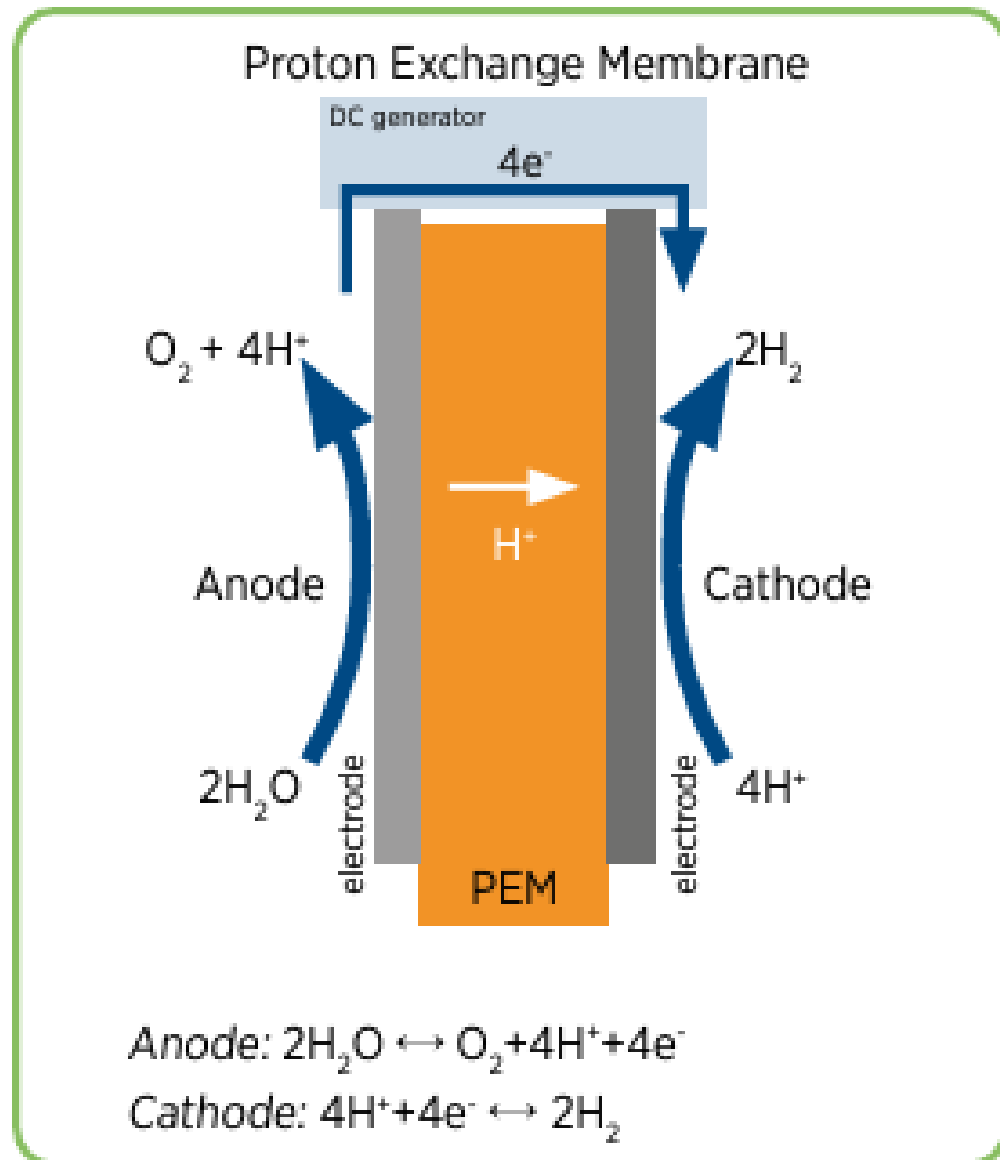
- Dojrzała technologia dostępna komercyjnie i wykorzystywana na skalę przemysłową od ponad 100 lat
- Budowane są wielkoskalowe instalacje rzędu 100 MW
- Zapewnia ona stabilność przez długi czas
- Duża produkcja wodoru na godzinę
- Capex jest stosunkowo niski

Wady

- Ograniczona modulacja i dynamika pracy - nieelastyczne w podążaniu za zmienną charakterystyką pracy źródła (jak OZE)
- Stosowanie korozyjnych elektrolitów.
- Możliwość przedostawania się gazów, co może mieć negatywny wpływ na stopień czystości.

Capex (ang. *capital expenditures*) - wydatki związane bezpośrednio z rozwojem produktu, ponoszone przez zamawiających, związane z samym kosztem wybudowania obiektu: opracowania koncepcyjne, projekty i dokumenty pozwoleniowe oraz realizacja.

Elektrolizery z membraną protonowymienną PEM



- PEM - ang. *polymer electrolyte membrane* lub *proton exchange membrane*.
- Membrana polimerowo-elektrolitowa PEM to najnowsza technologia wykorzystywana komercyjnie do produkcji wodoru.
- Elektrolit jest stałym, specjalistycznym tworzywem sztucznym – polimerem.
- Pracują w temperaturze 50 - 80°C.
- Woda reaguje na anodzie, tworząc tlen i dodatnio naładowane jony wodorowe.
- Elektrony przepływają przez obwód zewnętrzny, a jony wodorowe selektywnie przemieszczają się przez PEM do katody.
- Na katodzie jony wodoru łączą się z elektronami z obwodu zewnętrznego, tworząc gazowy wodór.

Elektrolizery z membraną protonowymienną PEM

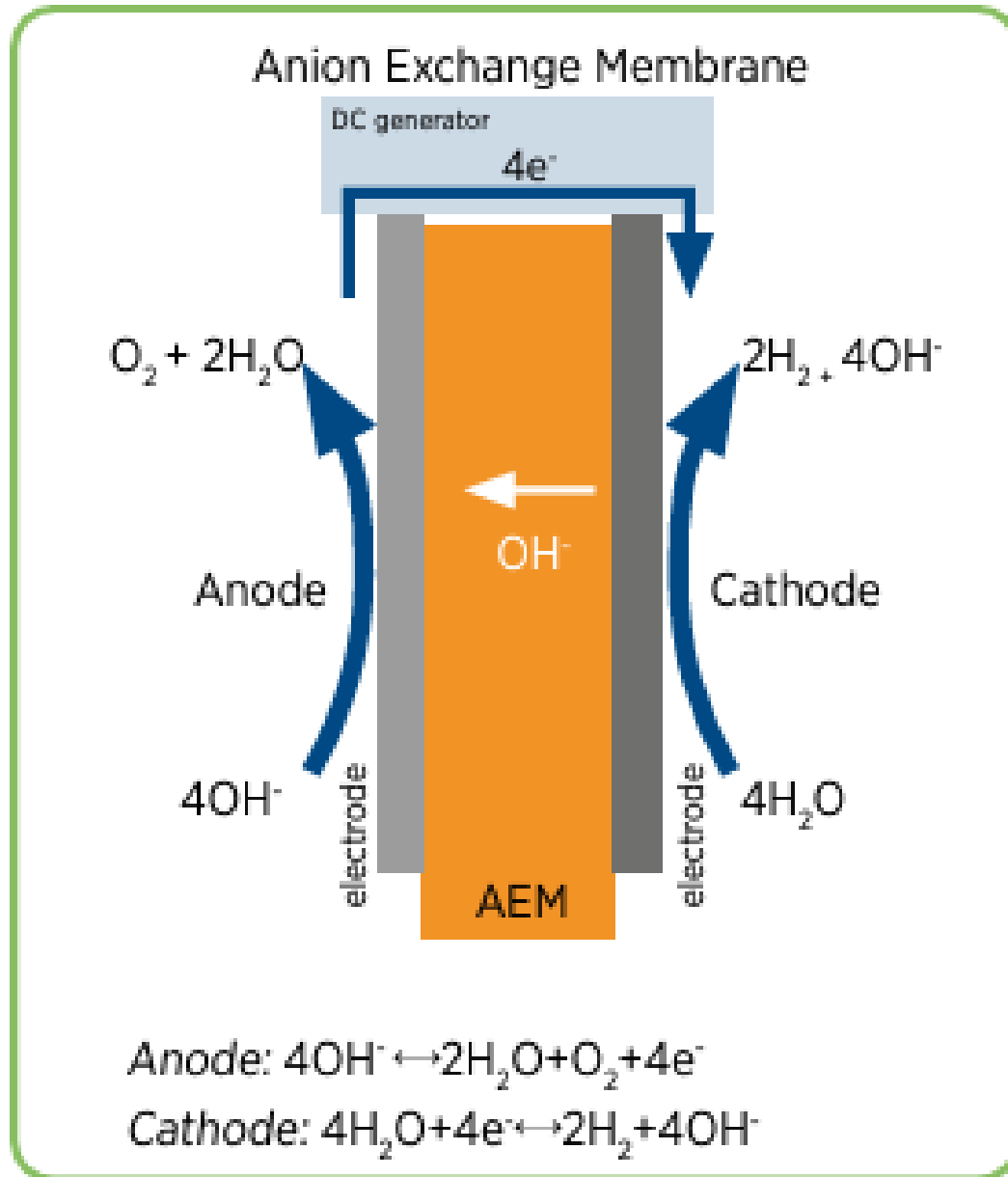
Zalety

- Wyższa efektywność energetyczna i gęstość mocy niż w alkalicznych
- Większy zakres modulacji
- Czystość gazu jest wysoka przy pracy z częściowym obciążeniem
- Zwarta konstrukcja układu, kompaktowy rozmiar
- Łatwa konserwacja
- Brak niebezpiecznych, żrących substancji
- Dostępne instalacje rzędu 10 MW

