



# Technologie wodorowe część 2

---

Inż. Michał Maciejewicz

[https://www.linkedin.com/in/micha%C5%82-maciejewicz-b48944275?utm\\_source=share&utm\\_campaign=share\\_via&utm\\_content=profile&utm\\_medium=ios\\_app&fbclid=IwY2xjawJbmLlleHRuA2FibQIxMAABHTut4eV3u8OOWYH24RxqY1A0AgapjdE3Taf\\_NGtWLW1qR6MvuUgaLgIbGQ\\_aem\\_la-uTak-FHgwoNIkViQa2A](https://www.linkedin.com/in/micha%C5%82-maciejewicz-b48944275?utm_source=share&utm_campaign=share_via&utm_content=profile&utm_medium=ios_app&fbclid=IwY2xjawJbmLlleHRuA2FibQIxMAABHTut4eV3u8OOWYH24RxqY1A0AgapjdE3Taf_NGtWLW1qR6MvuUgaLgIbGQ_aem_la-uTak-FHgwoNIkViQa2A)



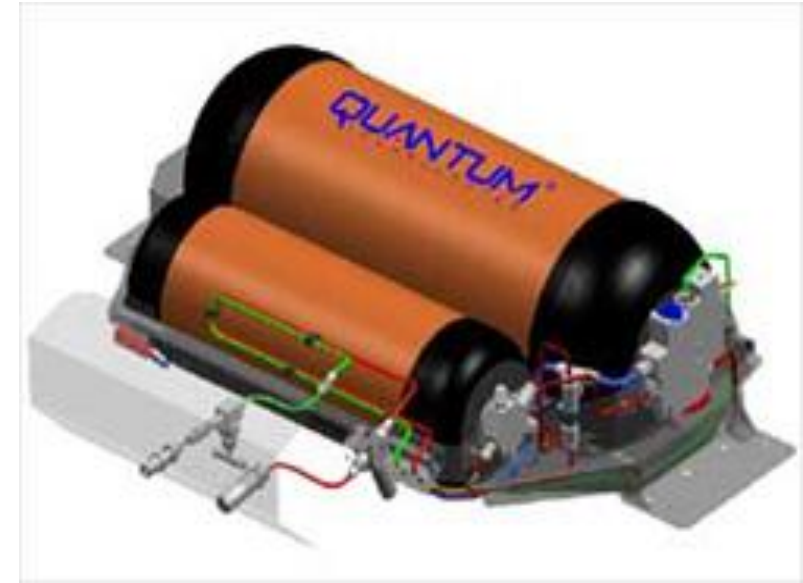
# Metody przechowywania wodoru:

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

# 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.



## Storage volume for 1kg of hydrogen



Atmospheric pressure



In the form of ammonia



Compressed to 700 bar



Liquefied



# Metody transportowania wodoru

Wodór może być transportowany w postaci ciekłej lub sprężonego gazu:

- siecią rurociągów
- transportem samochodowym
- transportem morskim



FIGURE 1

Mature European Hydrogen Backbone can be created by 2040

- H<sub>2</sub> pipelines by conversion of existing natural gas pipelines (repurposed)
- Newly constructed H<sub>2</sub> pipelines
- Export/Import H<sub>2</sub> pipelines (repurposed)
- Subsea H<sub>2</sub> pipelines (repurposed or new)
- Countries within scope of study
- Countries beyond scope of study
- ▲ Potential H<sub>2</sub> storage: Salt cavern
- Potential H<sub>2</sub> storage: Aquifer
- ◆ Potential H<sub>2</sub> storage: Depleted field
- Energy island for offshore H<sub>2</sub> production
- City, for orientation purposes

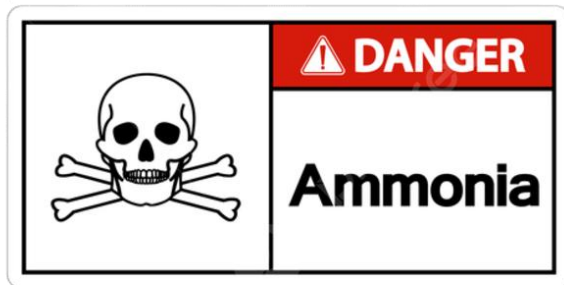
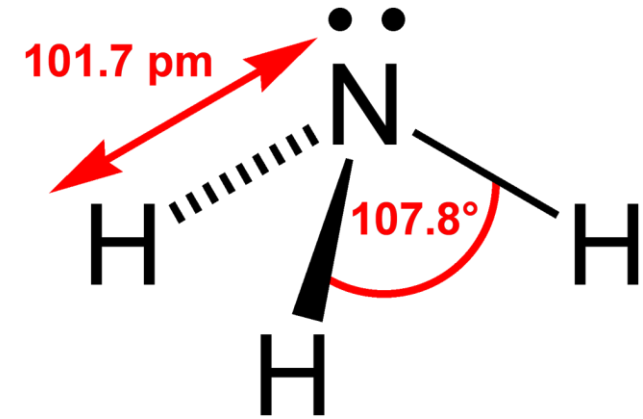


# Hydrogen backbone

- Stworzenie ogólnoeuropejskiej sieci przesyłowej
- Możliwości adaptacji istniejących gazociągów, a także rozszerzenia sieci o nowe elementy, przedstawione w raporcie EHB (Extending the European Hydrogen Backbone)
- współpraca 23 przedsiębiorstw z 21 państw

# Amoniak jako magazyn wodoru?

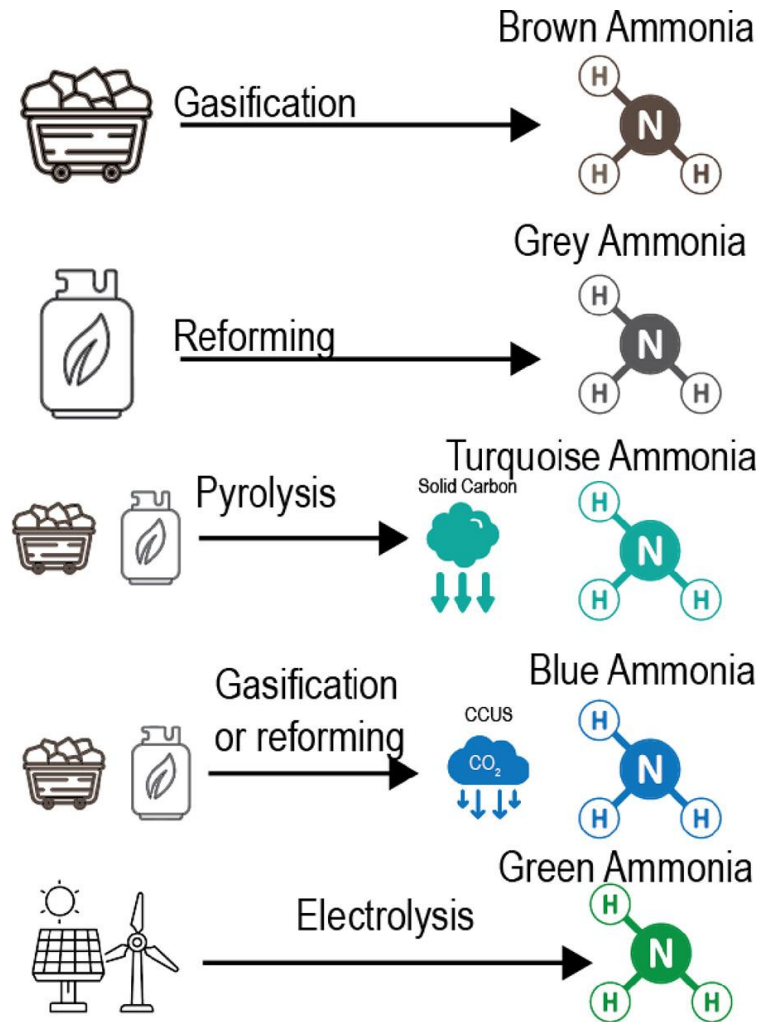
- Wzór chemiczny:  $\text{NH}_3$
- Bezbarwny
- Masa: 17,03 g/mol (lżejszy od powietrza)
- Intensywny zapach
- Toksyczny



# Toksyczność amoniaku

- 5 ppm – zauważalny po zapachu; Ok. 3,5 mg/m<sup>3</sup>
- 25 ppm – zaczyna drażnić;
- 50 ppm – drażni nos, oczy gardło, po dłuższym czasie ekspozycji można się przyzwycząić;
- 100 ppm – drażnienie dróg oddechowych, oskrzeli, oczu – zwłaszcza spojówek;
- 500 ppm – oddychanie zaczyna być trudne;
- 600 ppm – łzawienie oczu po 30 sek., oddychanie możliwe;
- 700 ppm – załzawienie oczu nastąpiło w ciągu kilku sek., oddychanie niemożliwe;
- 1000 ppm – łzy pojawiają się w oczach natychmiast, a widzenie staje się niemożliwe, oddychanie niezdolne, po kilku minutach podrażnienia skóry;
- 1500 ppm – natychmiastowa reakcja to konieczność ucieczki;
- 3500-5000 ppm – zagrożenie śmiertelne po dłuższym czasie ekspozycji. Ok. 2,5 g/m<sup>3</sup>

# Kolory amoniaku:



Kolor otrzymywanego, w procesie produkcji, amoniaku zależy w głównej mierze od pochodzenia wykorzystywanego do procesu wodoru

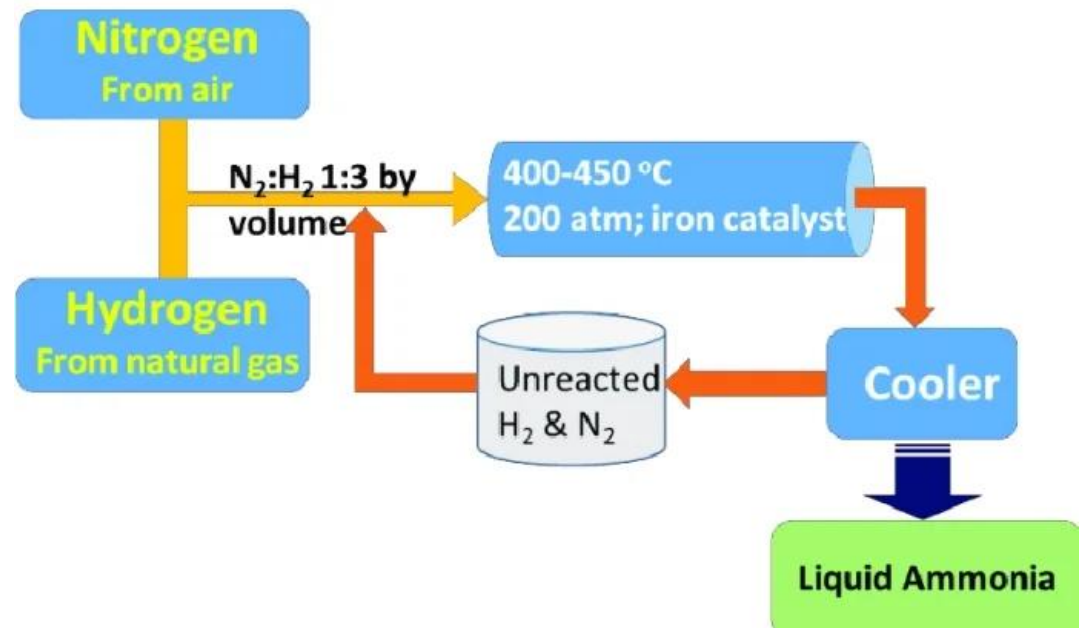
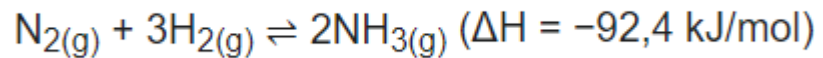
Obecnie produkcja amoniaku, zwykle opiera się na łączeniu wodoru z azotem pod wysokim ciśnieniem i w wysokiej temperaturze, w procesie zwanym procesem Habera-Boscha. Niestety jest to metoda zanieczyszczająca środowisko i mało energooszczędna.

# Metody produkcji amoniaku:

- W naturze: jako produkt gnicia substancji białkowych
- W przemyśle:
  - poddawanie działaniu mocnych zasad na sole amonowe w podwyższonej temperaturze,
  - hydroliza azotków,
  - bezpośrednio z pierwiastków metodą Habera i Boscha (90% produkcji światowej)
  - synteza amoniaku za pośrednictwem litu (LiMAS)

# Metoda Habera-Bosha

najpowszechniejszym sposobem pozyskiwania tego związku jest wykorzystanie wodoru pochodzącego z przekształconego w parę wodną metanu, który następnie jest łączony z oczyszczonym azotem w temperaturze około 450°C w reaktorach gazowych.



# Magazynowanie i transport amoniaku

Table 2: A comparison of fuel volume, mass and cost to provide 9270 MWh

Fuel type	LNG [44] [7] [45]	Diesel (HFO) [46] [47] [48] [49]	Hydrogen (gas @ 700bar) [46] [50] [51] [48]	Hydrogen (liquid) [46] [51] [48]	Metal Hydride [46] [51] [48]	Ammonia [52] [53] [54] [55]	Methanol [52] [53] [56]	Batteries (Li-ion) [57] [58] [59]
Efficiency	58%	20-40%	40-60%	40-60%	40-60%	30-60%	55-60%	70-95%
Required input energy (MWh)	15983	23175	15450	15450	15450	15450	15450	9758
<b>Volume</b>								
Energy density (MWh/m <sup>3</sup> )	5.83	9.7	1.4	2.36	3.18	4.82	4.99	0.30
Total storage size (m <sup>3</sup> )	2740	2389	11036	6547	4858	3206	3095	32855
% of cargo	2.03%	1.77%	8.17%	4.85%	3.60%	2.37%	2.29%	24.3%
% compared to max FO	101%	88%	409%	242%	180%	119%	115%	1217%
<b>Mass</b>								
Energy density (MWh/kg)	0.0142	0.0116	0.0333	0.0333	0.0006	0.0052	0.0055	0.0002
Total storage mass (tonnes)	1123	1998	464	464	26638	2959	2792	44354
% of total	1.68%	2.99%	0.69%	0.69%	39.81%	4.42%	4.17%	66.3%
<b>Price</b>								
Fuel per voyage (£ Millions)	0.349	1.367	8.654	8.654	8.654	1.976	1.123	6.913*

## A Comparison of hydrogen and ammonia for future long distance shipping fuels

[https://www.researchgate.net/publication/339106527\\_A\\_Comparison\\_of\\_hydrogen\\_and\\_ammonia\\_for\\_future\\_long\\_distance\\_shipping\\_fuels?enrichId=rgreq-782af58023bbaca4261f9daa7c22f040-](https://www.researchgate.net/publication/339106527_A_Comparison_of_hydrogen_and_ammonia_for_future_long_distance_shipping_fuels?enrichId=rgreq-782af58023bbaca4261f9daa7c22f040-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdIOzMzOTUwNjUyNzBUzo4NTc3OTE1ODU1OTEyOTZAMTU4MTUyNDg1OTAyMQ%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf)

[XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdIOzMzOTUwNjUyNzBUzo4NTc3OTE1ODU1OTEyOTZAMTU4MTUyNDg1OTAyMQ%3D%3D&el=1\\_x\\_3&\\_esc=publicationCoverPdf](https://www.researchgate.net/publication/339106527_A_Comparison_of_hydrogen_and_ammonia_for_future_long_distance_shipping_fuels?enrichId=rgreq-782af58023bbaca4261f9daa7c22f040-XXX&enrichSource=Y292ZXJQYWdIOzMzOTUwNjUyNzBUzo4NTc3OTE1ODU1OTEyOTZAMTU4MTUyNDg1OTAyMQ%3D%3D&el=1_x_3&_esc=publicationCoverPdf)

# Silnik amoniakalny



- Pojemność ok. 2l
- Moc 163 KM
- Brak sprężarki i kompresora
- Producent: Toyota i GAC
- Fundusze zainwestowane: 6 miliardów USD

# Reakcja odwrotna

- Zachodzi na katalizatorze
- Jest reakcją endotermiczną
- Zachodzi w temperaturach o wiele wyższych niż temperatury pracy ogniw niskotemperaturowych
- Zazwyczaj nie pozwala na rekonwersję 100% amoniaku
- Dodatkowe koszty związane z dostarczaniem energii cieplnej i usuwaniem pozostałego amoniaku
- Sprawność termokatalityczna procesu wynosi około 85% energii zawartej w otrzymywanym wodorze



$$\Delta H = +46 \text{ kJ/mol}$$

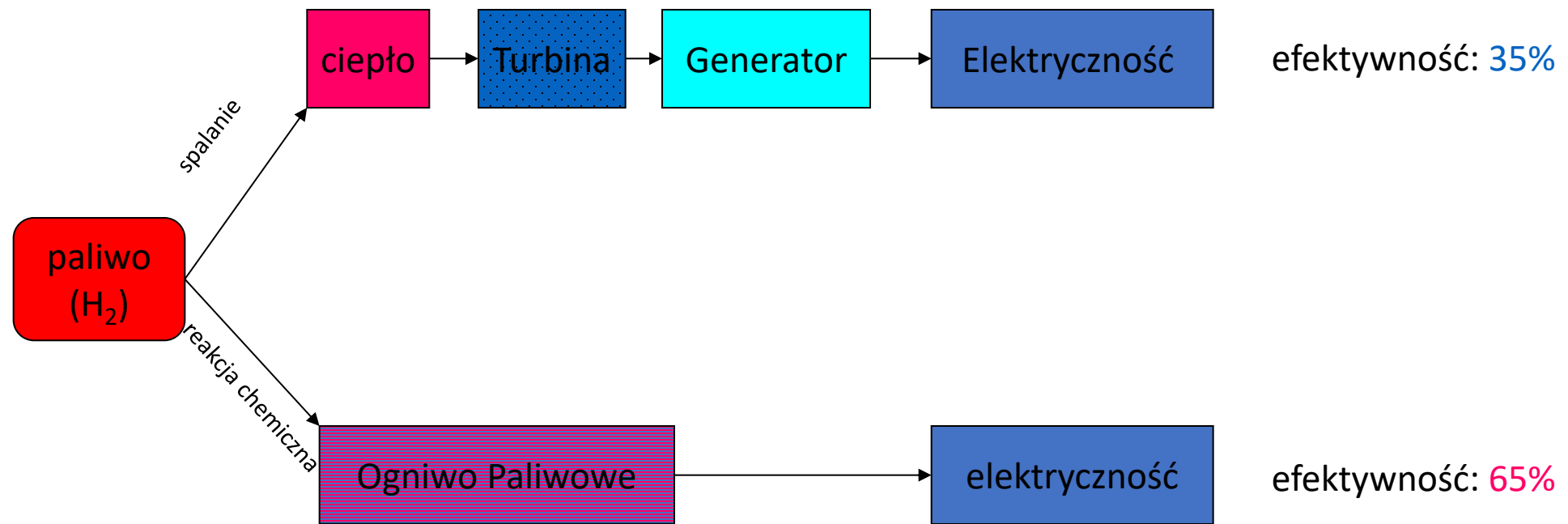


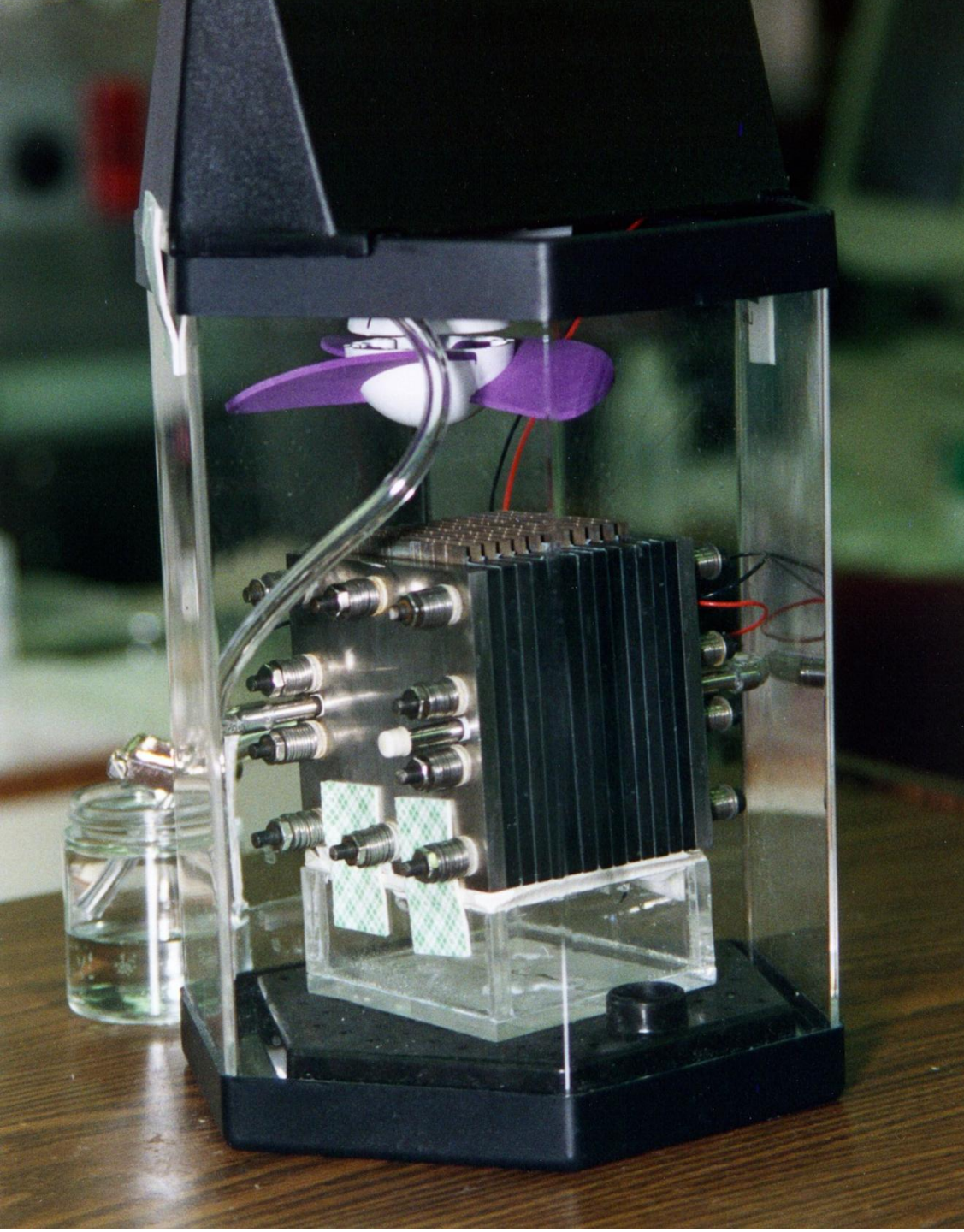
# Ogniwa Paliwowe

- Wstęp
- Bilans i termodynamika procesów
- Budowa pojedynczej celi
- Podział ogniw paliwowych

Inż. Michał Maciejewicz

# Produkcja energii elektrycznej

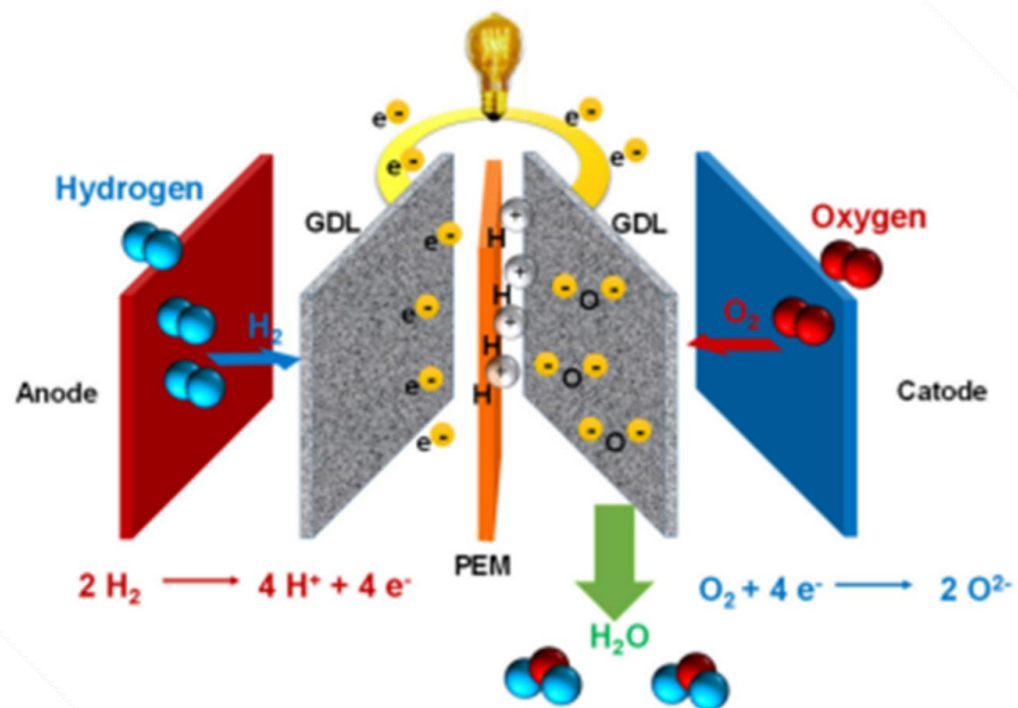
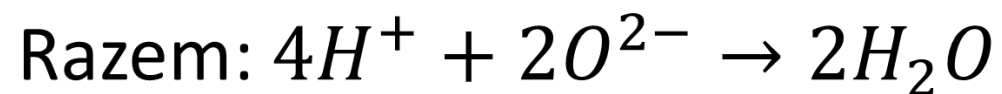
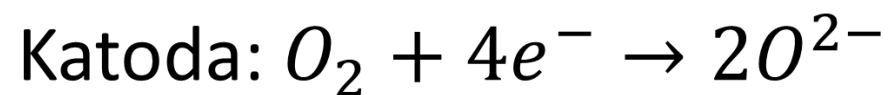
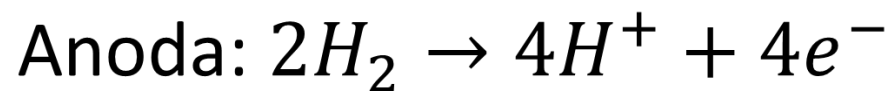




# Czym jest ogniwo paliwowe?

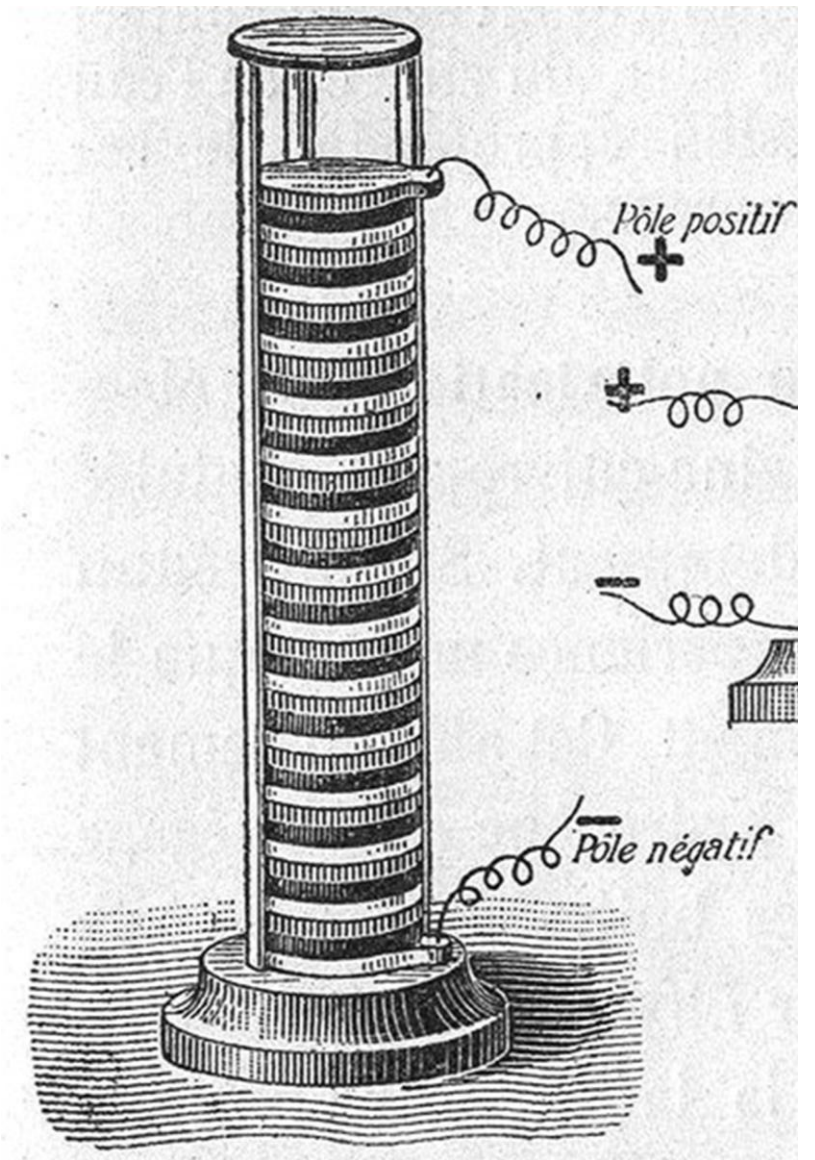
Ogniwo paliwowe, jest to urządzenie w którym zachodzi bezpośrednia konwersja energii chemicznej w energię elektryczną z reakcji utleniania stale dostarczanego do niego z zewnątrz paliwa i utleniacza.

# Reakcje zachodzące w ogniwie



# Rys historyczny

- Koncepcja ogniwa paliwowego historycznie sięga do odkrycia Williama R Grove'a.
- Nazwał on swoje odkrycie „gas cell” (komórka gazowa/ ogniwo gazowe) i opisał je jako „curious voltaic pile” fascynując galwaniczne ogniwo, w liście do Michaela Faradaya w 1842 roku
- Ludwig Mond, przemysłowiec z wielkiej Brytanii w 1889, został określony pomysłodawcą dobrze nam znanego określenia „fuel cell” co tłumaczymy jako ogniwo paliwowe. Zauważył on również że wodór może być stale podawane do urządzenia.



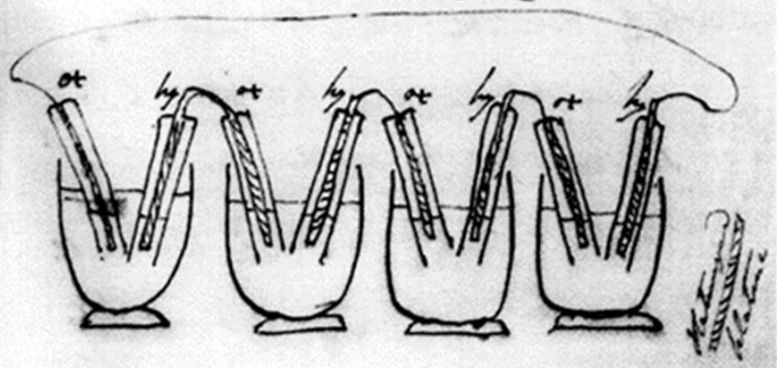
Londor Institution

Saturday Oct 22

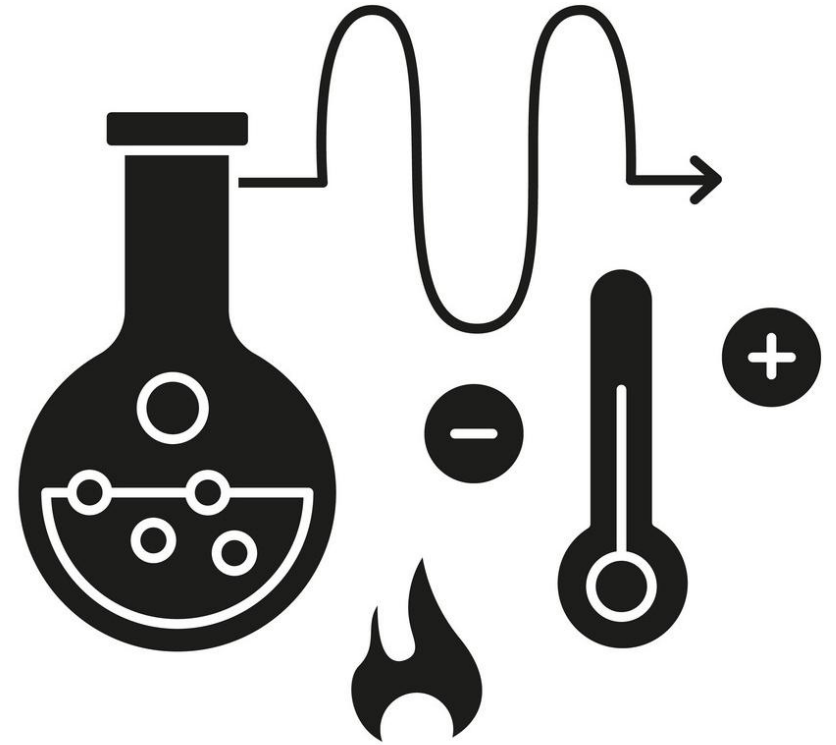
1842

My dear Sir

I have just completed a curious voltaic pile which I think you would like to see, it is composed of alternate tubes of oxygen & hydrogen through each of which paper chloride soil so as to dip into separate vessels of water acidulated with sulphuric acid the board just touching the extremities of the soil as in the rough figure below. the



# Bilans energetyczny i Termodynamika procesów

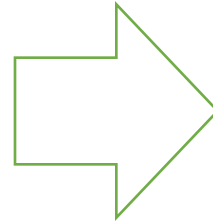


$$\text{IZT: } \Delta \bar{U} = \bar{Q} - \bar{L}$$

$$\bar{H} = \bar{U} + p\bar{V}$$

$$\bar{H} = \bar{Q} - \bar{L} + p\bar{V}$$

$$\Delta \bar{H} = \bar{Q} - \bar{L} + p\Delta \bar{V}$$



$$\bar{G} = \bar{H} - T \cdot \bar{S}$$

$$\Delta \bar{G} = \Delta(\bar{H} - T \cdot \bar{S}) = \Delta \bar{H} - T \cdot \Delta \bar{S}$$

$$\Delta \bar{G} = \bar{Q} - \bar{L} + p\Delta \bar{V} - T \cdot \Delta \bar{S}$$

$\bar{U}$  – energia wewnętrzna

$\bar{Q}$  – ciepło

$\bar{L}$  – praca

$p$  – ciśnienie

$\bar{V}$  – objętość  $m^3$

$\bar{G}$  – swobodna entalpia molowa

$T$  – temperatura

$\bar{S}$  – entropia

$\bar{H}$  – entalpia molowa

$\Delta$  – zmiana

$\overline{L}_{el}$  – praca prądu elektrycznego

$\overline{L}_{ex}$  – praca ekspansji ładunków elektrycznych

$n$  – liczba elektronów

powstających w pojedynczej reakcji

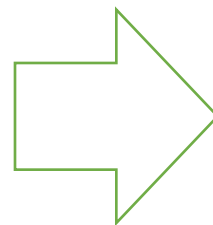
$F$  – stała Faradaya

$E$  – napięcie na elektrodach pojedynczej celi ogniwa

$$\overline{L} = \overline{L}_{el} + \overline{L}_{ex}$$

$$\overline{L}_{el} = n \cdot F \cdot E$$

$$\overline{L}_{ex} = p\Delta V$$



$$\overline{G} = \overline{H} - T \cdot \overline{S}$$

$$\Delta\overline{G} = \Delta(\overline{H} - T \cdot \overline{S}) = \Delta\overline{H} - T \cdot \Delta\overline{S}$$

$$\Delta\overline{G} = \overline{Q} - \overline{L} + p\Delta\overline{V} - T \cdot \Delta\overline{S}$$

$$\Delta\overline{G} = \overline{Q} - (n \cdot F \cdot E + p\Delta V) + p\Delta V - T \cdot \Delta\overline{S}$$

$$\Delta\overline{G} = \overline{Q} - n \cdot F \cdot E - p\Delta V + p\Delta V - T \cdot \Delta\overline{S}$$

$$\Delta\overline{G} = \overline{Q} - n \cdot F \cdot E - T \cdot \Delta\overline{S}$$

$$\Delta\bar{G} = T \cdot \Delta\bar{S} - n \cdot F \cdot E^{\circ} - T \cdot \Delta\bar{S}$$

$$\bar{Q} = T \cdot \Delta\bar{S}$$

$$\Delta\bar{G} = -n \cdot F \cdot E^{\circ}$$

$$E^{\circ} = -\frac{\Delta\bar{G}}{n \cdot F}$$

Potencjał odwracalny $E^{\circ}$ , [V]	Zmiana swobodnej entalpii molowej $(\Delta\bar{G})_{\text{H}_2\text{O}}$ , [kJ/mol]	Temperatura [K]	Stan skupienia wody
1,23	-237,2	298,15	ciecz
1,18	-228,2	353,15	ciecz
1,17	-226,1	353,15	gaz
1,17	-225,2	373,15	gaz

$$E^{\circ} = \frac{-237200 \text{ J/mol}}{2 \cdot 96485 \text{ C/mol}} = 1,2292 \text{ V} \cong 1,23 \text{ V}$$

# Warunki pracy ogniwa

## Obszary pracy ogniwa

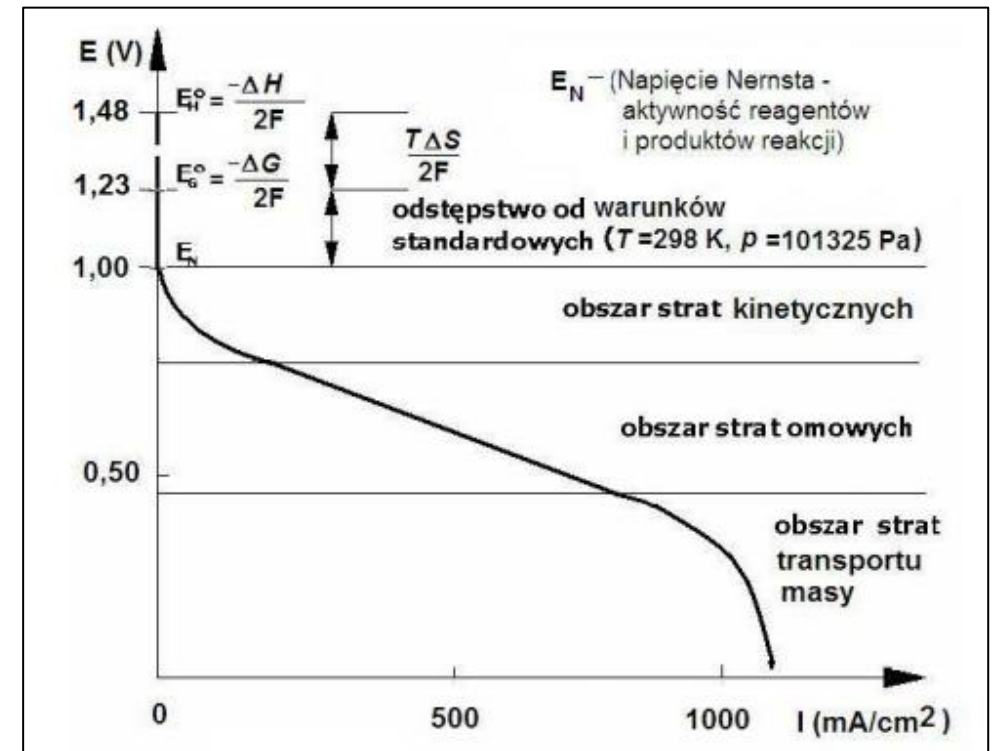
Obszar I: strat kinetycznych

$$U \sim \ln\left(\frac{I}{I_0}\right)$$

Obszar II: strat omowych

$$U \sim I$$

Obszar III: strat transportu masy  $U \sim T \cdot \ln\left(1 - \frac{I}{I_{max}}\right)$