Wady

- Wysoki koszt podzespołów - wykorzystanie metali szlachetnych jako katalizatora, zatem i wyższy CAPEX w porównaniu do alkalicznych (prowadzone są badania nad zastosowaniem tańszych stopów metali co może znacząco obniżyć koszt produkcji)
- 2x niższa żywotność od alkalicznych

Elektrolizery z membraną anionowymienną AEM



- Elektrolizer z membraną wymiany anionów (AEM) wykorzystuje półprzepuszczalną membranę przewodzącą jony wodorotlenowe (OH^-).
- Podobnie jak membrana wymiany protonów (PEM), membrana oddziela produkty i zapewnia izolację elektryczną między elektrodami i przewodzi jony.
- W odróżnieniu od PEM, AEM przewodzi ujemne jony wodorotlenowe (a nie dodatnie jony wodorowe), przeciwny jest też kierunek – jony wodorotlenowe transportowane są z katody do anody.
- Jest to technologią niskotemperaturową, elektrolizer pracuje w $40-60\text{ }^\circ\text{C}$.
- Elektroliza zachodzi w lekko zasadowym środowisku.

Elektrolizery z membraną anionowymienną AEM

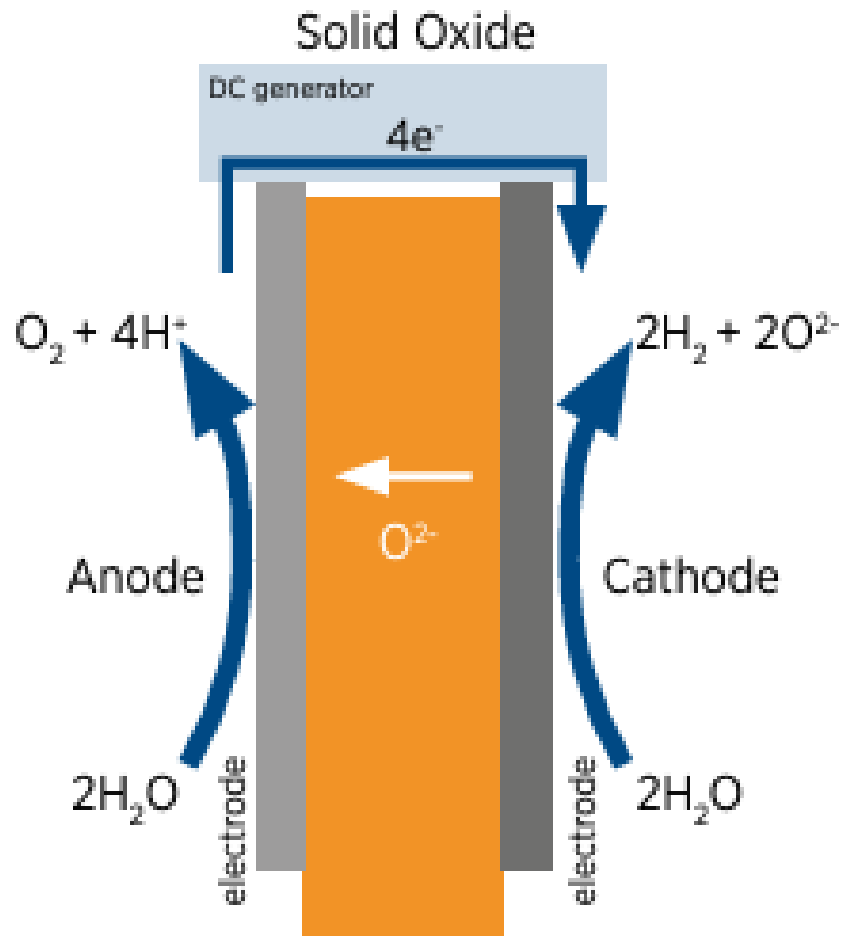
Zalety

- Elektrolizery z membraną anionowymienną są wyjątkowo perspektywiczną technologią produkcji wodoru, łącząc w sobie przewagi technologii alkalicznej oraz PEM.
- Główną zaletą elektrolizy wody AEM jest to, że nie jest wymagany kosztowny katalizator z metali szlachetnych, zamiast tego można zastosować niedrogi katalizator z metali przejściowych.
- Przystosowanie do pracy ze zmiennym źródłem energii i przerwami w pracy.

Wady

- Najniższy poziom gotowości technologicznej spośród omawianych technologii elektrolizerów, na poziomie TRL 6, tj. faza demonstracyjna w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, m.in. materiały do produkcji membran AEM są nadal w fazie rozwoju, co zwiększa koszty.
- Elektrolizery AEM zazwyczaj pracują przy niższych gęstościach prądu w porównaniu z elektrolizerami PEM, co skutkuje większym rozmiarem i wyższymi kosztami
- Membrany AEM są podatne na degradację w warunkach pracy, są wrażliwe na zanieczyszczenia, takie jak węglany i chlorki, co może prowadzić do spadku wydajności i żywotności elektrolizera, a konieczność jej wymiany to dodatkowy wydatek.
- Membrany AEM mają wyższą przepuszczalność dla gazów, takich jak wodór i tlen, co może prowadzić do mieszania się gazów i zmniejszenia czystości produktu.

Elektrolizery stałotlenkowe SOE



- Elektrolizer na bazie tlenków stałych (SOE) jest znany jako elektrolizer wysokotemperaturowy (HTE).
- Pracuje w temperaturze około 700°- 800°C.
- Technologia ta jest nadal w fazie rozwoju, nie jest rozpowszechniona na rynku.
- W SOE jako elektrolit stosowany jest stały materiał ceramiczny, który przewodzi ujemnie naładowane jony tlenu (O_2^-) w podwyższonej temperaturze, wytwarzając wodór w nieco inny sposób.
- Para wodna na katodzie łączy się z elektronami z obwodu zewnętrznego, tworząc gazowy wodór i ujemnie naładowane jony tlenu.
- Jony tlenu przechodzą przez stałą membranę ceramiczną i reagują na anodzie, tworząc gaz tlenowy i generując elektrony dla obwodu zewnętrznego.

Elektrolizery stałotlenkowe SOE

Zalety

- Bardzo wysoka sprawność cieplna i energetyczna.
- Niska wrażliwość na zanieczyszczenia w wodzie/parze.
- Możliwość integracji z procesami przemysłowymi, w tym obiegami parowymi bloków energetycznych.

Wady

- Bardzo długi czas rozruchu.
- Dopiero rozwijana technologia.
- Najwyższe koszty CAPEX, znacznie wyższe w porównaniu do alkalicznych i PEM.
- Obecnie niska żywotność.
- Bardzo wysoka temperatura pracy, wymagająca dedykowanych materiałów konstrukcyjnych.
- Niższa czystość wodoru.

Zestawienie parametrów elektrolizerów

Parametr	Jednostka	Alkaliczny	PEM	AEM	SOE
Nominalna gęstość prądu	A/cm ²	0,2-0,8	1,0-2,0	0,2-2,0	0,3-1,0
Zakres napięcia	V	1,4-3,0	1,4-2,5	1,4-2,0	1,0-1,5
Pole pow. elektrody	cm ²	10 000 - 30 000	1500	<300	200
Sprawność	%	50-68	50-68	52-67	75-85
Czystość wodoru	%	99,9-99,9998	99,9-99,9999	99,9-99,999	99,9
Żywotność (stos)	h	60 000	50 000-80 000	>5000	20 000
Czas rozruchu	min	<50	<20	<20	>600
Moc jednostki (stos)	kW	1000	1000	2,5	5
Koszty kapitałowe (stos) min. 1 MW	USD/kW	270	400	brak danych	>2000
Koszty kapitałowe (stos) min. 10 MW	USD/kW	500-1000	700-1400	brak danych	brak danych
Skala TRL	-	9	9	6	7
Temperatura pracy	°C	70-90	50-80	40-60	700-850
Ciśnienie pracy	bar	<30	<30	<35	1