# Sprawność ogniwa paliwowego

$$\eta_{energ} = \frac{L_{el}}{E_{H_2}} = \frac{U \cdot I \cdot t}{n \cdot \overline{\Delta H_{H_2}}}$$

$$E_{H_2} = \overline{\Delta H_{H_2}} = 28540 \text{ J/mol}$$

$L_{el}$  – praca prądu elektrycznego

$E_{H_2}$  – energia zwarta w zużywanym wodorze

$n$  – liczba elektronów

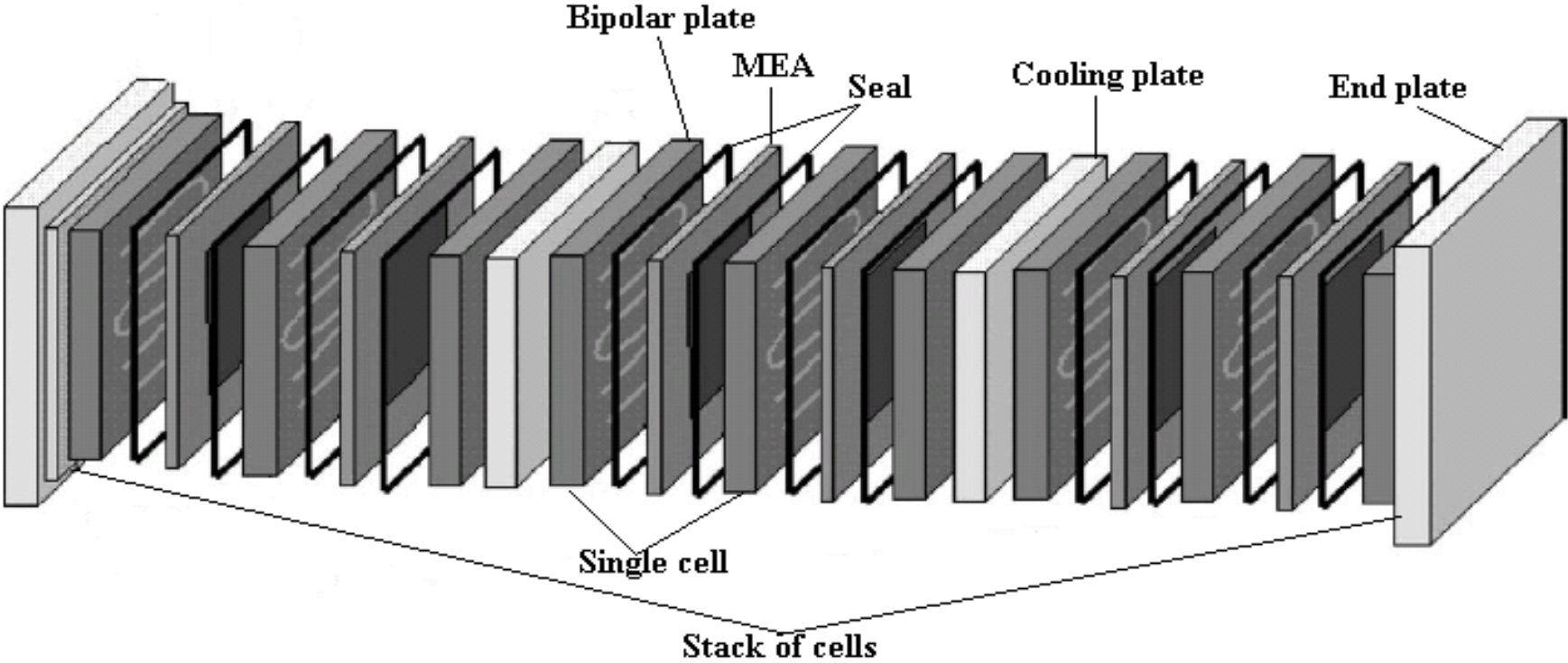
powstających w pojedynczej reakcji

$H_{H_2}$  – entalpia wodoru

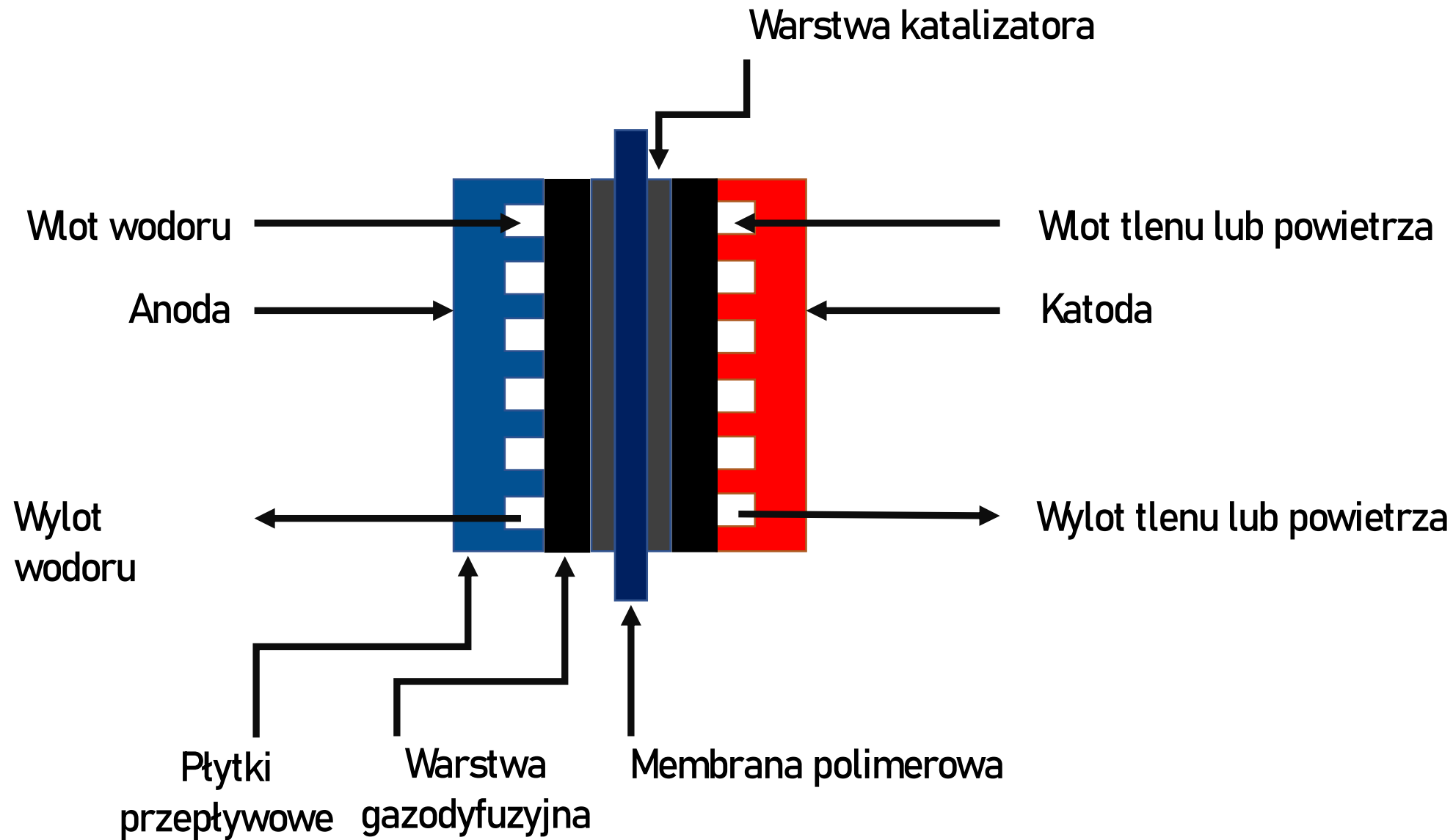
**Budowa  
pojedynczej celi**



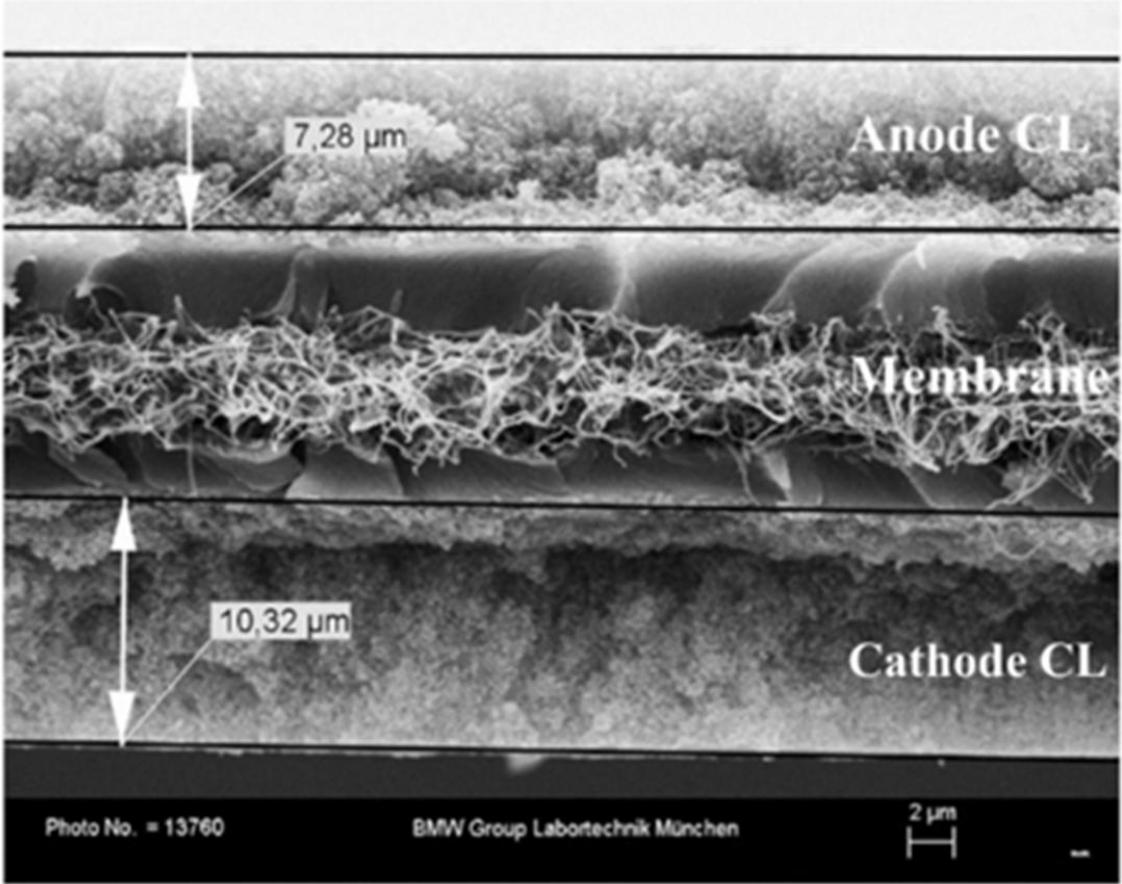
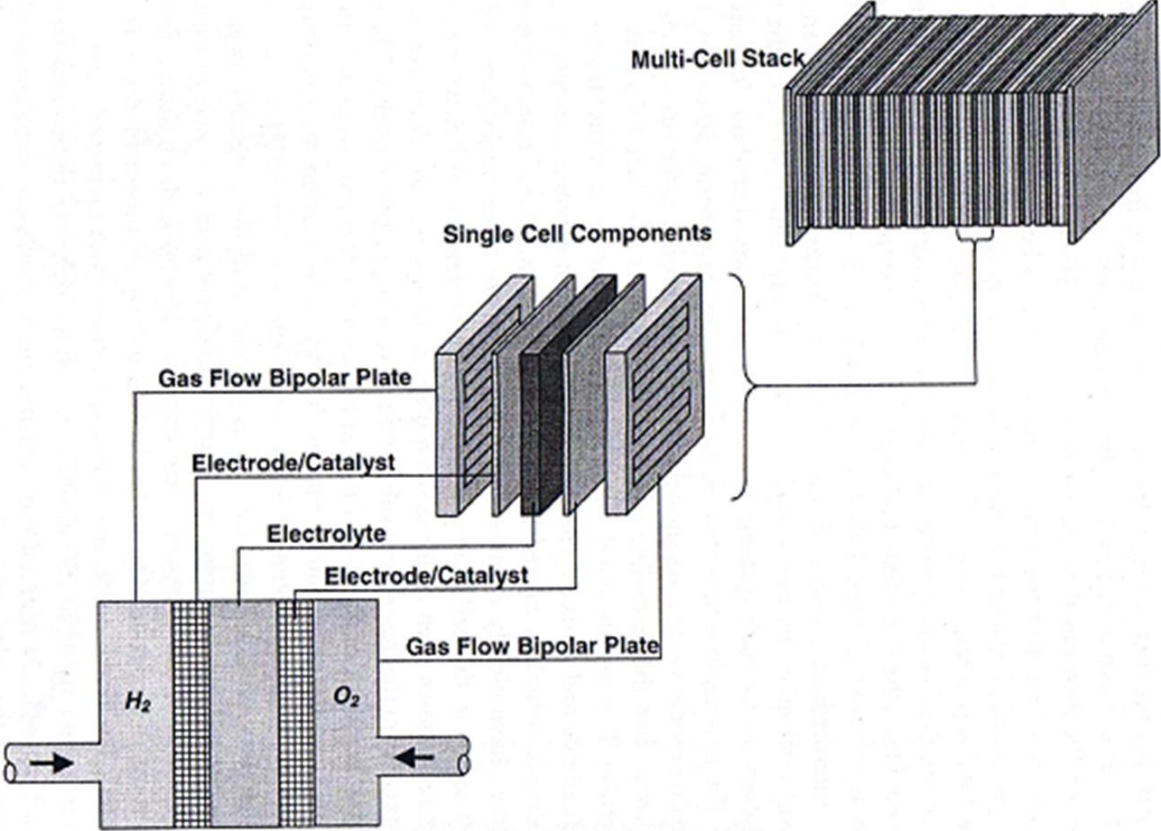
# Membrane-electrode assembly



# Budowa pojedynczej celi

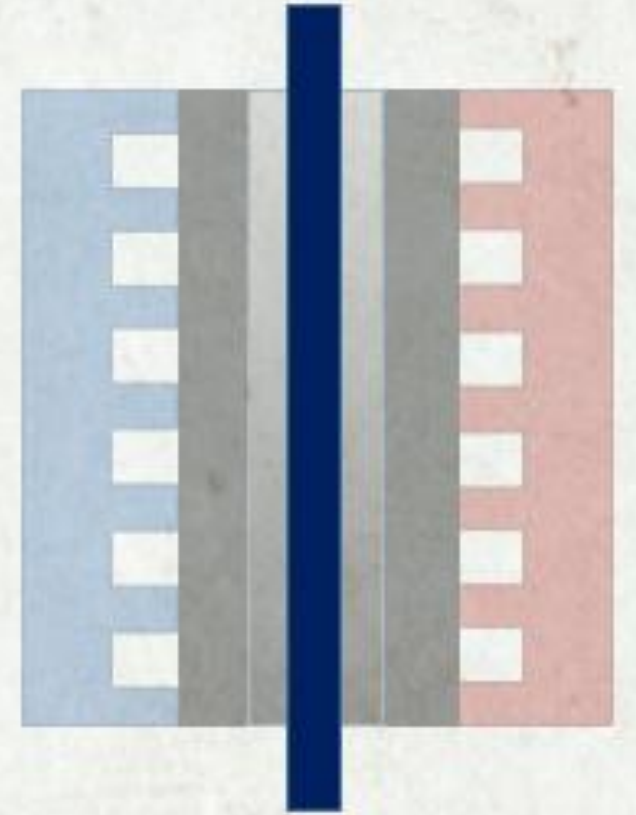


# Budowa pojedynczej celi



# Membrany polimerowe

- Pracują w środowisku kwaśnym
- Wpływają na koszt, budowę i działanie ogniwa
- Wymagają zwilżenia
- Wrażliwe na uszkodzenia mechaniczne



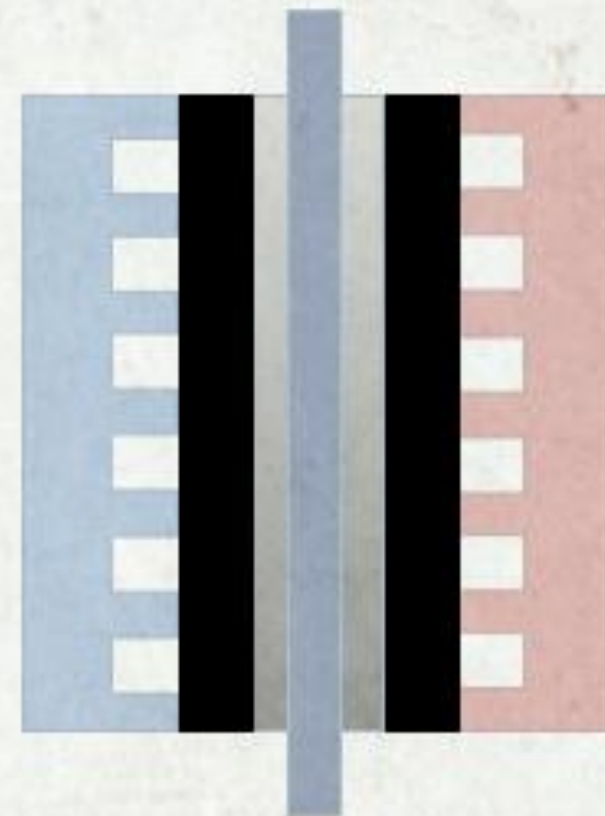
# Membrany polimerowe



# Warstwy gazodifuzyjne

Zadania:

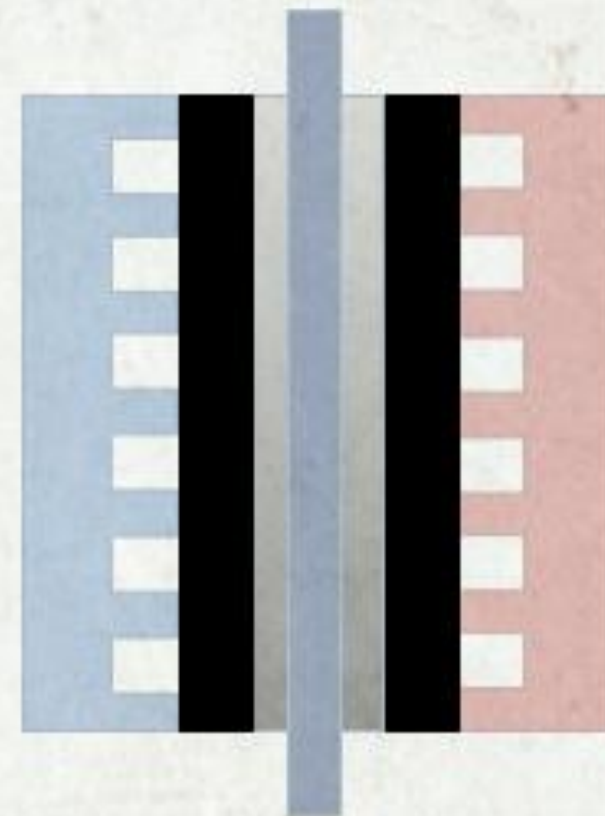
- zapewniają swobodny dostęp gazów wykorzystywanych do reakcji zachodzących w ogniwie
- równomierne rozprowadzanie gazów po całej powierzchni membrany
- umożliwiać odprowadzenie wody, będącej produktem ubocznym końcowej reakcji.