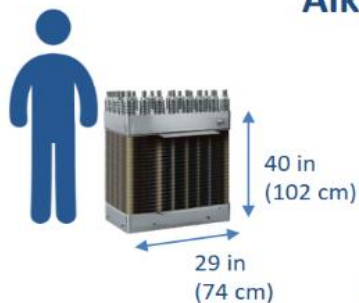
Zestawienie parametrów elektrolizerów

Parametr	Alkaliczny	PEM	AEM	SOE
Elektrolit	KOH/NaOH (5-7 mol/l)	Membrana PFSA	Nośnik polimerowy DVB z KOH/NaOH (1 mol/l)	YSZ
Separator	Azbest, cyrfon, nikiel	Nafion®	Fumatech	Elektrolit stały YSZ
Elektroda/katalizator po stronie tlenu	Stal nierdzewna perforowana pokryta niklem	Tlenek irydu	Stopy niklu lub NiFeCo	Typ perowskitów (LSCF, LSM)
Elektroda/katalizator po stronie wodoru	Stal nierdzewna perforowana pokryta niklem	Nanocząsteczki platyny na sadzy	Nikiel	Ni-YSZ
PTL po stronie anodowej	Siatka niklowa (nie zawsze występuje)	Spiekany porowaty tytan pokryty platyną	Pianka niklowa	Siatka lub pianka niklowa
PTL po stronie katodowej	Siatka niklowa	Spiekany porowaty tytan lub tkanina węglowa	Pianka niklowa lub tkanina węglowa	brak
BP po stronie anodowej	Stal nierdzewna pokryta niklem	Tytan pokryty platyną	Stal nierdzewna pokryta niklem	brak
BP po stronie katodowej	Stal nierdzewna pokryta niklem	Tytan pokryty platyną	Stal nierdzewna pokryta niklem	Stal nierdzewna pokryta kobaltem

Skala elektrolizerów - przykłady



Alkaline (1 MW)



PEM (1 MW)



H-TEC 1 MW – 1 kontener 40' (12,2 x 2,4 x 2,6 m)
450 kg H₂ / 24h (210 Nm³/h) PEM

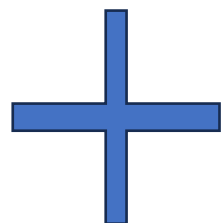
Nel 6 kW – 0.8 m x 1 m x 1.1 m
2,3 kg H₂ / 24h (1 Nm³/h) PEM



Nel 174 kW – 2.5 m x 1.2 m x 2 m
65 kg H₂ / 24h (30 Nm³/h) PEM

Ile zasobów na 1 kg wodoru?

22 litry wody



Ok. 50 kWh energii



1 kg wodoru



Do zagotowania: 0,1 kWh / 1l wody
50 kWh to energia potrzebna do zagotowania
500 litrów wody

Storage volume for 1kg of hydrogen



Atmospheric pressure



In the form of ammonia



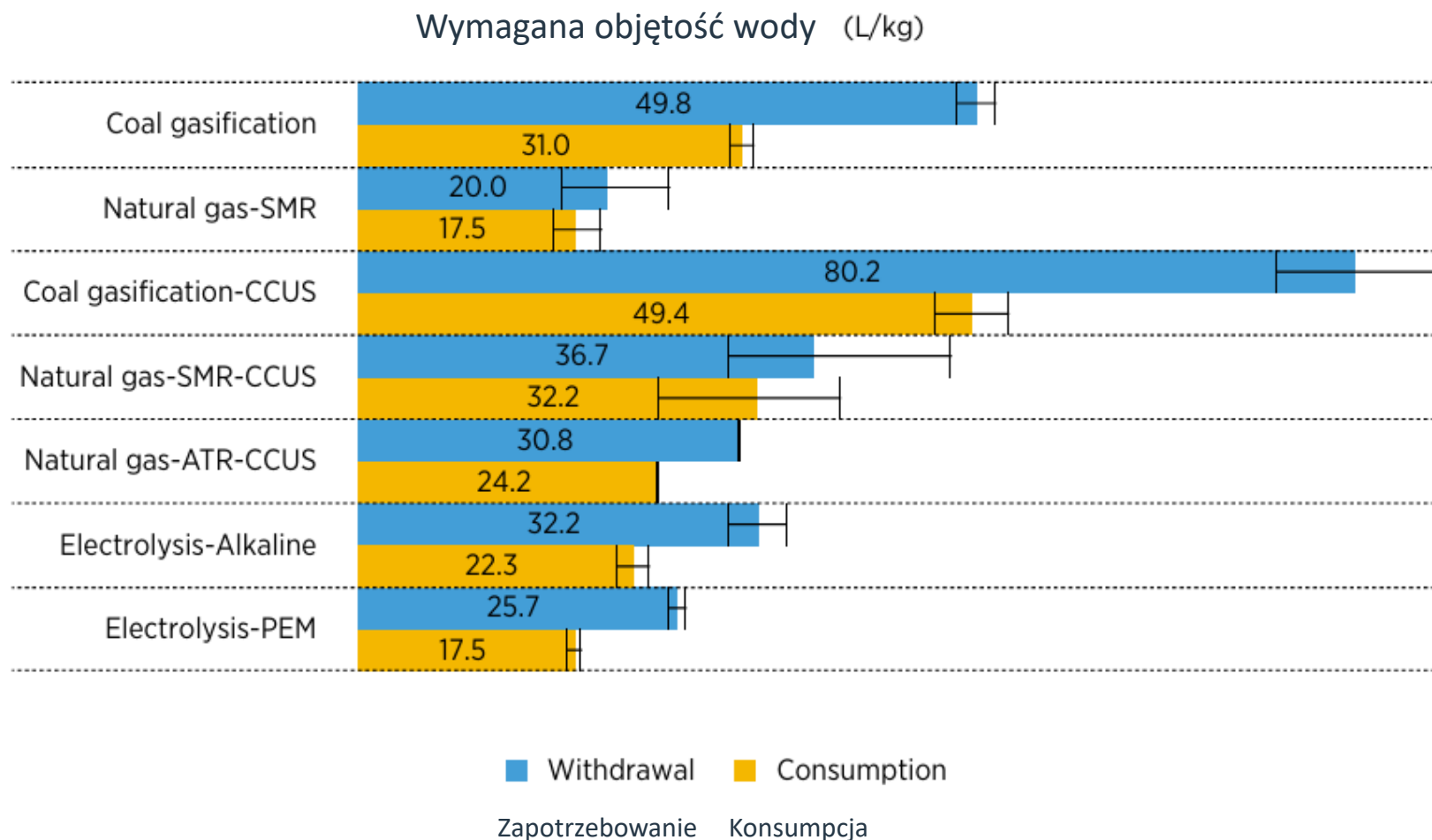
Compressed to 700 bar



Liquefied

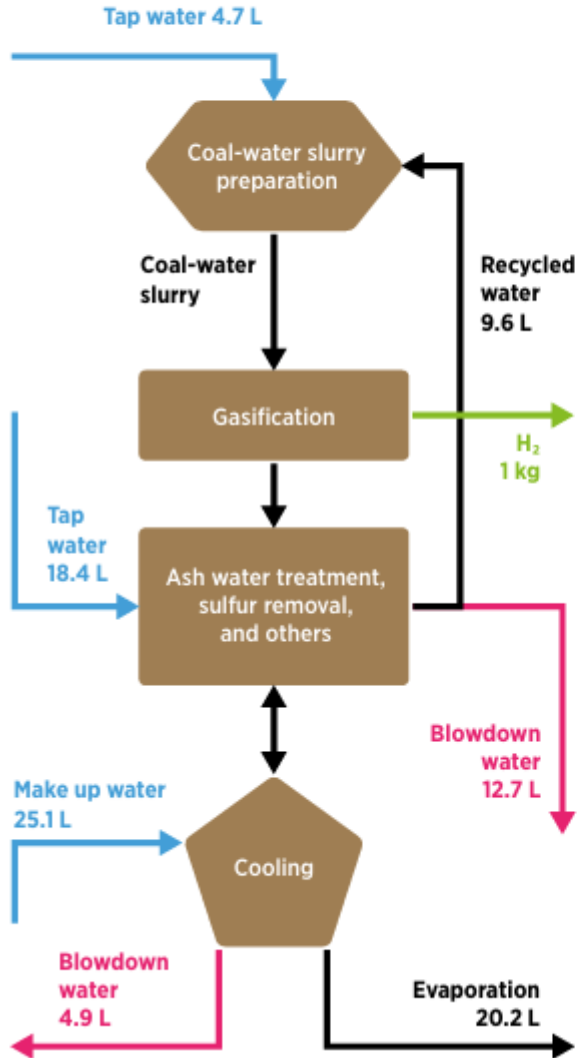


Ile zasobów na 1 kg wodoru?



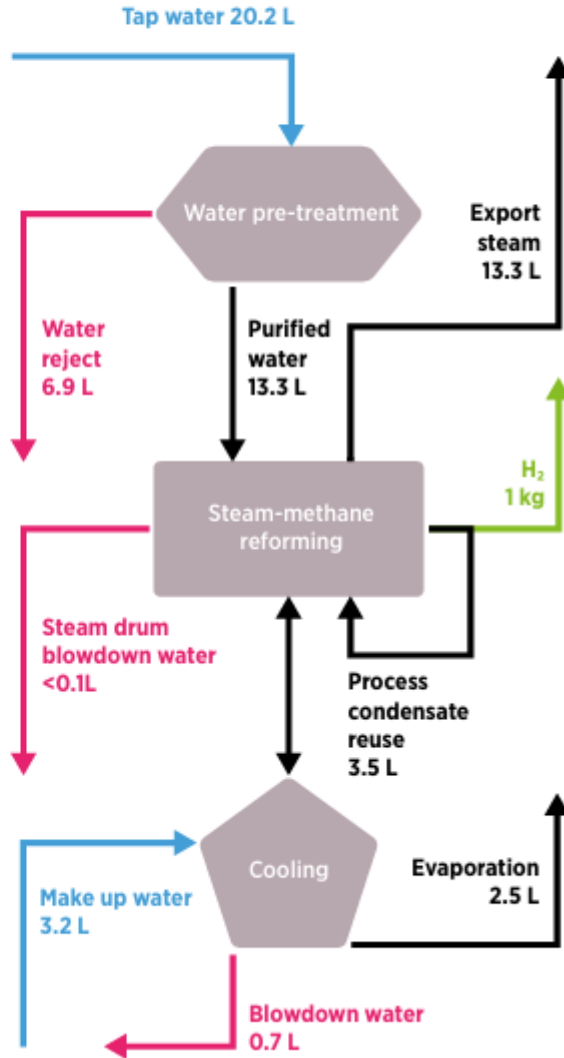
Brown hydrogen

Volume requirements for alternative water sources
River: 26.1 L
Groundwater: 26.1 L
Seawater: 43.5 L



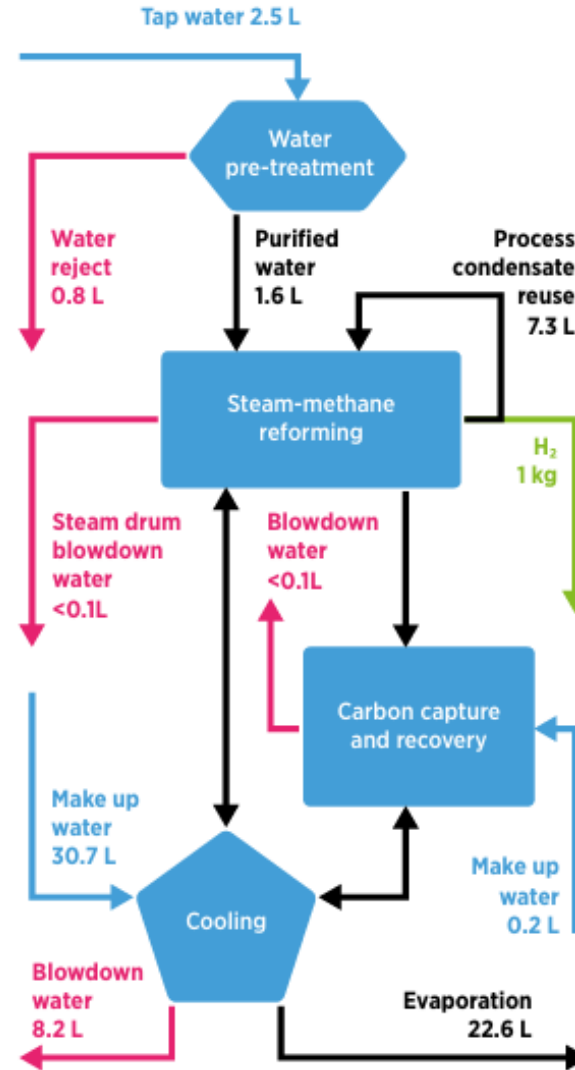
Grey hydrogen

Volume requirements for alternative water sources
River: 22.9 L
Groundwater: 22.9 L
Seawater: 38.0 L



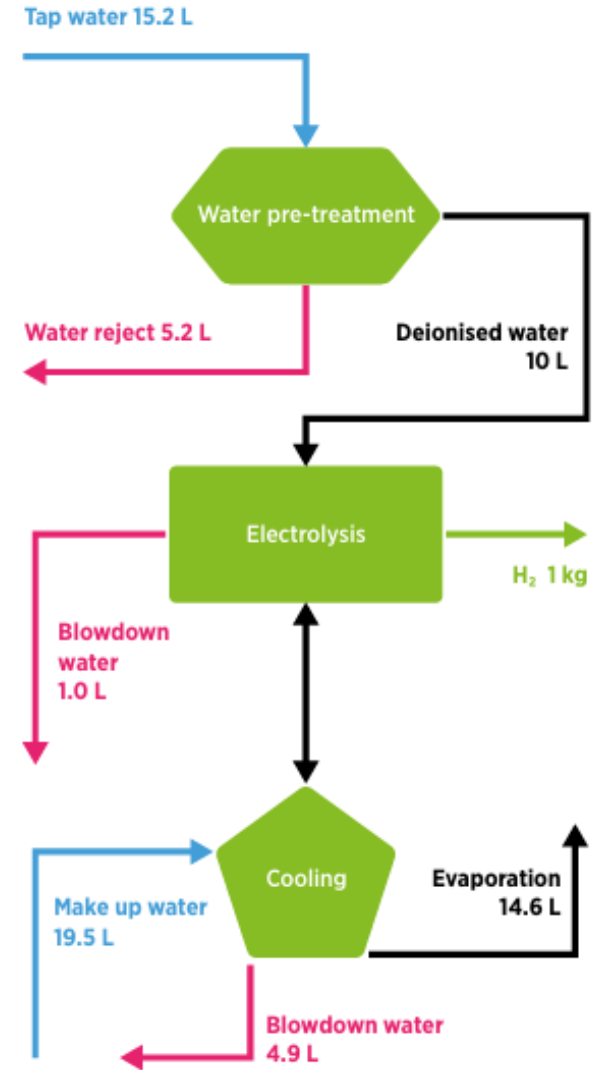
Blue hydrogen

Volume requirements for alternative water sources
River: 2.8 L
Groundwater: 2.8 L
Seawater: 4.7 L