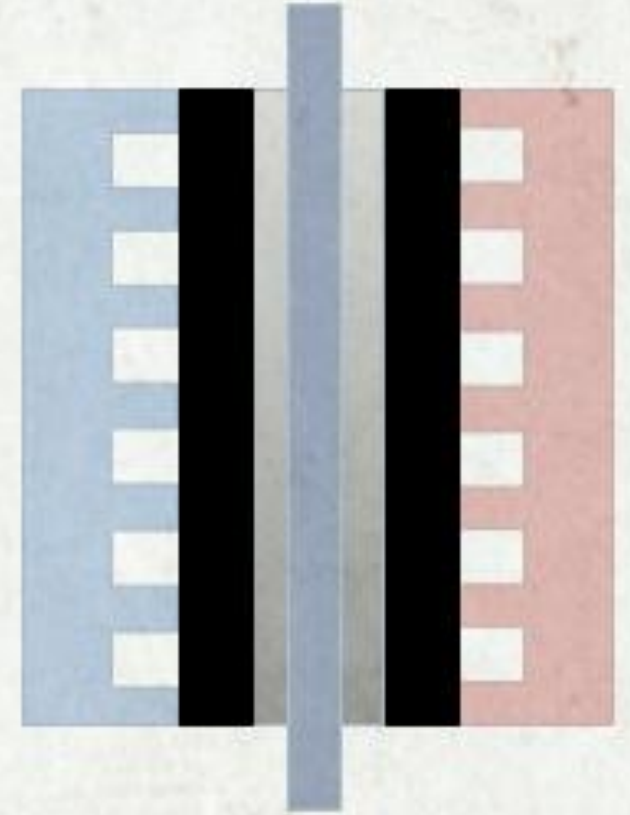
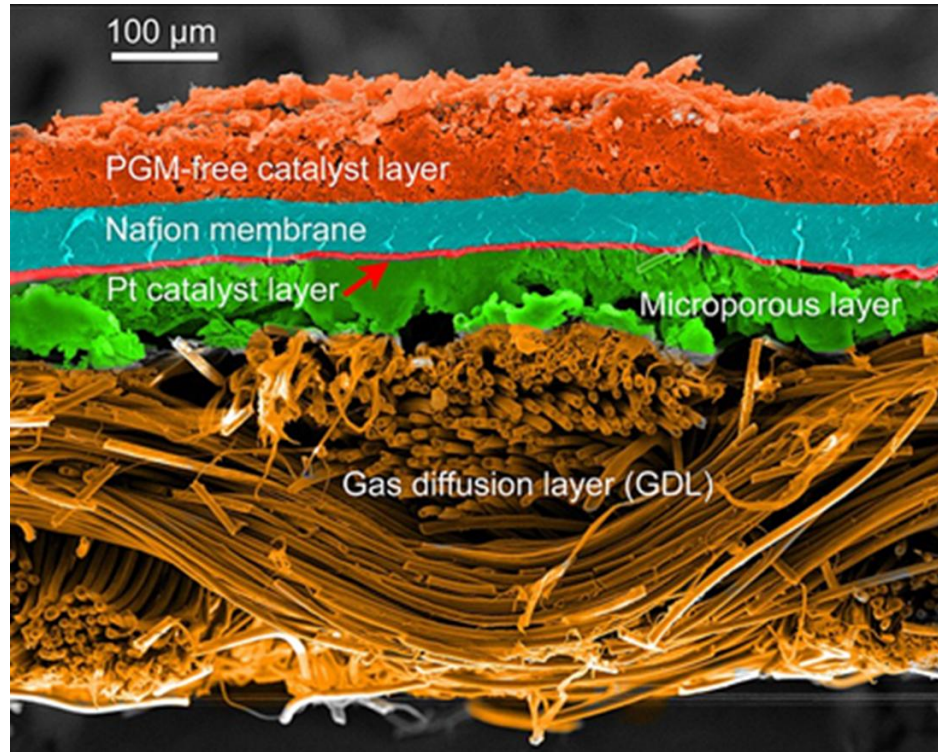
# Warstwy gazodifuzyjne

## Cechy

- łatwa dyfuzja gazów zarówno na powierzchni jak i w objętości
- duża porowatość
- mała rezystancja
- duża wytrzymałość mechaniczna
- dobra przepuszczalność wody

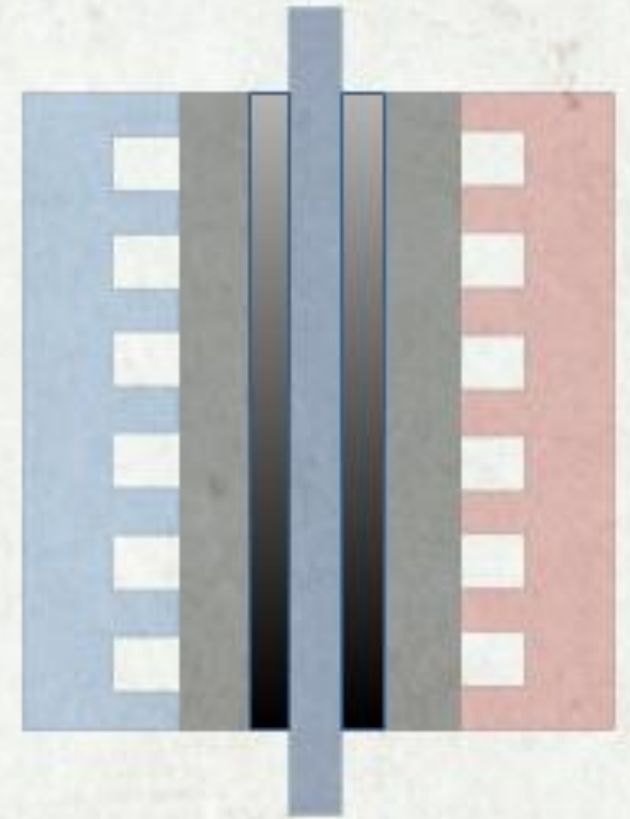


# Warstwy gazodifuzyjne



# Warstwa katalizatora

- umożliwia pracę ogniwa w niskich temperaturach
- najczęściej stosowanym katalizatorem w ogniwach paliwowych typu PEM spośród metali szlachetnych jest platyna
- Ze względu na swą cenę katalizatory podwyższają cenę ostateczną ogniwa paliwowego.



# Płytki bipolarne

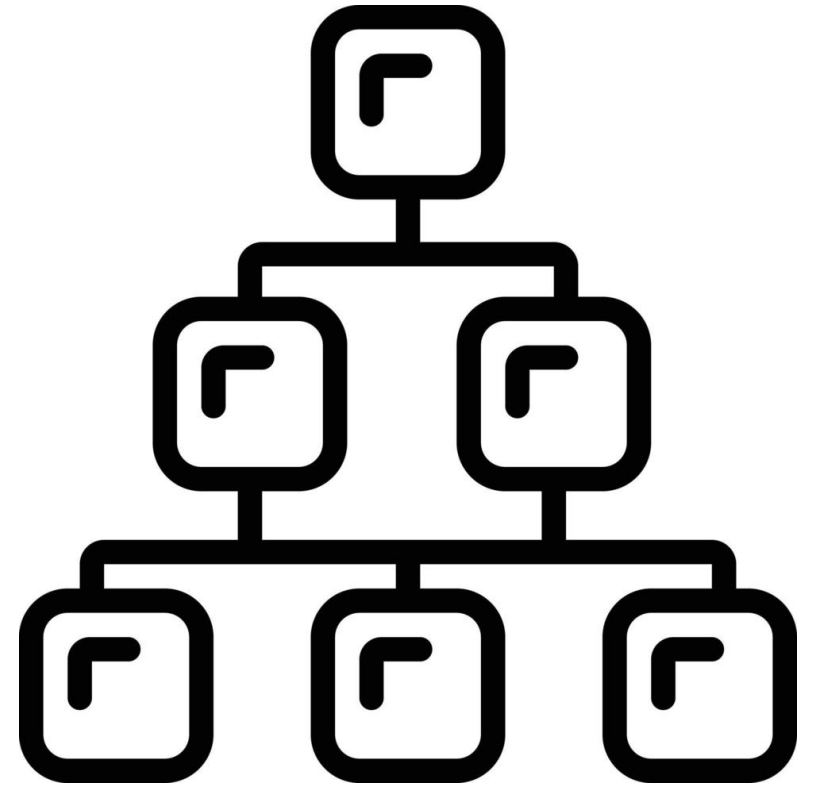
- stosowane przy szeregowym łączeniu ogniw paliwowych w stos
- montowane są pomiędzy poszczególnymi celami łącząc elektrody pojedynczych cel i zapewniając separację gazów reakcyjnych.

Cechy:

- wysoką przewodnością elektryczną
- wysoką przewodnością cieplną
- brakiem przepuszczalności gazów
- dużą wytrzymałością mechaniczną
- odpornością na korozję w atmosferze redukującej i utleniającej
- łatwością obróbki
- małą masą
- niskimi kosztami produkcji



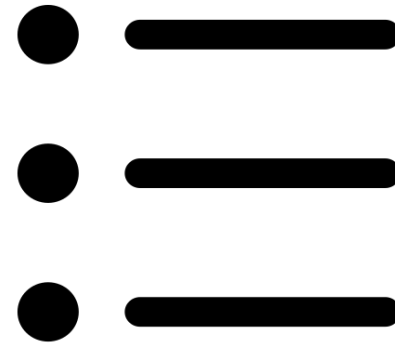
# Podział ogniów paliwowych



# Podział ogniw paliwowych



Temperatura pracy



Rodzaj elektrolitu

# Warunki pracy ogniwa

Podział ze względu na temperaturę pracy

Nisko temperaturowe  $<100^{\circ}\text{C}$

Średnio temperaturowe  $100\text{--}500^{\circ}\text{C}$

Wysoko temperaturowe  $>500^{\circ}\text{C}$

Bardzo wysoko temperaturowe  $>1000^{\circ}\text{C}$

# Warunki pracy ogniwa

Podział ze względu na rodzaj elektrolitu

➤ **Alkaiczne (AFC)**

➤ **Z kwasem fosforowym (PAFC)**

➤ **Z membraną do wymiany protonów (PEM)**

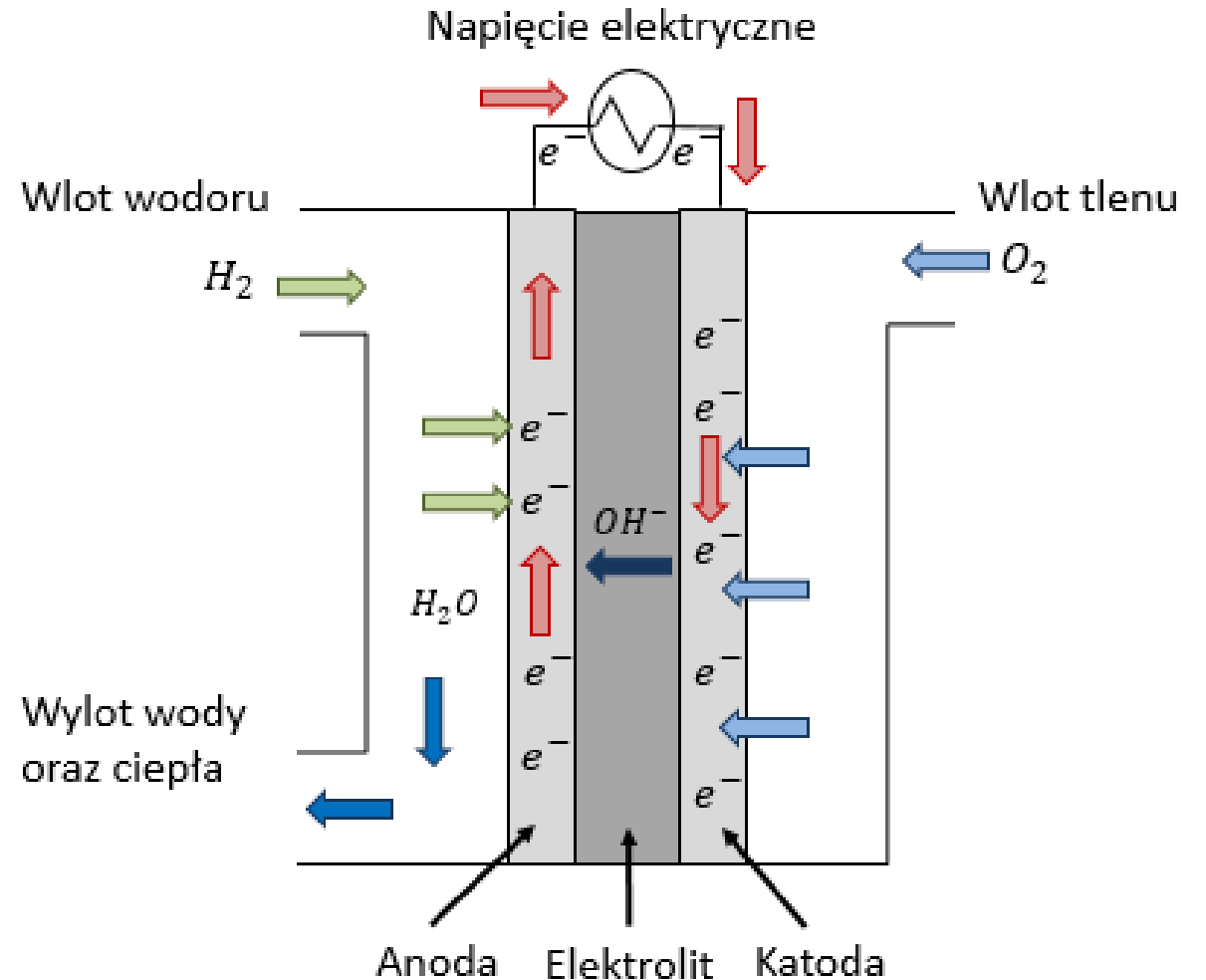
➤ **Ze stopionym węglanem (MCFC)**

➤ **Metanolowe (DMFC)**

➤ **Tlenkowo-ceramiczne (SOFC)**

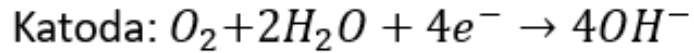
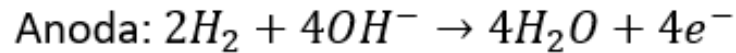
# Alkaiczne ogniwa paliwowe

- AFC – Alkaline fuel cell
- Temperatura pracy:
  - Pierwotnie: 100-250°C
  - Obecnie: 23-70°C
- Wymagają stosowania katalizatorów
- Wrażliwe na zatrucie CO<sub>2</sub>
- Sprawność elektryczna: 40-55%

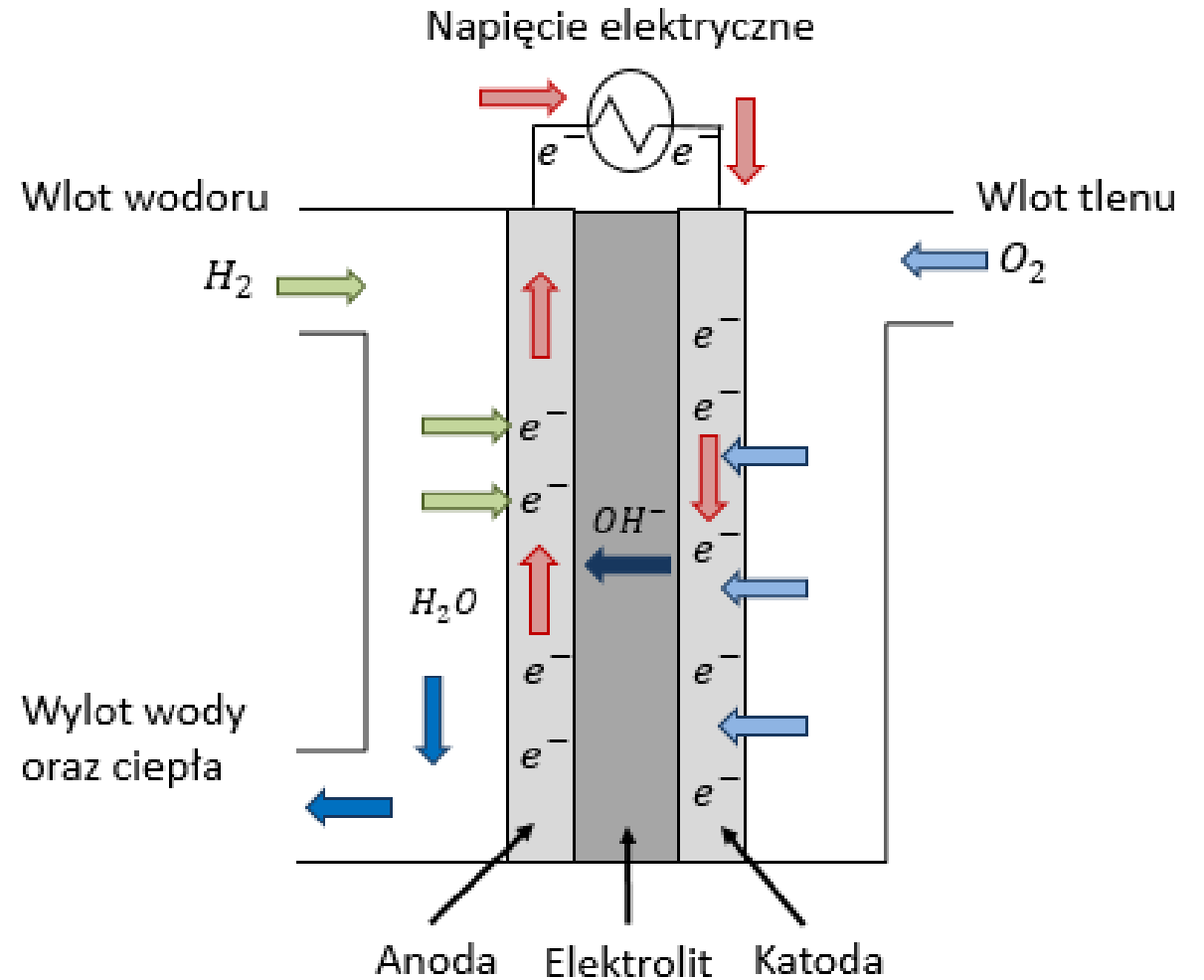
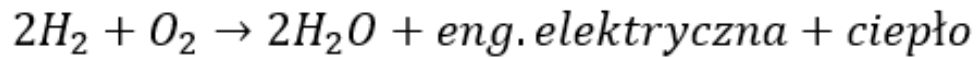


# Alkaiczne ogniwa paliwowe

Reakcje:



Ogółem:

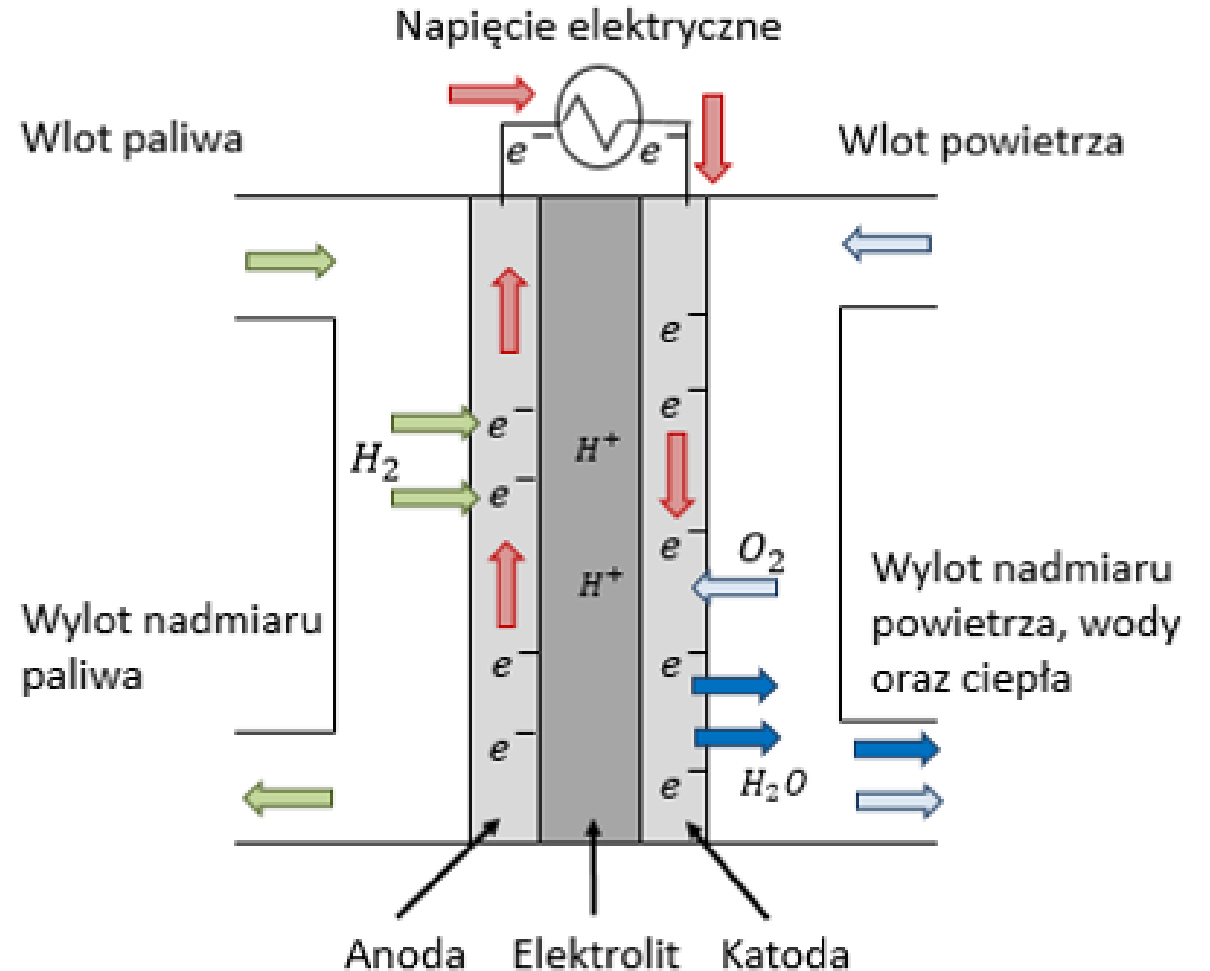


# Alkaiczne ogniwa paliwowe



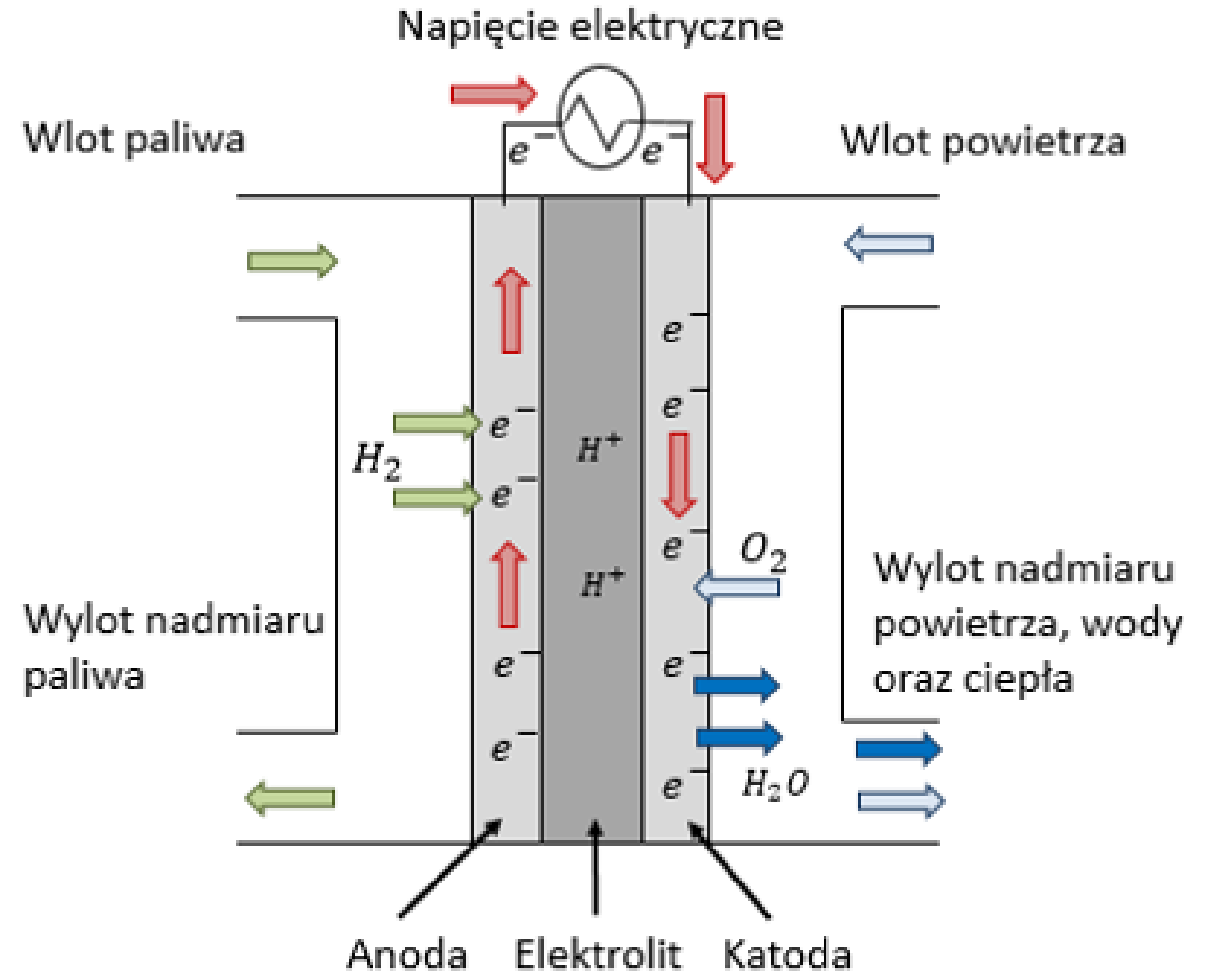
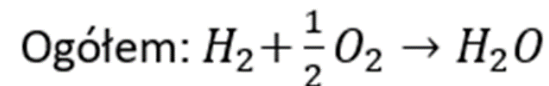
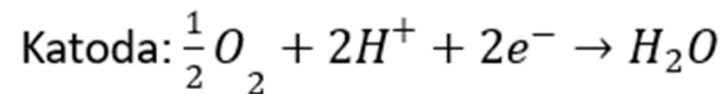
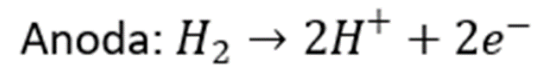
# Ogniwa z membraną protono-wymienną

- PEM – Proton-Exchange Membrane
  - Temperatura pracy: około 80°C
  - Paliwem jest czysty Wodór
  - Wymagają stosowania katalizatorów
  - Wrażliwe na zatrucie CO
  - Sprawność elektryczna: 40-55%

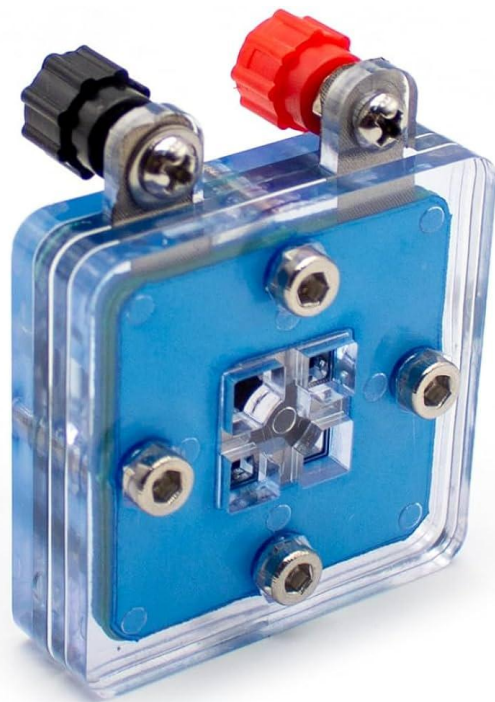


# Ogniwa z membraną protonowymienną

Reakcje:

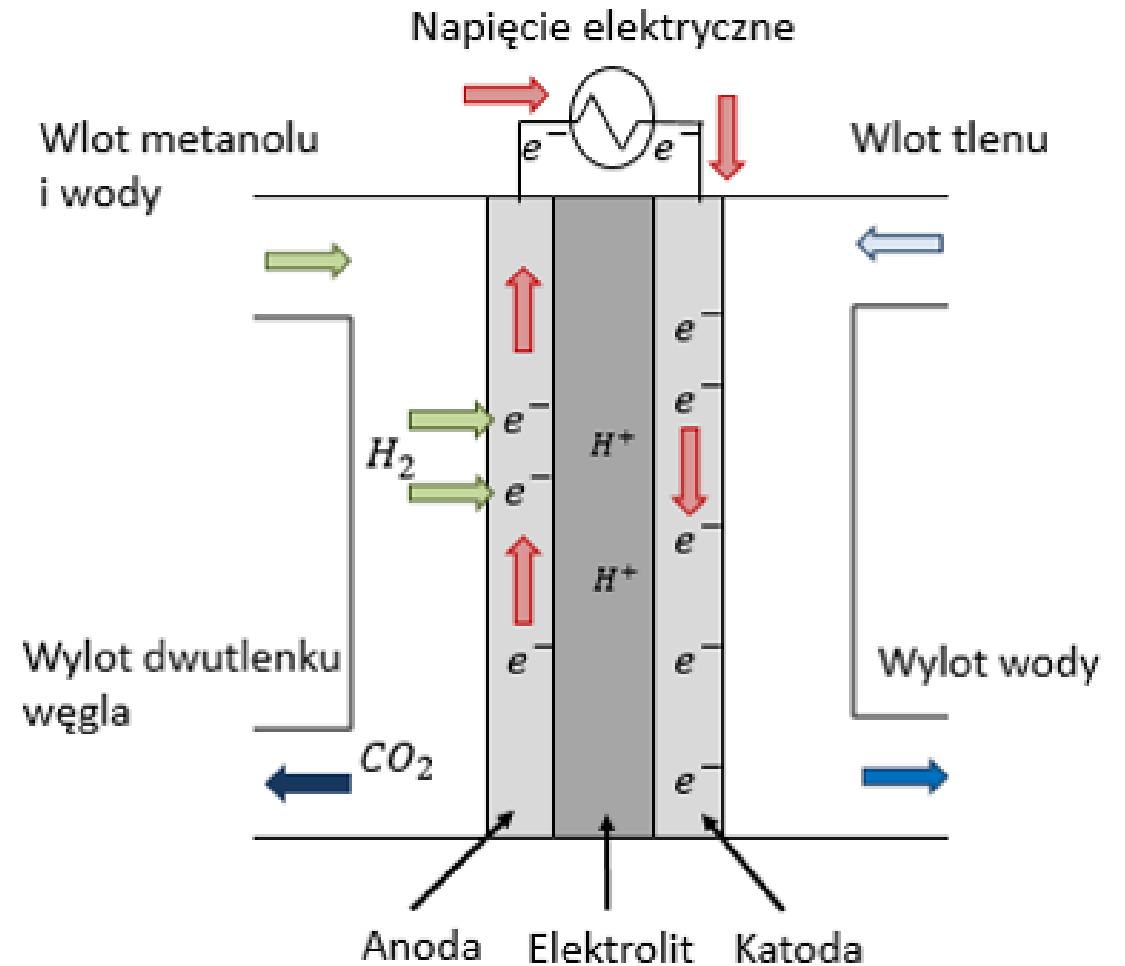


# Ogniwa z membraną protonowymienną



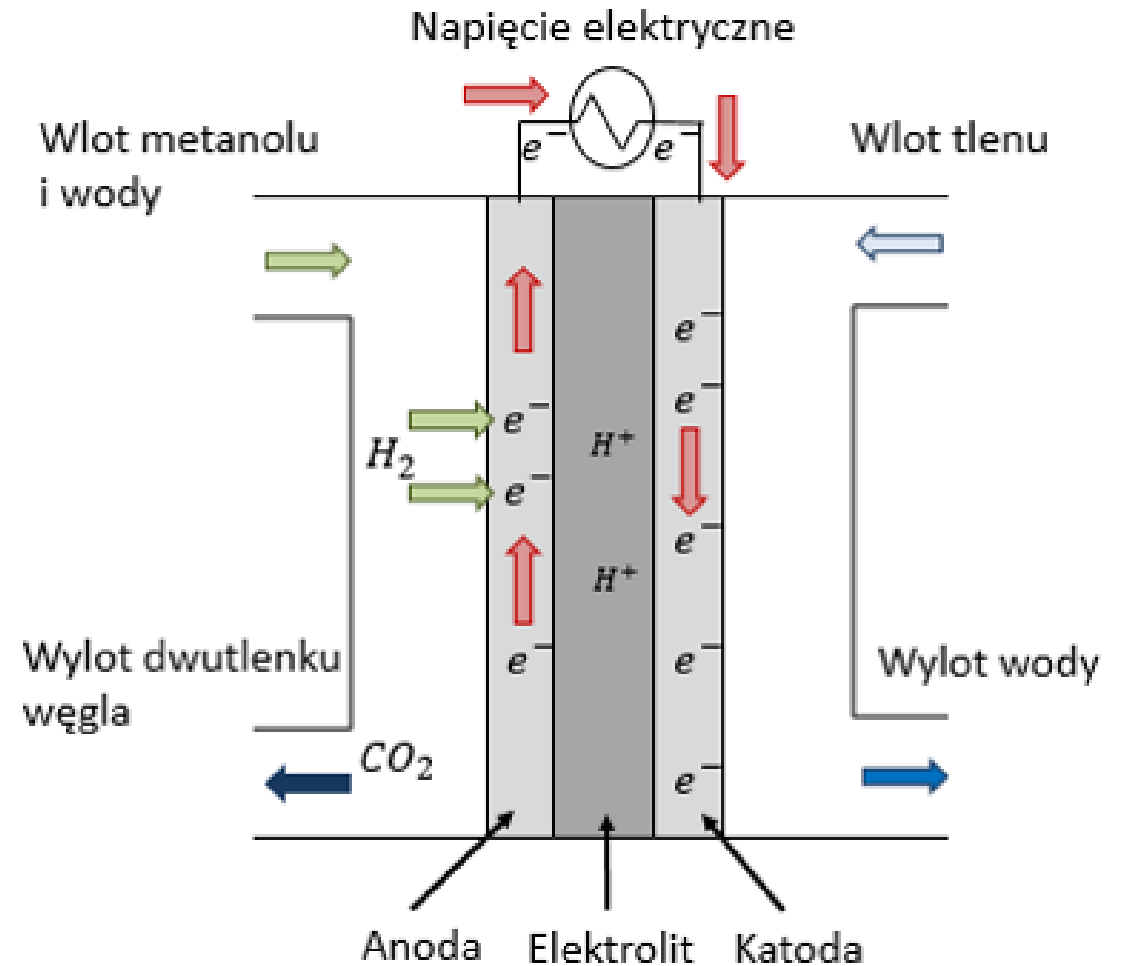
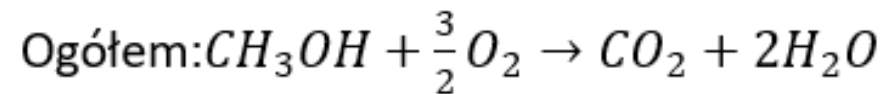
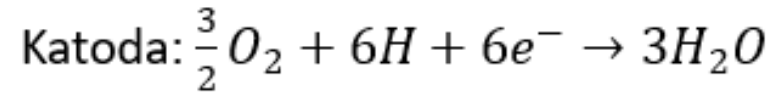
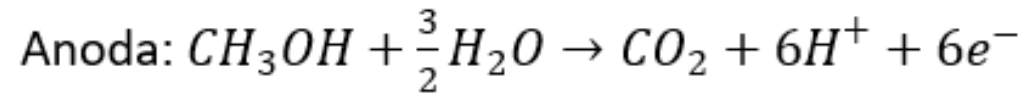
# Ogniwa metanolowe

- DMFC – Direct Metanol Fuel Cell
- Temperatura pracy: 60-200°C
- Paliwem jest czysty Wodór lub paliwa bogate w wodór, takie jak metanol, etanol i paliwa węglowodorowe
- Wymagają stosowania katalizatorów
- Sprawność elektryczna: 50-70%

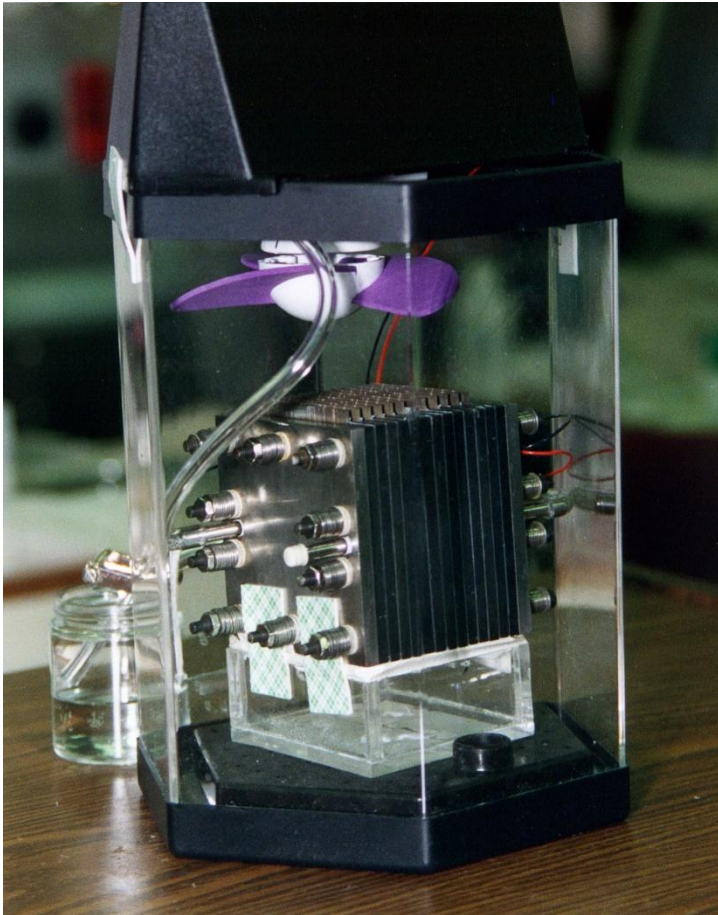


# Ogniwa metanolowe

Reakcje:

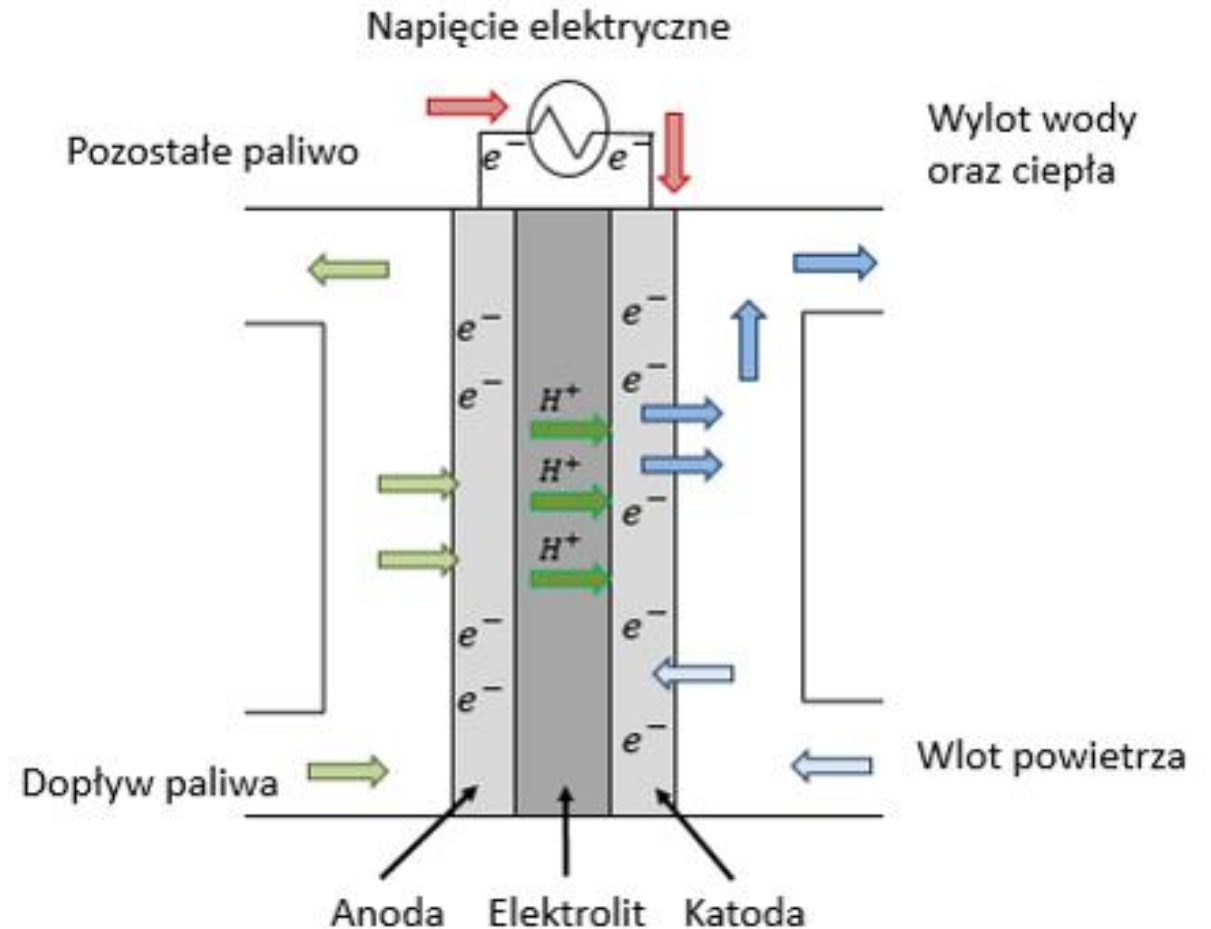


# Ogniwa metanolowe



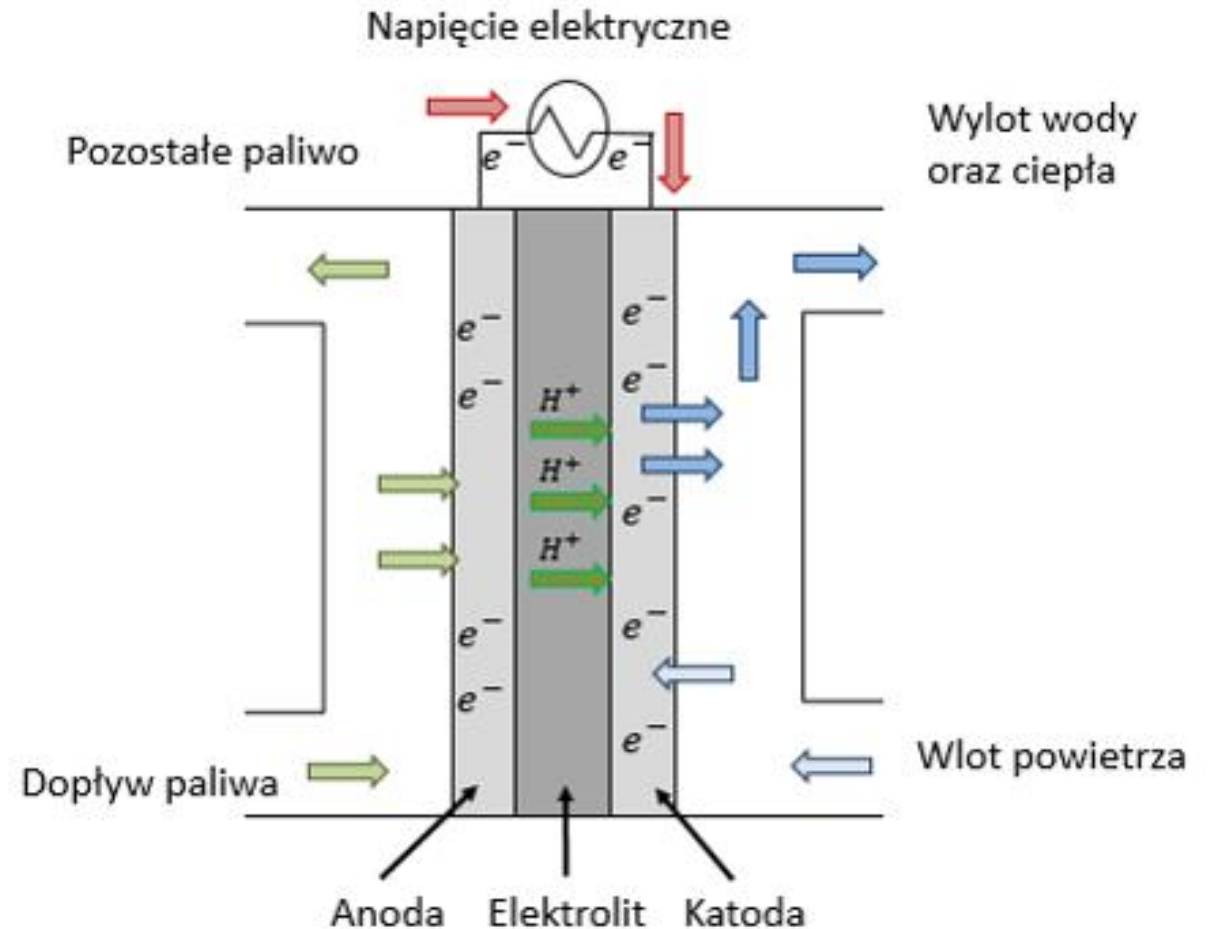
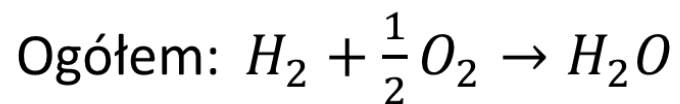
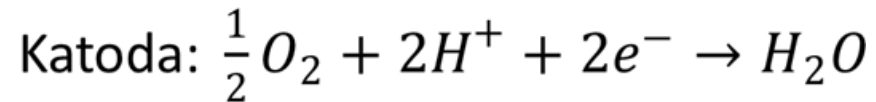
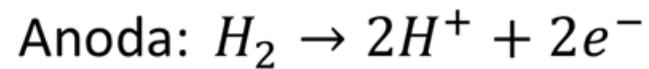
# Ogniwa z kwasem fosforowym

- PAFC – Phosphoric Acid Fuel Cell
  - Temperatura pracy: 150-200°C
  - Paliwem jest czysty Wodór gaz ziemny, biogaz
  - Wymagają stosowania katalizatorów, ale są bardziej odporne na zanieczyszczenia
  - Niska gęstość energetyczna
  - Sprawność elektryczna: 40-55%



# Ogniwa z kwasem fosforowym

Reakcje:

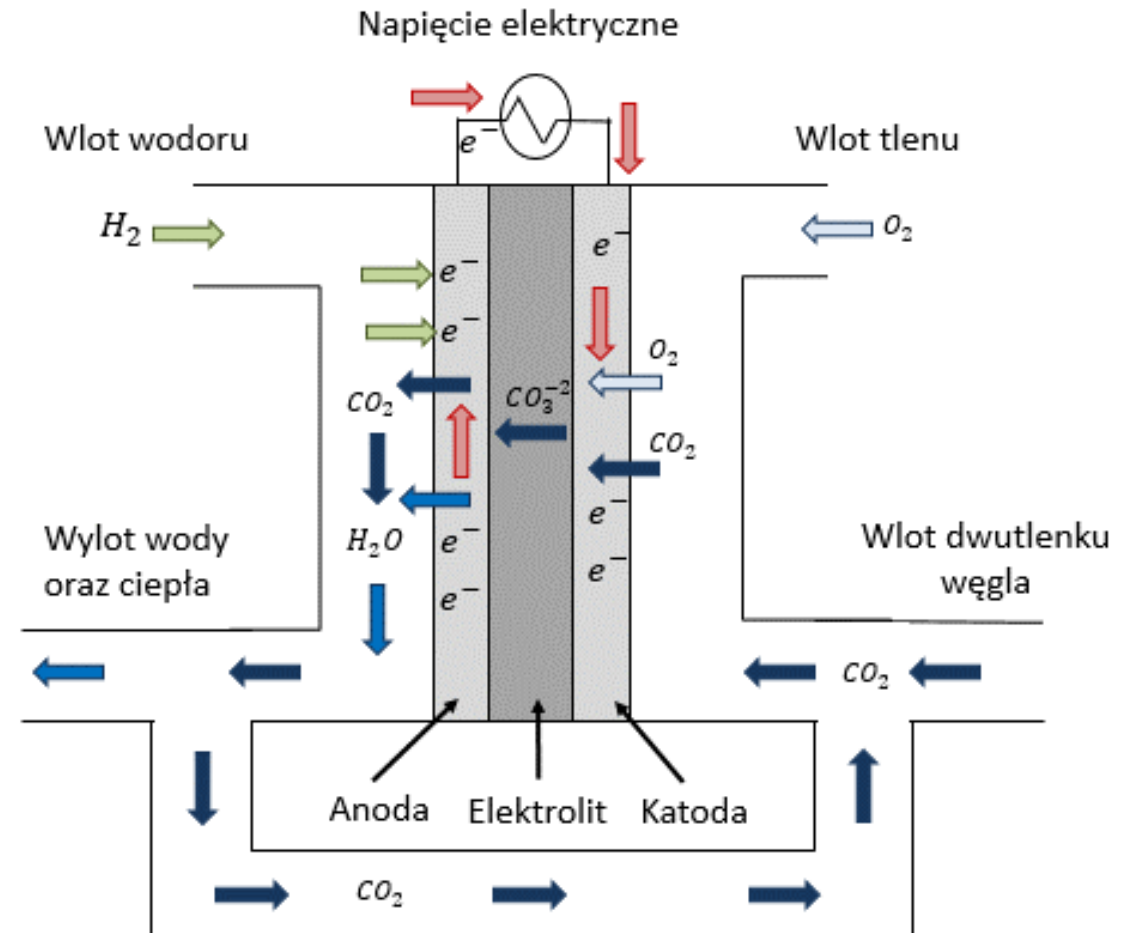


# Ogniwa z kwasem fosforowym



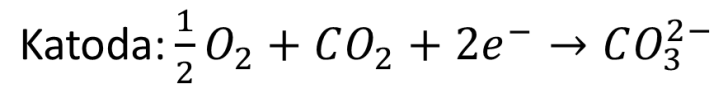
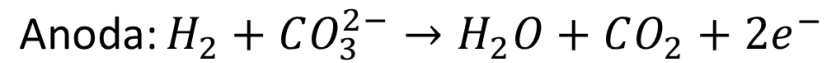
# Ogniwa ze stopionym węglanem

- PAFC – Molten Carbonate Fuel Cell
  - Temperatura pracy:  $>650^{\circ}\text{C}$
  - Paliwem jest czysty Wodór gaz ziemny, biogaz
  - Nie wymagają stosowania katalizatorów z metali szlachetnych
  - Niska trwałość
  - Sprawność elektryczna: 50-60%

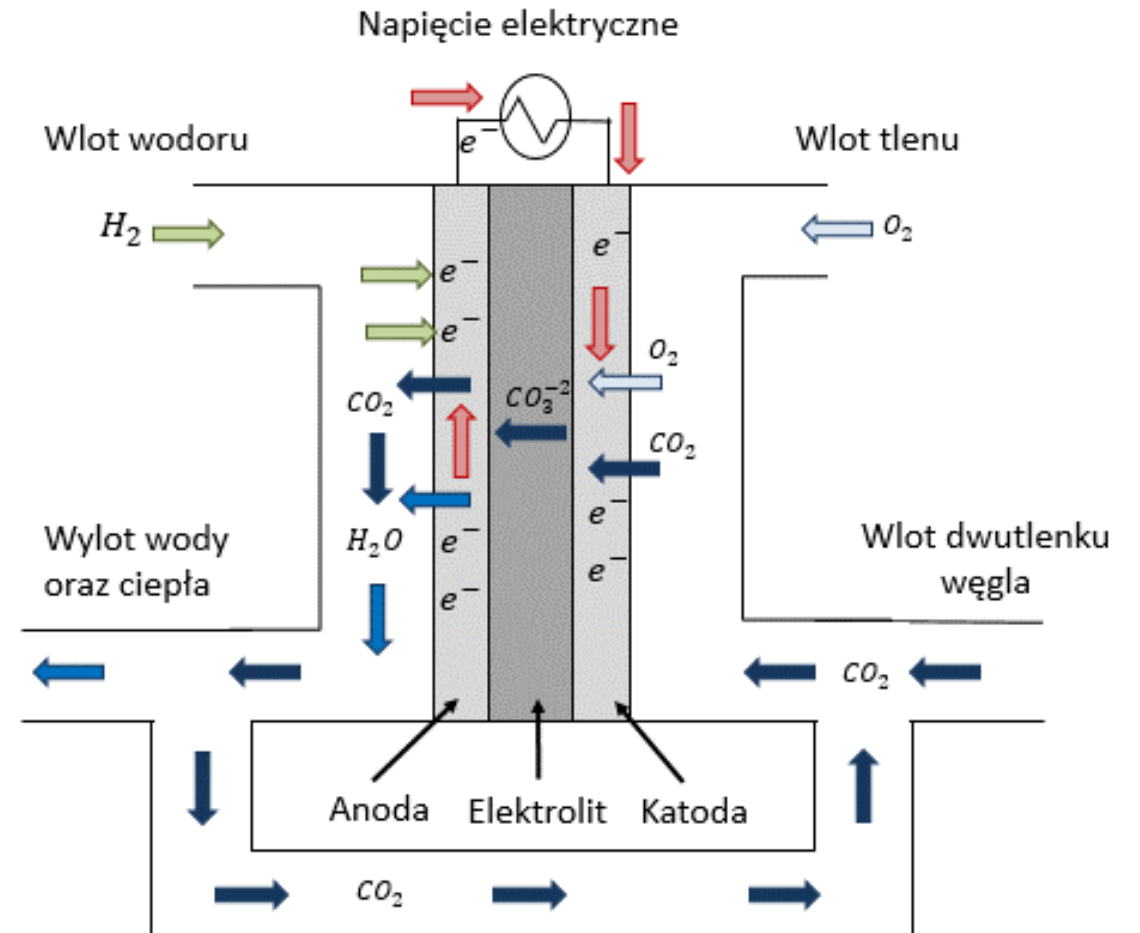
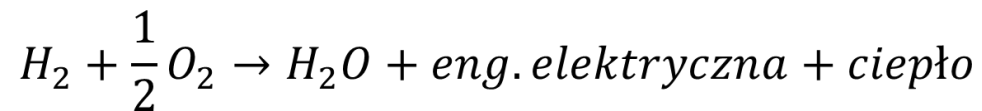


# Ogniwa ze stopionym węglanem

Reakcje:



Ogółem:

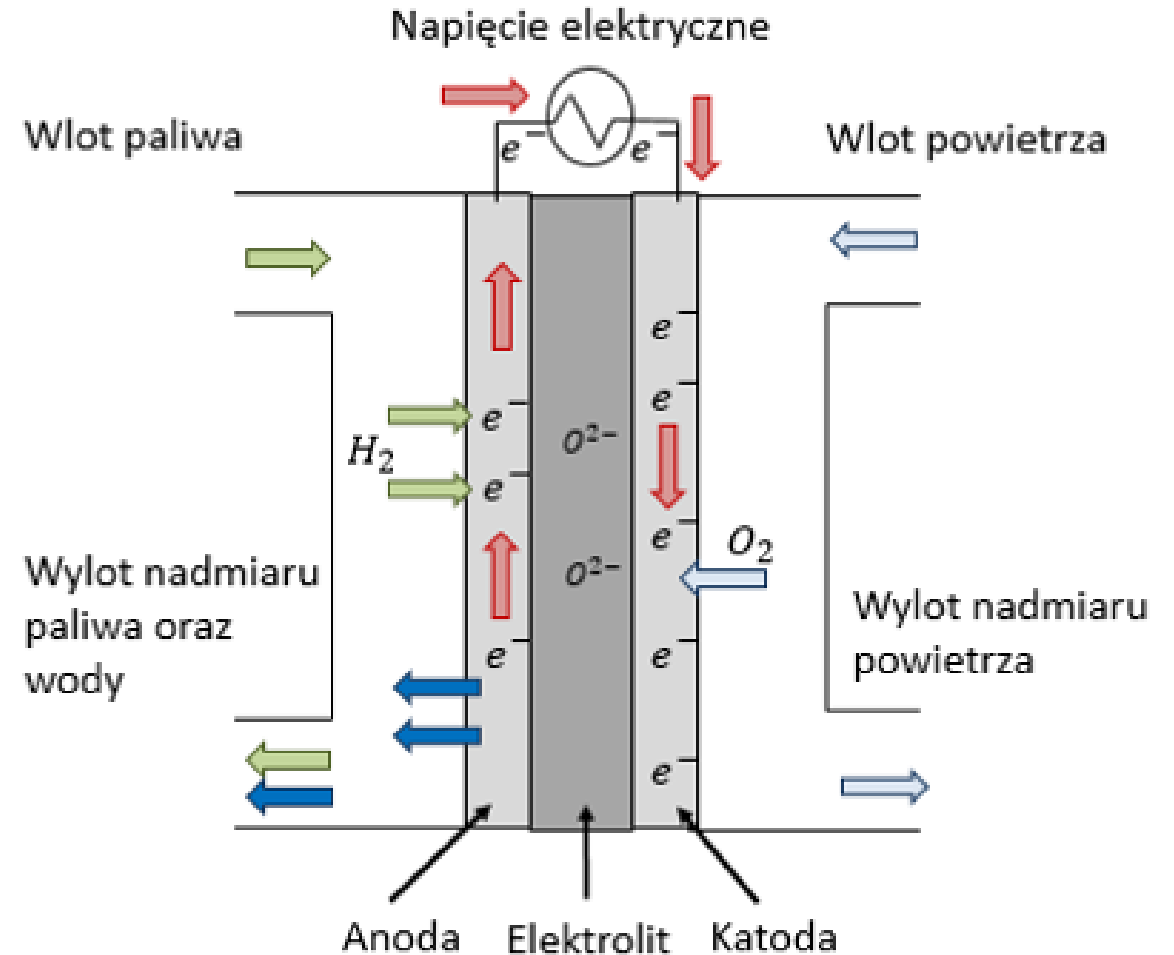


# Ogniwa ze stopionym węglanem



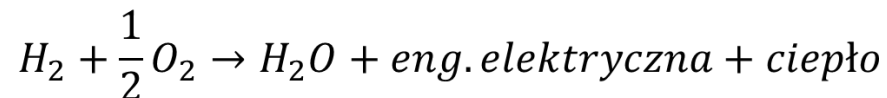
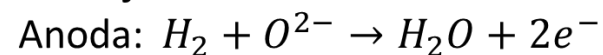
# Ogniwa tlenkowo-ceramiczne