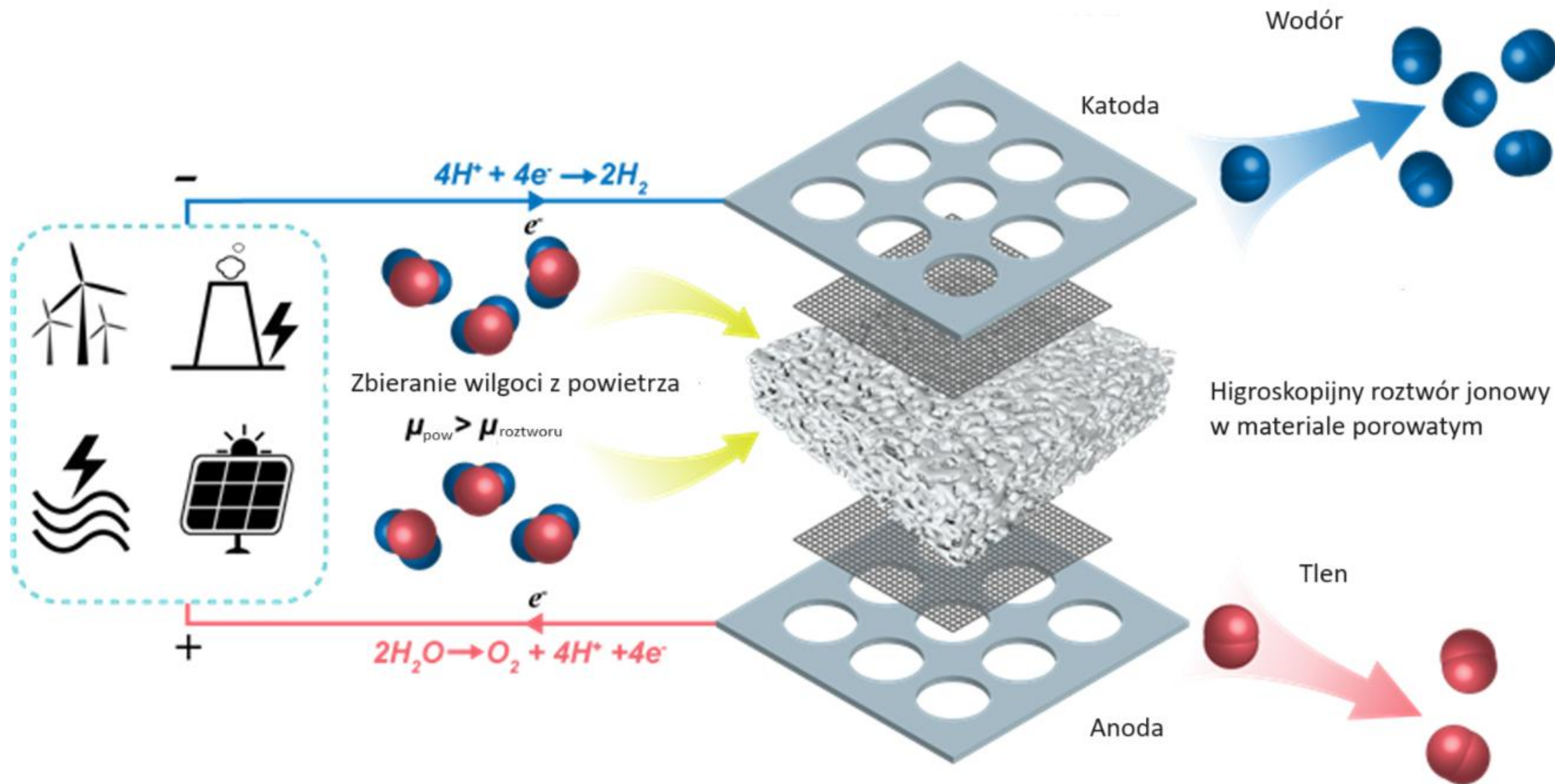


Green hydrogen

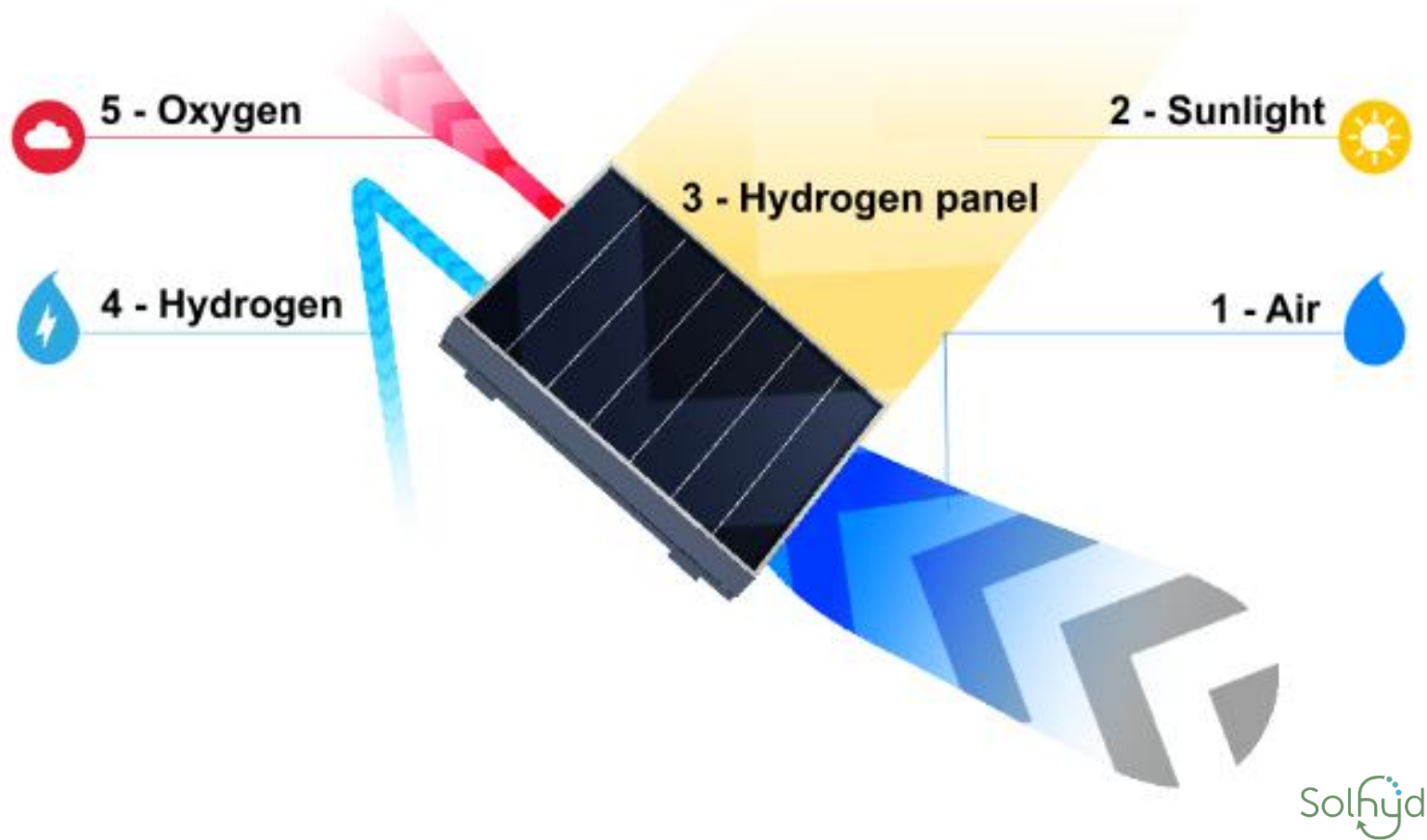
Volume requirements for alternative water sources
River: 17.2 L
Groundwater: 17.2 L
Seawater: 28.6 L



Skąd pozyskać wodę do elektrolizy?

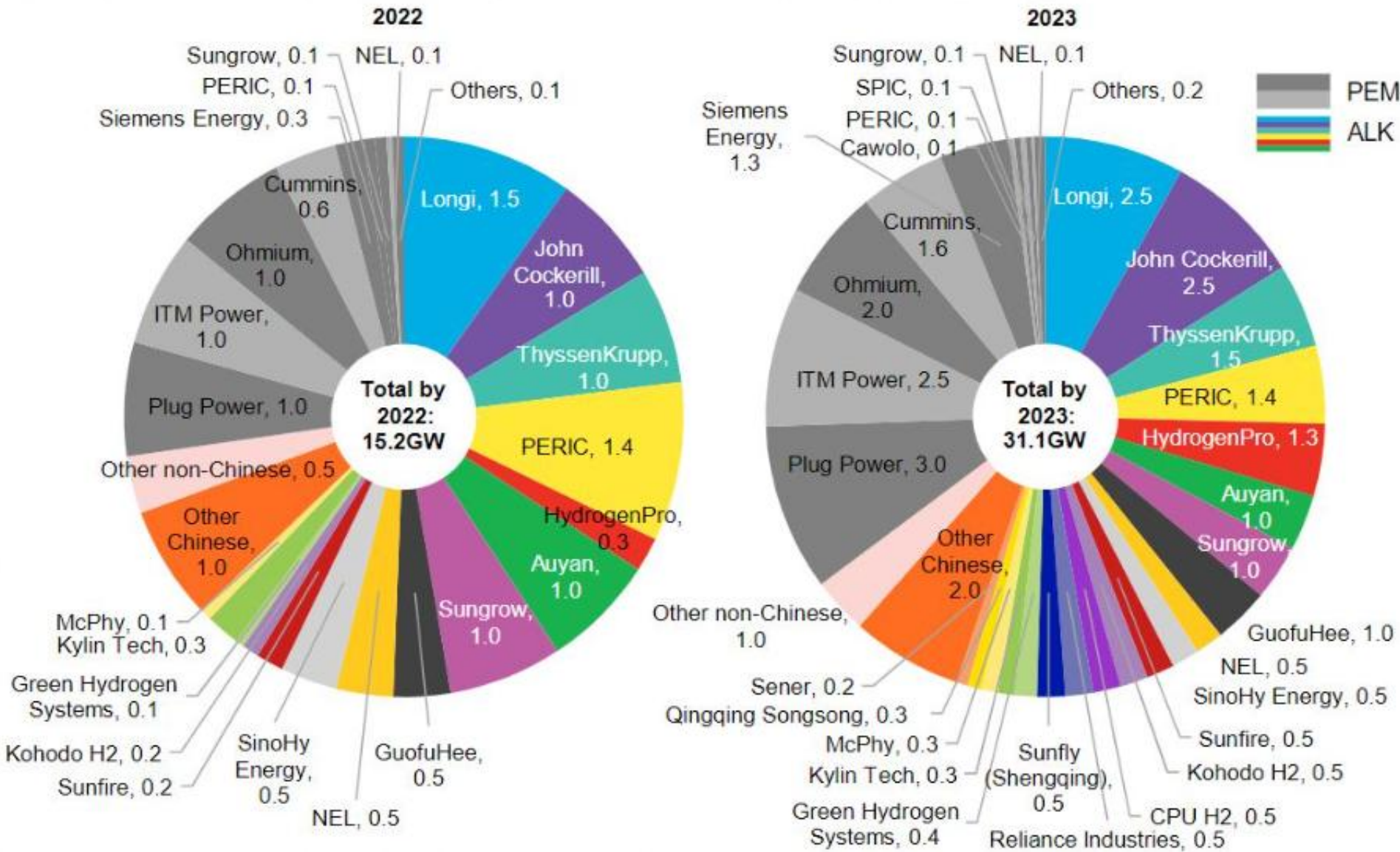


Żółty wodór - projekt Solhyd



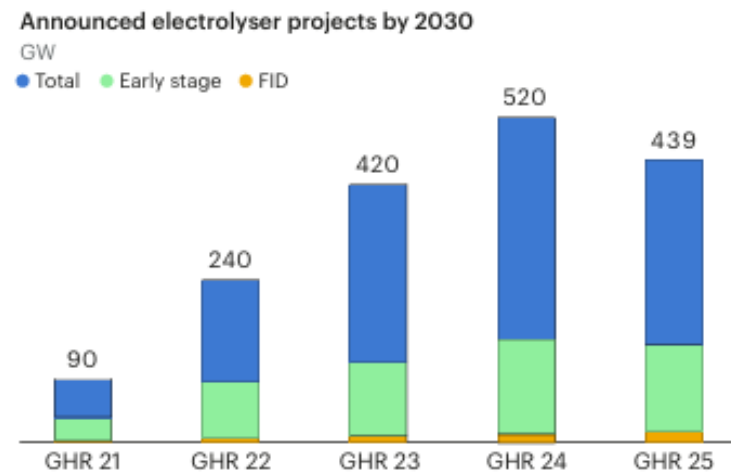
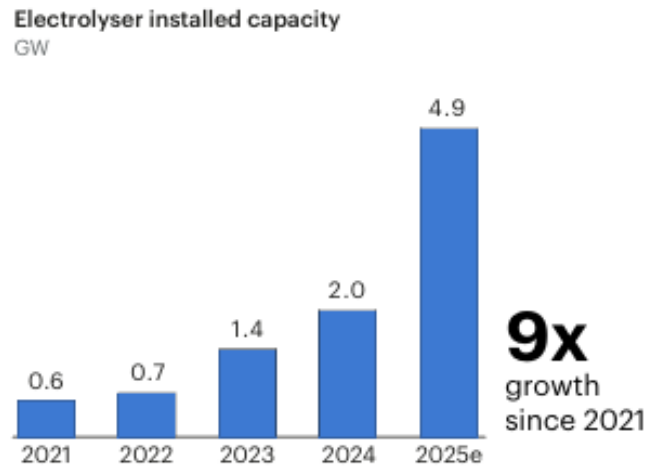
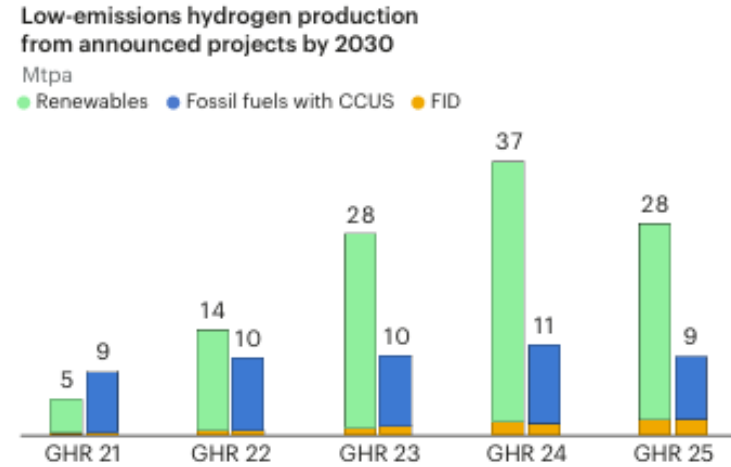
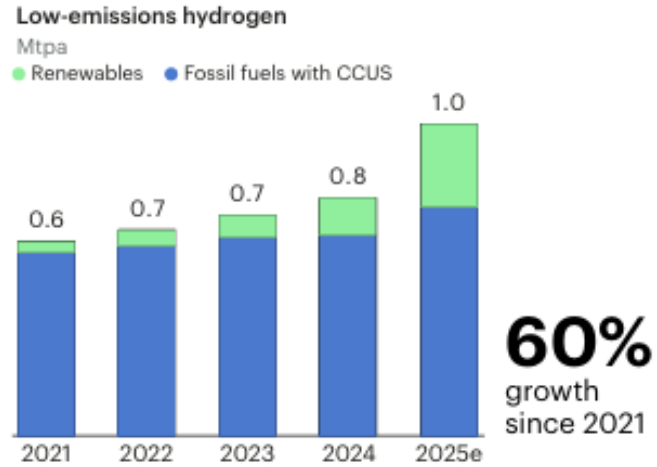
Materiały w panelu pobierają wilgoć ze strumienia powietrza, gdy wilgotność powietrza jest najwyższa (zwykle w nocy) i magazynują ją do późniejszego wykorzystania. Gdy świeci słońce, a moduł fotowoltaiczny wytwarza energię elektryczną, woda jest przekształcana w wodór i tlen.

Najwięksi producenci elektrolizerów



Najwięksi producenci elektrolizerów pod koniec 2022 i 2023 r., BloombergNEF

Wzrost liczby elektrolizerów



Kwestie bezpieczeństwa

Główne ryzyko towarzyszące systemom elektrolizy to tworzenia się w układzie wybuchowej mieszanki wodoru i tlenu, więc konieczne jest monitorowanie parametrów pracy.

W elektrolizerach alkalicznych:

- pomiar stężenia wodoru w przewodzie tlenowym;
- pomiar napięcia i natężenie prądu;
- pomiar temperatury na wejściu i na wyjściu z elektrolizera;
- pomiar stężenia jonów elektrolitu;
- ponadto zalecane jest stosowanie zbiornika przeciekowego w celu uniknięcia kontaktu elektrolitu z otoczeniem.

W elektrolizerze typu PEM:

- kontrola ciśnienia i różnicy ciśnień między przewodami wodoru i tlenu;
- kontrola stężenia wodoru w komorze (< 0,4 obj. % H₂);
- utrzymanie minimalnego poziomu wody w separatorze gazu powyżej 55% jego wysokości;
- kontrola ciśnienia i różnicy ciśnień pomiędzy liniami gazowymi H₂ i O₂;
- kontrola stężenia H₂ na wyjściu z separatora gazu O₂.


EIGA

- EIGA (European Industrial Gases Association) - to organizacja zorientowana na bezpieczeństwo i kwestie techniczne, reprezentująca znaczną część europejskich i niektórych pozaeuropejskich firm, które produkują i dystrybuują gazy przemysłowe, medyczne i spożywcze. Firmy członkowskie EIGA współpracują w kwestiach technicznych i bezpieczeństwa, aby zapewnić najwyższe standardy w zakresie obsługi gazów.



Istotniejsze dokumenty EIGA

- Produkcja:
 - Doc 251, 242, 244, 246
- Skraplanie
 - Doc 107
- Magazynowanie
 - Doc 6, TB 42
- Transport
 - TB 19
- Konsumpcja
 - Doc 210, 211



EIGA TECHNICAL BULLETIN

Prepared by WG-2 TB 42/22 – March 2022

Welded Gaseous Storage Vessels and Hydrogen Compatibility

1. Introduction

This Technical Bulletin reflects Appendix 5, which was removed from EIGA Doc 15/21 [1]. The recommendations are kept concerning the suitability of welded gaseous storage for hydrogen service and provides guidelines for minimising the effects of embrittlement when designing new welded storage vessels and gives recommendations for assessing the safety of existing storage vessels, when the design pressure is greater than 25 bar.

The two most important factors in ambient temperature hydrogen embrittlement are the purity of the hydrogen, and to a lesser extent the hydrogen pressure.

In determining a critical value for oxygen impurity, the literature is somewhat variable. However, generally the hydrogen embrittlement effect is maximised when the oxygen impurity is less than 10 ppm/V but decreases with increasing impurity to the extent that oxygen levels above 200/300 ppm/V completely inhibit the hydrogen embrittlement effect. As with impurity, opinions vary as to what is a critical pressure. Generally, for carbon steels below 10 bar, the effect of hydrogen in causing ambient temperature embrittlement is minimal, while hydrogen pressures above 25 bar have a progressively greater effect.

There are three possible mechanisms that could be responsible for the initiation and propagation of a defect, causing welded hydrogen vessels to fail:

- The presence of critical surface defects resulting from manufacture or previous service. Such defects may then be subjected to hydrogen assisted crack propagation under the normal influence of the vessel filling cycles.
- The initiation and propagation of the hydrogen assisted fatigue cracks due to very high additional local stresses.
- The use of a material and/or weld deposit that is highly susceptible to hydrogen embrittlement.

2. Guidelines for the design of hydrogen storage vessels

Vessels for the storage of hydrogen shall be designed, fabricated and inspected in accordance with a recognised pressure vessel code and the following requirements:

2.1 Materials

- 2.1.1 The actual yield strength of the material shall be no greater than 420 MPa.
- 2.1.2 The actual tensile strength of the material, shall be no greater than 630 MPa.
- 2.1.3 The material shall be in the normalised condition.