- SOFC – Solid Oxide Fuel Cell
  - Temperatura pracy: nawet  $\geq 1000^{\circ}\text{C}$
  - podwyższona temperatura umożliwia wewnętrzny reforming paliwa
  - Nie Wymagają stosowania katalizatorów
  - Nie nadają się do transportu i małych aplikacji przenośnych
  - Sprawność elektryczna: 40-72%

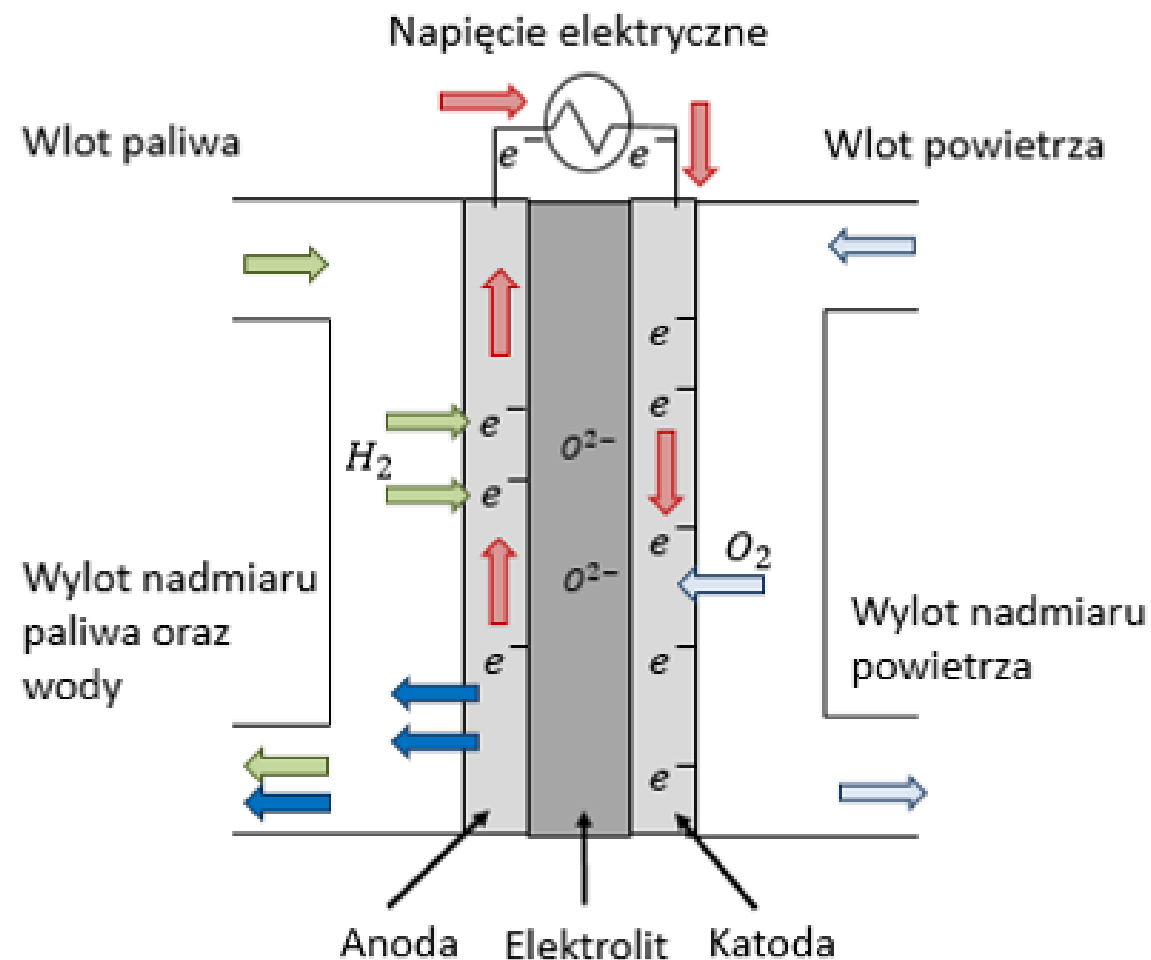
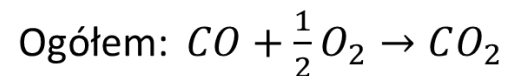
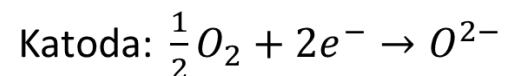
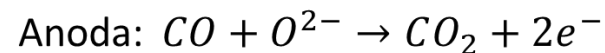


# Ogniwa tlenkowo-ceramiczne

## Reakcje:



Kiedy paliwem jest tlenek węgla:



# Ogniwa tlenkowo-ceramiczne



**fuelcellenergy**

**200 kW SOFC System Factory Testing**



➔ 200 kW system installed at FCE's Danbury, CT Test Facility. Factory Acceptance Testing is underway.

Typ ogniwa	AFC	PEM	DMFC	PAFC	MCFC	SOFC
Temperatura	90-100°C	50-100°C	60-200°C	150-200°C	600-700°C	600-1000°C
Elektrolit	wodorotlenek potasu	membrana polimerowa	membrana polimerowa	kwasy fosforowy	stopiony węgiel	stały tlenek
Zakres mocy	od 1 do 100 kW	od 1 do 100 kW	od 1 do 100 kW	0,2 do 10MW	0,5 do 10MW	1kW do 10MW
Paliwo	Najczystszy H <sub>2</sub>	Czysty H <sub>2</sub>	CH <sub>3</sub> OH+H <sub>2</sub> O	H <sub>2</sub> , COCH <sub>3</sub> OH	H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub>	H <sub>2</sub> , CO <sub>2</sub> CH <sub>4</sub>
Sprawność	40-55%	40-55%	50-70%	40-55%	50-60%	40-72%
Rozruch	<5min	<5min	<5min	1-4h	5-10h	5-10h
Żywotność	4000-8000h	60000h (stac.) 5000h (ruch.)	b.d.	30000-60000h	20000-40000h	<90000h
Stopień rozwoju	Początki wdrażania	Początki wdrażania	dopracowany prototyp	demonstracja	demonstracja	demonstracja
TRL	10	9	6	8	7	8

# Reformer metanolu




- Agregat do produkcji wodoru L18 firmy Methanol Reformer (H2MM Energy). Wytwarza wodór na żądanie, w miejscu użycia. Dzięki generowaniu czystego wodoru na żądanie, eliminuje koszty transportu i magazynowania. Wytwarzany wodór może spełniać normy dla ogniw paliwowych. Ma zastosowanie w mobilności i stacjonarnych systemach zasilania.

Parametr	ML18 Hydrogen Generator	LBEX-P2K
Technologia	Reformowanie metanolu (CH <sub>3</sub> OH + H <sub>2</sub> O)	PEM elektroliza wody
Produkcja wodoru	9.8 kg/h (235 kg/dzień)	0.0447 kg/h (44.7 g/h)
Czystość wodoru	>99.97% (bez oczyszczacza)	99.97–99.99% (do 99.999% z oczyszczaczem)
Zużycie energii elektrycznej	≈ 2 kW przy produkcji, max 7 kW	<2.5 kW
Paliwo / surowiec	Mieszanka metanolu (62.5%) i wody dejonizowanej	Woda destylowana typu I (ASTM)
Zużycie surowca	132 L/h (ok. 2.2 L/min)	0.4 L/h
Ciśnienie wyjściowe wodoru	do 1.7 bar(a)	regulowane: 0–5 barg
Wymiary (D×S×W)	2080×879×1380 mm	767×450×725 mm
Waga	1500 kg	100 kg
Zakres temperatur pracy	5°C – 45°C	15°C – 35°C
Czas rozruchu	Zimny: do 12 h; gorący: <30 min do pełnej wydajności	10 minut
Zanieczyszczenia w spalinach	CO: <300 ppm, NO <sub>x</sub> : 0, SO <sub>x</sub> : 0	Brak spalin (proces bezemisyjny)

# Polska strategia wodorowa

- realizacja inwestycji mających na celu zapewnienie 2 GW mocy zainstalowanej, instrumentów do produkcji niskoemisyjnego wodoru
- budowa infrastruktury potrzebnej do rozwoju transportu wodorowego, w tym budowa 32 stacji uzupełniania wodoru do 2025 roku
- „uwodornianie” miejskiego transportu, dopilnowując, by po ulicach polskich miast do 2030 roku jeździło minimum 800 autobusów zasilanych wodorem
- stworzenie minimum 5 dolin wodorowych, zrzeszających instytucje i przedsiębiorców zlokalizowanych w konkretnych regionach, w celu wspólnego rozwijania gospodarki wodorowej

 Ministerstwo  
Klimatu i Środowiska

Załącznik do uchwały nr 149 Rady Ministrów  
z dnia 2 listopada 2021 r. (poz. 1138)

## POLSKA STRATEGIA WODOROWA DO ROKU 2030 Z PERSPEKTYWĄ DO ROKU 2040

Warszawa, październik 2021 r.

# Doliny wodorowe

- regionalne ekosystemy gospodarcze skoncentrowane na produkcji, magazynowaniu, dystrybucji i wykorzystaniu wodoru jako źródła energii
- integracja przedsiębiorców i instytucji za pomocą tworzenia dolin wodorowych

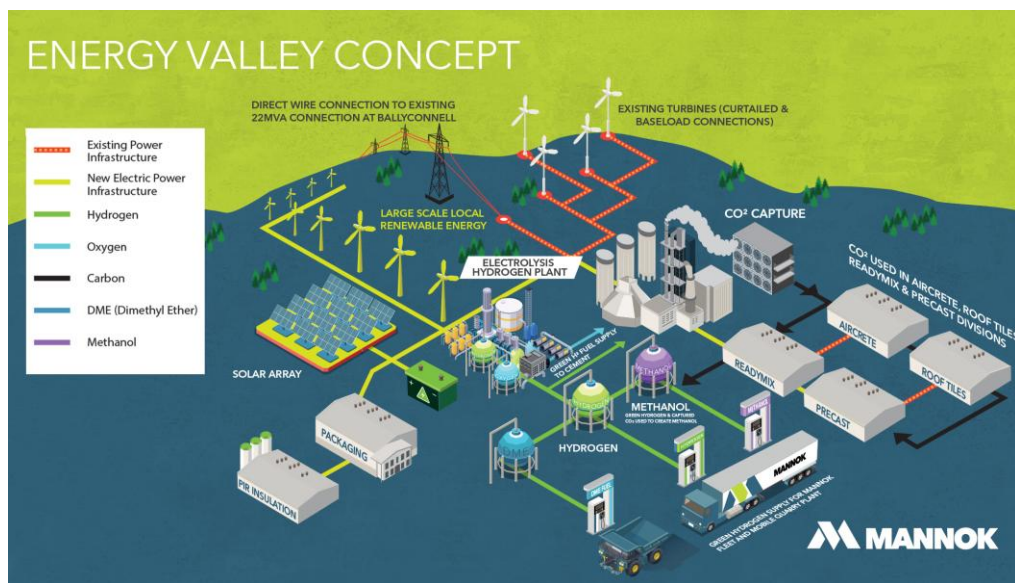


Table 1 (continued)

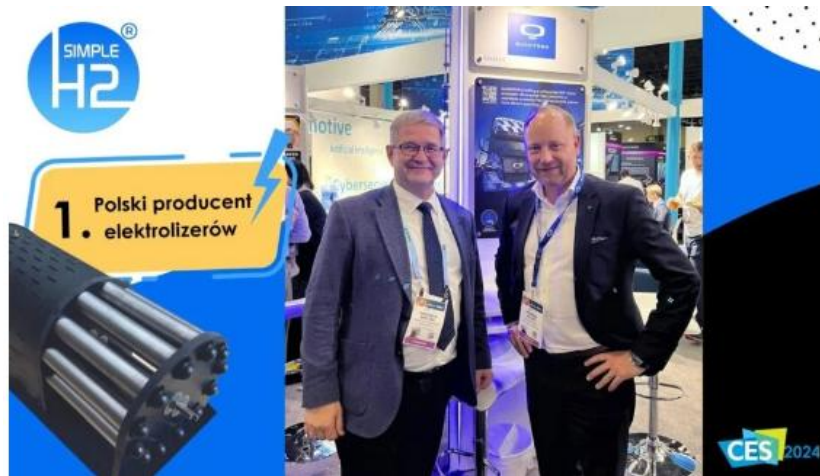
Valley Name	Location	City/Region	Lead Developer	Estimated final production (tn/y)	Investment Volume (M€)	Status	Ref.
Hydrogen Valley South Tyrol	Italy	Bolzano	IIT - Institut für Innovative Technologien Bozen	90	55	N.A.	[115, 116]
HYPER - Hydrogen Partnership for Energy & Resilience	Italy	Livorno	PPP: Port Authority + private stakeholders	N.A.	N.A.	Feasibility study on-going	[117]
FH2R	Japan	Fukushima	NEDO - New Energy and Industrial Technology Development Organization	200	N.A.	N.A.	[118, 119]
Djewels	Netherlands	Delfzijl	HyCC, Gasunie	3000	N.A.	pre-FID	[120, 121]
Europe's Hydrogen Hub: H2 Proposition Zuid-Holland/ Rotterdam	Netherlands	Zuid-Holland	Port of Rotterdam	1160700	1000	N.A.	[122, 123]
H2-Fifty	Netherlands	Rotterdam	HyCC and bp (joint venture)	20000-30000	N.A.	pre-FID	[124, 125]
HEAVENN	Netherlands	Groningen	New Energy Coalition	36500	2800	Post-FID	[126, 127]
Hydrogen Delta	Netherlands	Middelburg	Smart Delta Resources	65000	N.A.	N.A.	[128, 129]
Hydrogen Hub Noord-Holland	Netherlands	Zaandam	Program office North Sea Canal Area	506500	5247.99	pre-FID	[130, 131]
H2 Valley Mid-Norway	Norway	Trondheim	RENERGY Cluster	20000	150	pre-FID	[132, 133]
Hydrogen Hub Agder	Norway	Vagsbygd	Everfuel and Greenstat	8760	N.A.	pre-FID	[134]
Green Hydrogen & Chemicals Oman	Oman	N.A.	ACME Group	N.A.	N.A.	N.A.	[135]
Amber Hydrogen Valley	Poland	Gdynia	PKN Orlen S.A.	4000	Private Funding	pre-FID	[136]
Aveiro Green H2 Valley	Portugal	Oliveira do Bairro	Smartenergy	5700	N.A.	Feasibility study on-going	[137]
Galileu Green H2 Valley	Portugal	Alhandra	Smartenergy	N.A.	N.A.	N.A.	[138]
MadoquaPower2X (Sines Energy Hub)	Portugal	Sines	Madoqua Renewables Holding	50000	1000	pre-FID	[139]
Sines Hydrogen Valley	Portugal	Sines	N.A.	N.A.	1500	N.A.	[140]
Green Hydrogen @ Blue Danube	Romania	Mereni	Verbund AG	80300	5000	Project concept developed	[141]
Black Horse	Slovakia, Czech Republic, Hungary, Poland	Kosice	Bioway	N.A.	5800	N.A.	[142]
Neom Green Hydrogen	Saudi Arabia	Neom	Enowa - Hydrogen and Green fuels business unit	1000	40000	Under construction	[143]
Basque Hydrogen Corridor BH2C	Spain	Muskiz	Petronor (Repsol Group)	39679	1383	pre-FID	[144, 145]
BenortH2	Spain	Amorebieta-Etxano	Hy.Five Hydrogen S.L.	20000	300	Feasibility study on-going	[146, 147]
Green Crane (Western route)	Spain	La Robla	Enagás Renovables	N.A.	1470	Project concept developed	[148]
Green Hysland	Spain	Mallorca	Enagás	300	50.0	Fully operational	[149, 150]
Mid Sweden Hydrogen Valley	Sweden	Gävleborg	Chamber of commerce, Mid Sweden, Region Gävleborg	N.A.	N.A.	Under construction	[151]
South Marmara Hydrogen Shore - HYSouthMarmara	Turkey	Edincik	South Marmara Development Agency	500	36.81	N.A.	[152]
H2U Hydrogen Valley	Ukraine	Reni	Hydrogen Ukraine, LLC	210000	N.A.	Feasibility study on-going	[153]
BIG HIT	United Kingdom	Shapinsay	Foundation for the development of new hydrogen technologies in Aragon	50	13.5	N.A.	[154, 155]
HyNet North West	United Kingdom	Elton	Progressive Energy	N.A.	5000	pre-FID	[156, 157]
Advanced Clean Energy Storage Project	United States	Salt Lake City	Mitsubishi Power and Magnum Development	N.A.	N.A.	N.A.	[158]
SoHyCal	United States	Central California	H2B2 Electrolysis Technologies	1020	4	Fully operational	[159, 160]
Wyoming Clean Power Center (WCPC)	United States	South central wyoming	The Anschutz Corporation	N.A.	840	N.A.	[161]

# Polski Ekosystem Innowacji Dolin Wodorowych



# Planowane projekty w Polsce

1. W konkursie „IPCEI wodorowy” realizowanym przez NCBR wyłoniony został projekt spółki Synthos Dwory 7, która uzyskała dofinansowanie w wysokości 105 mln zł. Synthos zamierza opracować dwie prototypowe technologie – wysokotemperaturowy termochemiczny cykl rozkładu wody Cu-Cl (TWSC) i elektrolizer stałotlenkowy (SOE), a następnie wybierze jedną z nich do budowy demonstracyjnej instalacji wytwarzania wodoru na skalę przemysłową o wydajności 1400 ton rocznie, sprawności energetycznej układu powyżej 55% oraz koszcie wytworzenia kilograma wodoru poniżej 5€.



2. Polska marka Simple H2 produkująca elektrolizery PEM zaprezentowała je na CES 2024 – największych na świecie targach elektroniki oraz nowych technologii odbywających się corocznie w Las Vegas.



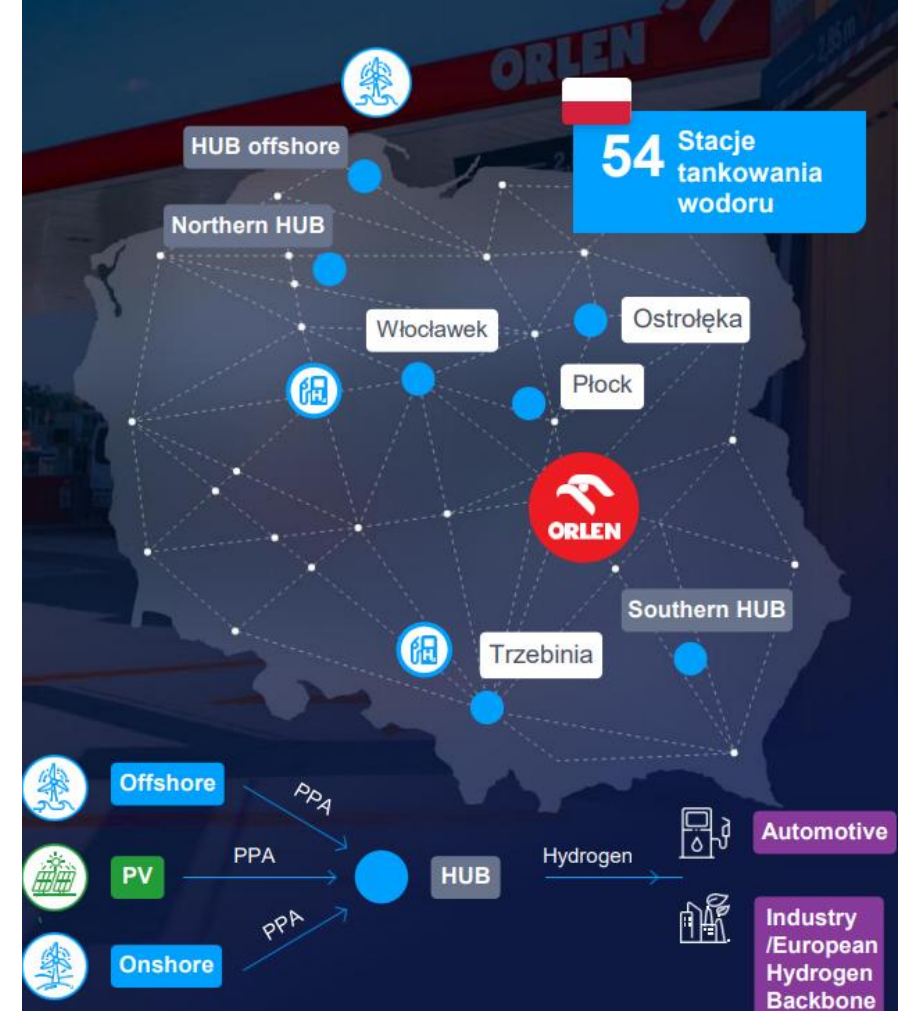
3. Grupa Orlen prezentuje koncepcję stworzenia kompleksu energetycznego na pomorzu, w pobliżu budowanej elektrowni jądrowej. Projekt zakłada powstanie modułowego elektrolizera o mocy 100-300 MW, zasilanego energią pochodzącą z elektrowni wiatrowej na Bałtyku (Baltic Power), a także wytwarzanie paliw syntetycznych i magazyny energii. Szacunkowy koszt inwestycji to 30 mld zł.

# Tankowanie i pojazdy wodorowe w Polsce



Stacja Neso

- Pod koniec 2022 r.: 814 stacji tankowania wodoru na świecie, 254 w Europie, z czego 105 w Niemczech.
- Powstały już pierwsze ogólnodostępne stacje wodorowe w Polsce marek Neso (Warszawa, Rybnik, Konin), Orlen (Poznań, Kraków) i SOLBET (Solec Kujawski).
- Planowane są kolejne inwestycje (m.in. Gdańsk, Gdynia, Wrocław, Lublin, Katowice).
- Na koniec września 2025 roku w Polsce zarejestrowanych było 530 osobowych samochodów wodorowych (FCEV) oraz 108 autobusów wodorowych.

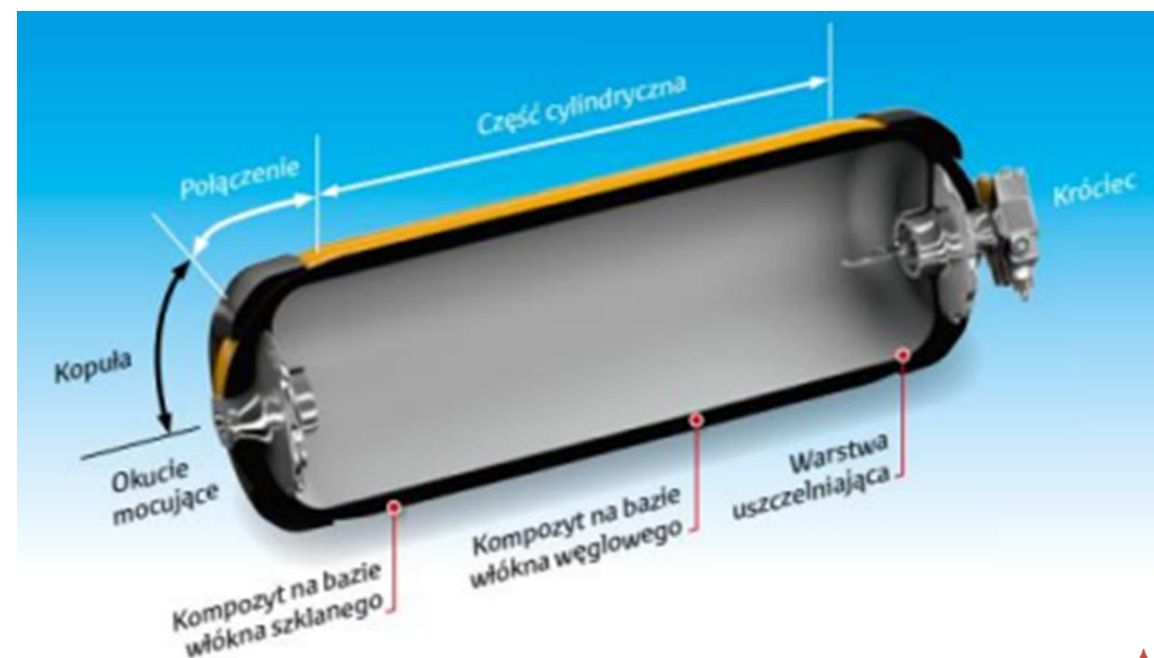


Projekt Hydrogen Eagle

# Budowa i rozmieszczenie zbiorników



Wodór w zbiornikach przechowywany jest pod ciśnieniem 700 bar



# Hydrogen Eagle



- budowa łańcucha Hubów wodorowych na terenie Polski oraz Czech i Słowacji
- dystrybucja wyprodukowanych przez siebie 50 000 ton wodoru do 2030 roku
- budowa 54 stacji uzupełniania wodoru na terenie Polski
- Energia wykorzystywana do produkcji wodoru miałaby pochodzić między innymi ze źródeł odnawialnych, w tym z instalacji morskich farm wiatrowych

# Wodór przyszłością elektromobilności?

PESA Bydgoszcz wyprodukowała pierwszą w Polsce lokomotywę wodorową.



NesoBus planuje produkcję ok. 100 autobusów wodorowych rocznie, o zasięgu do 450 km.



Solaris wyprodukował ok. 200 autobusów wodorowych o zasięgu do 350 km.

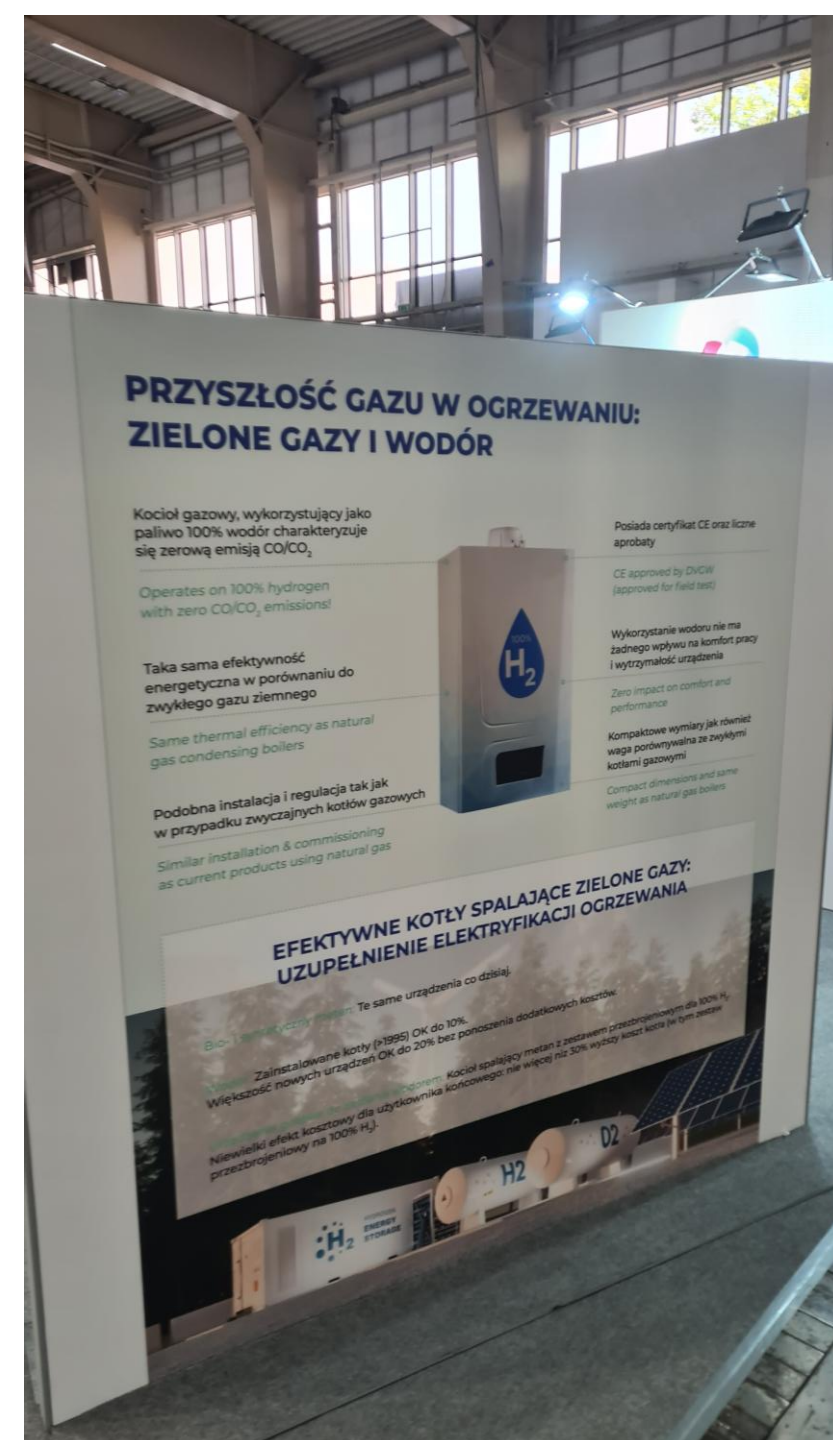


# Kotły gazowe H2 Ready



<https://dedietrich.pl/blog/kotly-gazowe-h2-ready-co-warto-wiedziec-o-ogrzewaniu-wodorem/>

<https://www.youtube.com/watch?v=k3losOaS1PQ>



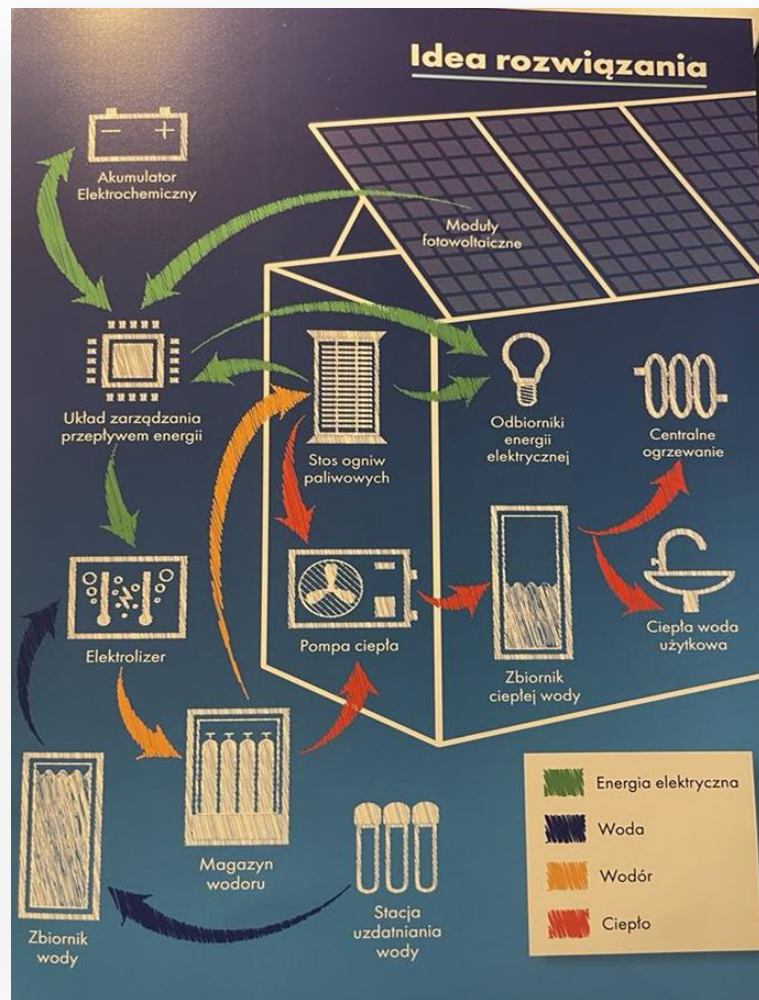
# Dom H2

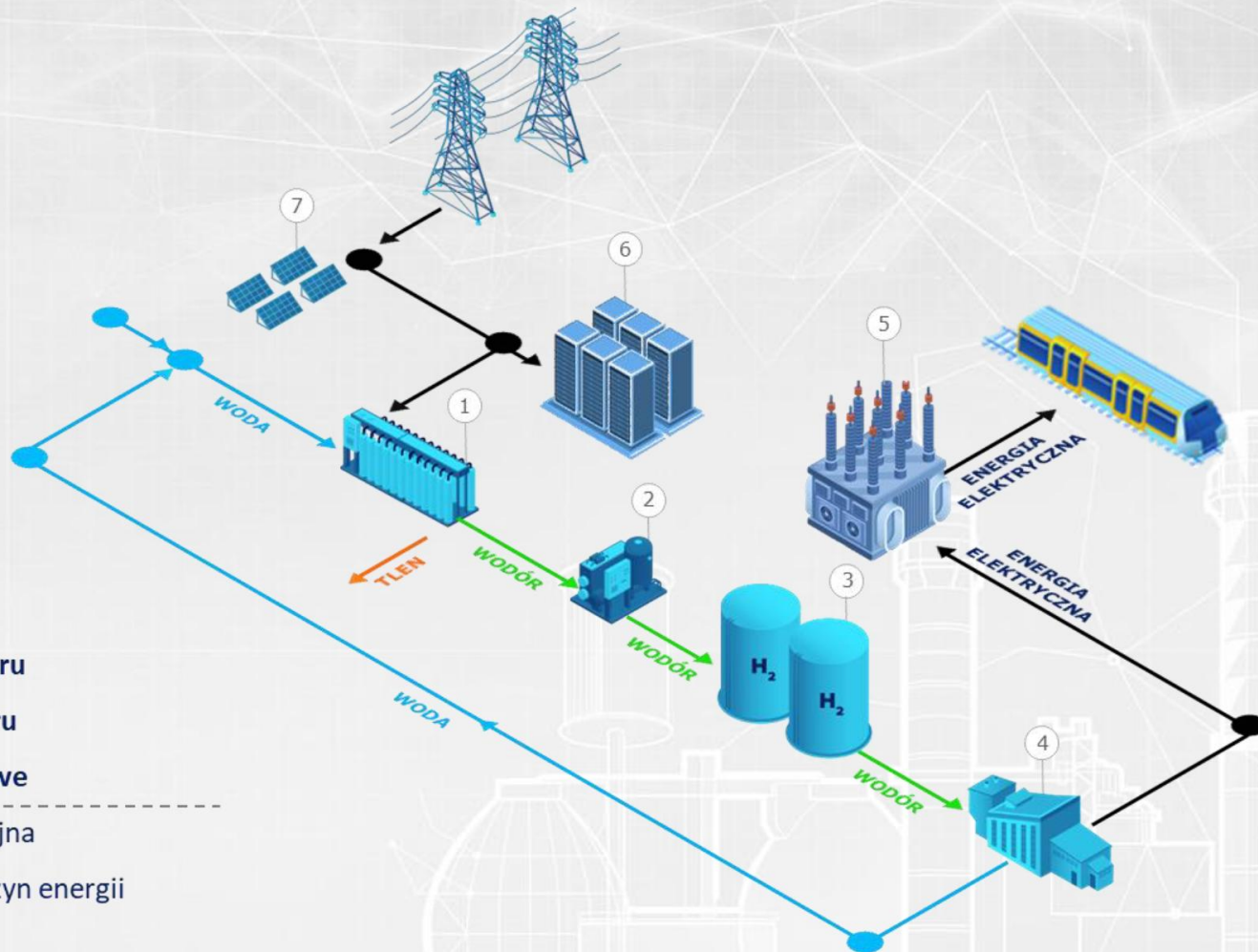
Projekt AGH Kraków +ZE PAK SA + PAK SERWIS Konin

- Część technologiczna:
  - Moduły PV
  - Elektrolizer
  - Magazyn wodoru
  - Ogniwu paliwowe
  - Akumulatory elektrochemiczne
  - Układ zarządzania przepływem energii i sterowania odbiorami
  - Przyłącze wodno-kanalizacyjne
- Część mieszkalna:
  - Aneks kuchenny
  - Pokój wypoczynkowy
  - Rozkładany podest/taras



# Dom H2





1. Elektrolizer
2. Sprężarka wodoru
3. Magazyn wodoru
4. Ogniw paliwowe
- 
5. Podstacja trakcyjna
6. Baterijny magazyn energii
7. Farma PV

Zabudowa Kontenerowa przystosowana do eksploatacji w zakresie temperatur  $-29^{\circ}\text{C}$  do  $+50^{\circ}\text{C}$ .

## ELEKTROLIZER

Parametr	Wartość
Typ	AEM
Nominalna wydajność	7.5 Nm <sup>3</sup> /h $\approx$ 0.63kg/h
Nominalna moc	36 kW
Liczba i moc modułów	15 x 2.4 kW
Nominalne ciśnienie	30 bar
Zapotrzeb. na wodę	$\sim$ 6 L/h

## MAGAZYN WODORU

Parametr	Wartość
200 bar	
Całkowita pojemność	23 kg*
Max. ciśnienie wodoru	200 bar
Liczba butli w zestawie	16 x 0.05 m <sup>3</sup>

## SPRĘŻARKA

Parametr	Wartość
Max. strumień wodoru	7 Nm <sup>3</sup> /h $\approx$ 0.63kg/h
Ciśnienie ssania	30 bar
Max. ciś. na wylocie	200 barg

## OGNIWA PALIWOWE

Parametr	Wartość
Nominalna moc	20 kW <sub>e</sub>
Liczba i moc stosów	5 x 4kW
Sprawność przy mocy nominalnej	> 45%

SUW



ELEKTROLIZER



H<sub>2</sub> OSUSZACZ



SPRĘŻARKA



OGNIWO  
PALIWOWE



MAGAZYN H<sub>2</sub>



KOMPAKTOWE  
ROZWIĄZANIE



KOMPAKTOWE  
ROZWIĄZANIE



# Przykład elektrolizera

- Elektrolizer typu PEM wraz z niezbędną infrastrukturą techniczną na terenie zakładu produkcyjnego **Promet-Plast** w Energetycznym Klastrze Oławskim zasilany energią elektryczną z farmy wiatrowej.
- Moc 5MW, produkcja nominalna 1000 Nm<sup>3</sup>/h (90 kg/h).
- Układ sprężania wodoru do ciśnienia 500 bar oraz magazyn wodoru w zabudowie kontenerowej o pojemności 35m<sup>3</sup>.
- Wyprodukowany wodór docelowo ma być podawany do układu trigeneracyjnego, gdzie w wyniku spalania paliwo wytwarzana jest energia elektryczna oraz energia cieplna i chłód przeznaczone do zasilania hali produkcyjnej
- Planowane jest zbudowanie stacji tankowania wodoru wyposażonej w 3 dystrybutory (700 i 2 x 350 bar), co pozwoli na tankowanie pojazdów różnego typu (samochody osobowe, ciężarowe, autobusy, wózki widłowe, itp.).
- W fazie testów, planowane zakończenie inwestycji 31.03.2025 r.
- Aktualnie zaobserwowanymi problemami są: powstawanie kwasu solnego, chlor, zagęszczanie oraz brązowe zabarwienie wody, a także wysokie koszty odprowadzania ścieków.





SOL ENERGY

plu

Green Hydrogen  
at Work™

13112

Dziękuję za uwagę!