© EIGA grants permission to reproduce this publication provided the Association is acknowledged as the source

EUROPEAN INDUSTRIAL GASES ASSOCIATION AISBL
AVENUE DE L'ASTRONOMIE 30 • B-1210 BRUSSELS
PHONE +32 2 217 70 98 • E-mail: info@eiga.eu - www.eiga.eu

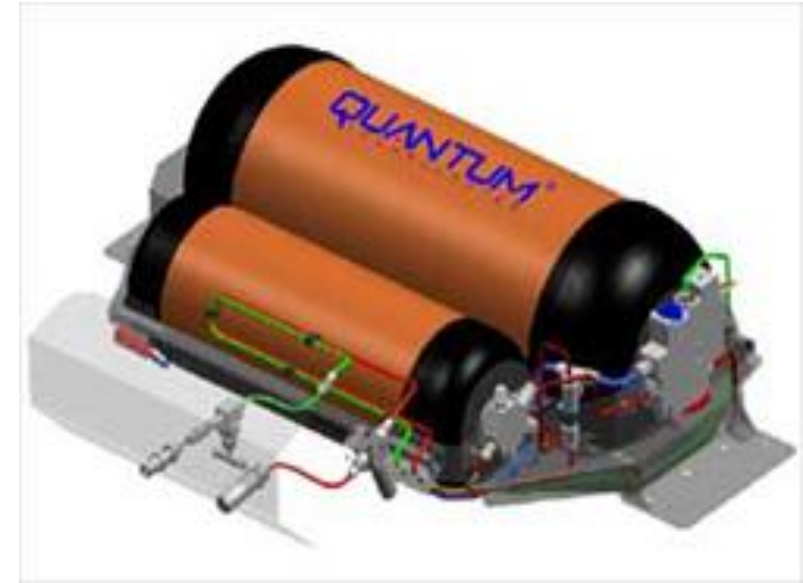
Metody przechowywania wodoru:

- Sprężony w postaci gazowej
- W postaci ciekłej
- Wodorki metali
- Węglowe nanorurki
- Szklane mikrosfery
- Magazynowanie w kawernach

Sprężony wodór w postaci gazowej

Do sprężenia wodoru potrzebne są bardzo duże nakłady energii, a mała gęstość wodoru sprawia, że nawet pod dużym ciśnieniem zgromadzana jest niewielka ilość energii.

Wodór przechowywany jest w temperaturze pokojowej (298 K) w zakresie ciśnień od 150 do 800 barów. W samochodach stosuje się zbiorniki ciśnieniowe 350 barowe, w zastosowaniach stacjonarnych 800 barowe. Najnowsza technologia lekkich zbiorników ciśnieniowych z izolacją przeponową pozwala na przechowywanie wodoru pod ciśnieniem 700 bar a ilość zmagazynowanego gazu równa jest 12 % masy zbiornika.



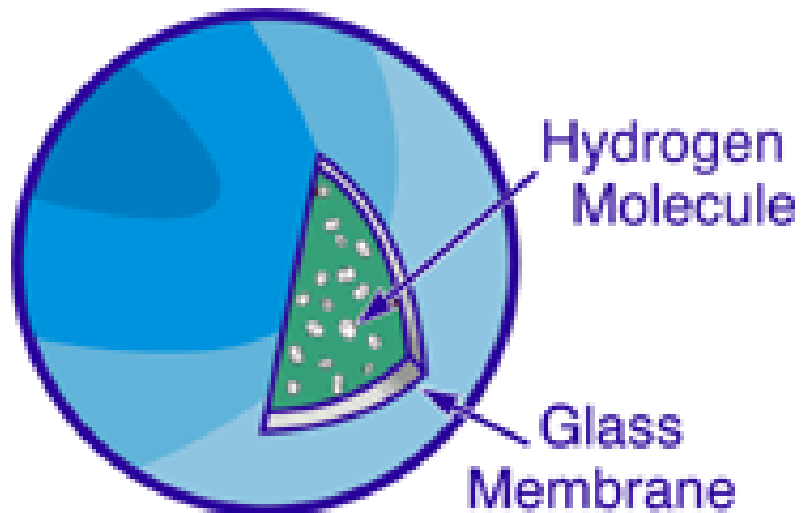
Wodór w postaci ciekłej

Skroplenie wodoru wymaga jeszcze większych nakładów energetycznych niż jego sprężenie co prowadzi do wysokich kosztów. W związku ze stratą wodoru przez odparowanie sposób ten nadaje się tylko do zastosowań w których wodór odbierany jest w sposób ciągły.



Szklane mikrosfery

W celu zmagazynowania gazu tą metodą, podgrzewa się materiał zwiększając tym samym przenikliwość wodoru przez ściany sfer. Po schłodzeniu, wodór zostaje „uwięziony” w postaci silnie skompresowanego gazu.



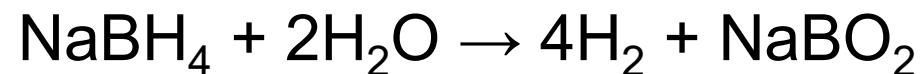
Wodorki metali

- Fizyczne

Wodór może być zaabsorbowany na powierzchni stopu niklu (np. LaNi_5) i chromu (np. ZrCr_2). Obecny stan technologii nie pozwala na magazynowanie większej ilości wodoru niż 5% masy zbiornika.

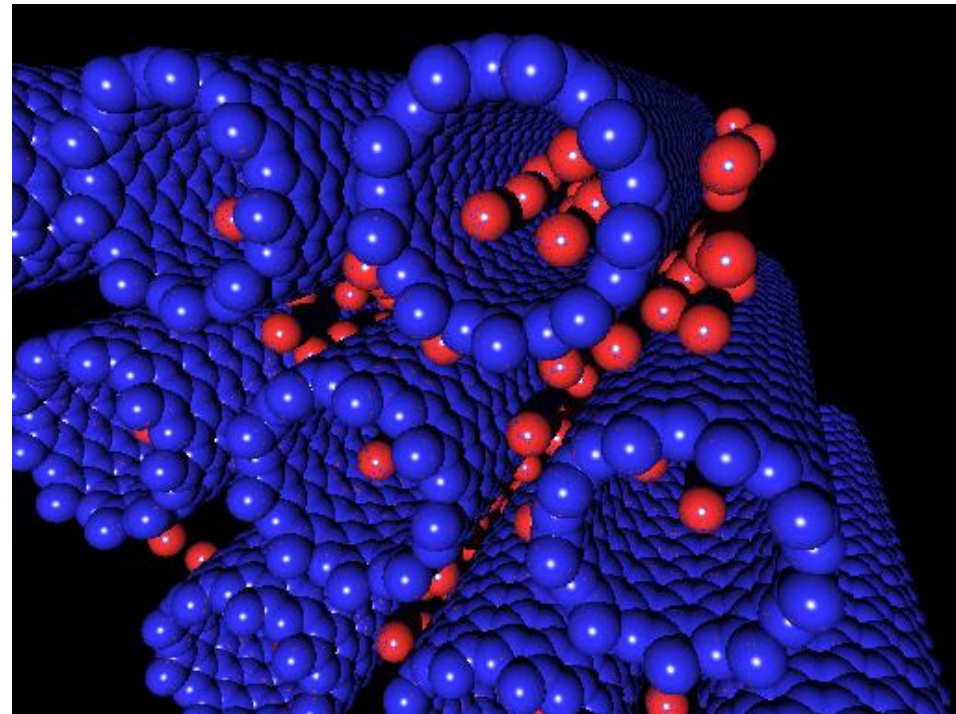
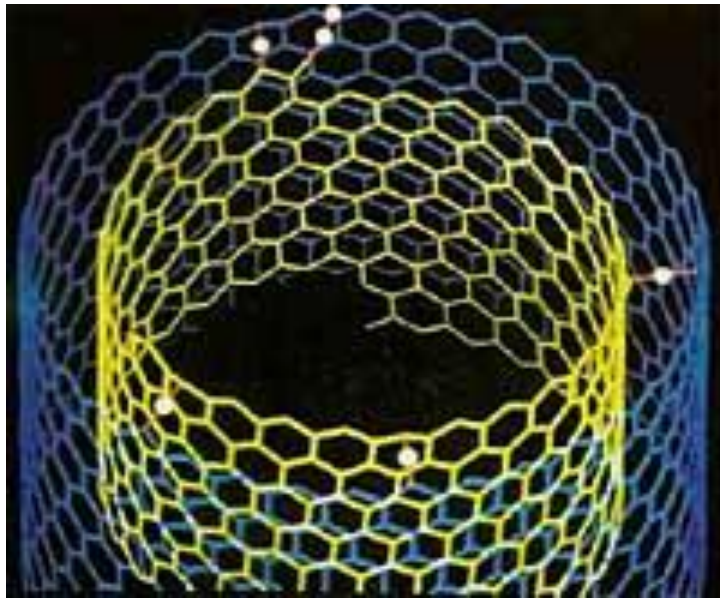
- Chemiczne

Wodór zmagazynowany jest w postaci związków chemicznych takich jak CaH_2 , KH , LiH , NaH , LiBH_4 , NaBH_4 . Sposób uwalniania wodoru jest stosunkowo prosty gdyż wymaga wody i katalizatora. W przypadku NaBH_4 ilość uwolnionego wodoru jest dwa razy większa niż była zmagazynowana. Jest to związane z rozbiciem cząsteczki wody podczas reakcji.

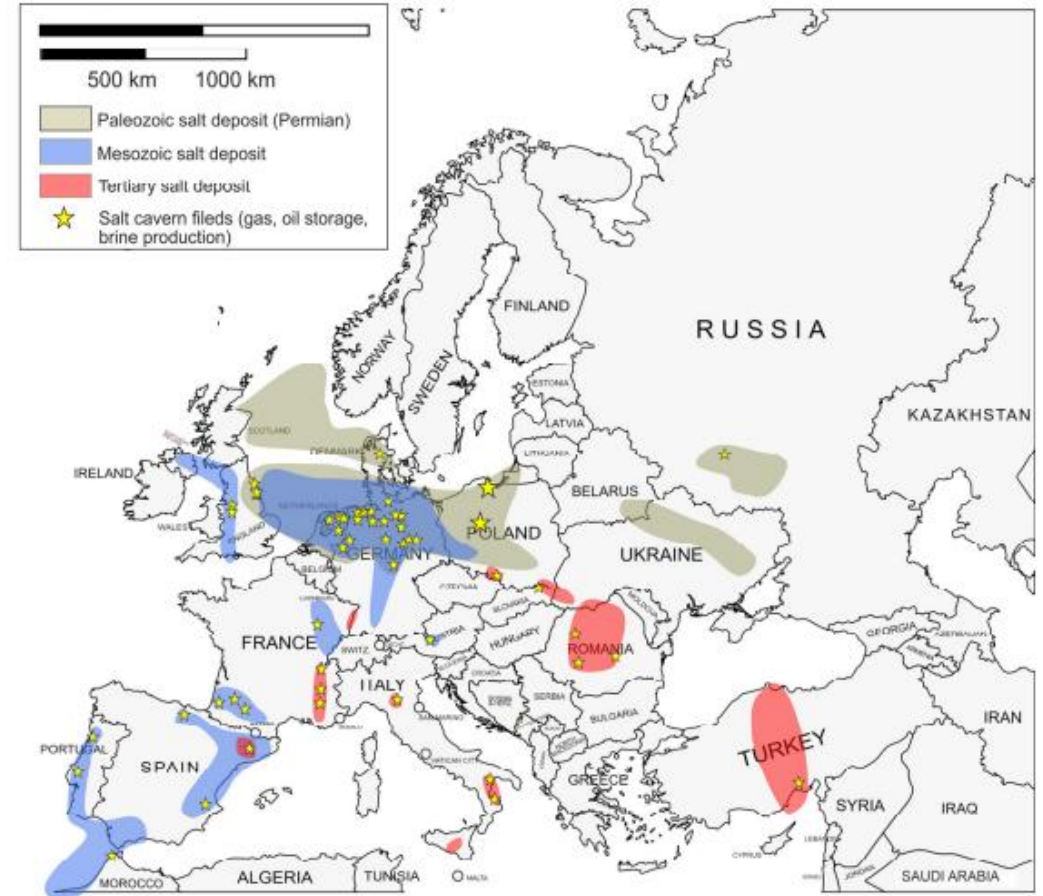
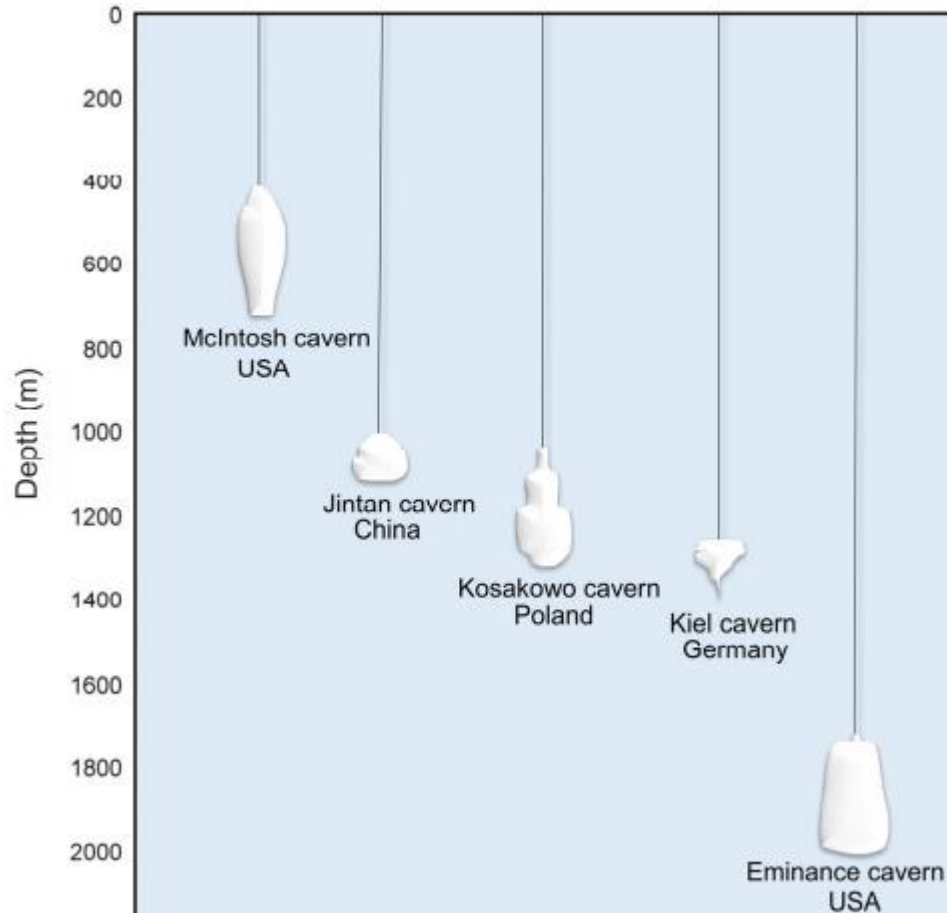


Węglowe nanorurki

Jest to jedna z najnowszych metod magazynowania wodoru. Wodór jest adsorbowany na rurowatych strukturach węgla aktywowanego. Materiał o nazwie Nanorurki węglowe (ang. Carbon Nanotubes), składa się z cylindrów węglowych o średnicy około 1,5 nm i ilość zmagazynowanego wodoru jest równa 14% własnej masy związku. Najnowsze doniesienia mówią, iż zawartość przechowywanego tą metodą wodoru może być równa nawet 65% masy zbiornika.



Magazynowanie wodoru w kawernach solnych



Magazynowanie wodoru w kawernach solnych

Location	Dimensions	Capacity [m ³]	Geology	Pressure Conditions [MPa]	Additional Information	Ref.
Simulated cavern	Thickness: min 30 m; depth: 30 m.	565,000	Salt formation density 2200 kg/m ³ ; salt formation specific heat 840 J/kgK; thermal conductivity 5.24 W/mK.		High porosity and permeability.	[59]
Germany	Thickness: 280 m; Height × diameter: 150 × 20 m.	300,000	Precambrian to quaternary salt rocks (layers of 400–2000 m).	4.6–7.2	Heat condition: <100 °C, lack of water, high porosity and permeability.	[20]
UK (Cheshire salt basin—NW England)	Thickness: 250 m; depth: 600–1200 m; height × diameter: 60–80 × 80–100 m.	100,000–300,000	Various proportions of halite, anhydrite, gypsum, K-Mg minerals and other minerals. Minerals occur as an admixture in rock salt beds: anhydrite, gypsum, carnallite, kainite, langbeinite, bischofite, polyhalite, sylvite, kieserite, clay, minerals, quartz. Salt layer: 400/500–2000 m.		Low porosity and permeability.	[60]
SW Poland	Thickness: 150–1800 m; depth: 1000–2000 m.	730,800	Upper Permian salt deposits.	7.4–23.8	Good viscoplastic behavior, low porosity and permeability, lack of water.	[33]
Rogóżno Poland	Thickness: max 196.3 m; height × diameter: 300 × 49 m	32,000	Clay-sulphate (gypsum—anhydrite).	8–10		[21]
Lubień Poland	Thickness: max 893 m		Sulphate (gypsum-anhydrite)	8–10		[21]
China	Depth: 750–1250 m	200,000	The cavern section—argillaceous rock salt and mudstone interlayers (glauberite mudstone, anhydrite mudstone, clay shales, silty mudstone).	6–16	Low porosity and permeability.	[58]
China, Jiangsu province, Jitan salt mine	Depth: 900–1100m, height × diameter: 85 × 73 m	210,000	Cretaceous to tertiary lacustrine bedded salt rocks. Caprock and interlayer including: glauberite, gypsum, anhydrite, siltstone.		Very low porosity and permeability. In situ vertical stress of 21–25 Mpa.	[8]

Metody transportowania wodoru

Wodór może być transportowany w postaci ciekłej lub sprężonego gazu:

- siecią rurociągów
- transportem samochodowym
- transportem morskim



Dziękuję za uwagę!