

*XVII Konferencja
Naukowo-Techniczna*

**„Zintegrowany transport publiczny
w obsłudze miast i regionów”
PublicTrans 2023**



**Analiza możliwości technicznych
wdrożeń różnych źródeł
przechowywania wodoru do
pojazdów kołowych i szynowych**

Zakopane 25-27.10.2023

dr hab.inż. Jacek Gębicki, prof. PG
Centrum Technologii Wodorowych
Politechniki Gdańskiej



Kategoria	Typ paliwa
Alternatywne paliwa kopalne w fazie przejściowej	Gaz ziemny w formie gazu (CNG) lub skroplonej (LNG) Skroplony gaz płynny (LPG) Syntetyczne oraz parafinowane paliwa wyprodukowane z udziałem energii nieodnawialnej
Paliwa alternatywne dla pojazdów zero-emisyjnych	Elektryczność Wodór Amoniak
Paliwa ze źródeł odnawialnych	‘biomass fuels’ – gazowe oraz stałe paliwa z biomasy ‘biofuels’ – ciekłe paliwa wyprodukowane z biomasy np. hydrrorafinowany olej roślinny (HVO) wytwarzany z olejów roślinnych i tłuszczów zwierzęcych do pojazdów z silnikiem wysokopiętnym

Sektory zastosowania wodoru 3/3



Lekki transport kołowy

- Lekkie pojazdy kołowe zasilane wodorem (m.in. samochody osobowe, małe samochody dostawcze) są technologicznie opanowane i stopniowo komercjalizowane.
- Niezbędny rozwój infrastruktury tankowania wzdłuż sieci TEN-T w całej UE (zgodnie z AFIR).
- Ten rodzaj transportu będzie bezpośrednio konkurował z napędami bateryjnymi w szczególności w Unii Europejskiej (BEV vs. FCEV).
- Użycie paliw syntetycznych w perspektywie średnio/długoterminowej w lekkim transporcie kołowym może pozwolić wykorzystać obecną infrastrukturę i być alternatywą dla wodoru sprężonego/skroplonego.

Komercjalizacja zastosowania RFNBO

2025

TRL

8-9



Ciężki transport kołowy

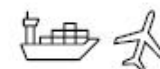
- Ciężkie pojazdy kołowe (ciężarówki, autobusy, kolej) mogą być bezpośrednio elektryfikowane z użyciem napędów bateryjnych jednak zastosowanie paliw RFNBO może okazać się korzystniejszym rozwiązaniem ekonomicznym i logistycznym w wybranych przypadkach.
- Napędy bazujące na wodorze lub pochodnych mogą być korzystniejsze w przypadku długich dystansów, konieczności ciągłej pracy (krótkie tankowanie), a także maksymalizacji dopuszczalnej masy przewożonego towaru.
- Dostęp do infrastruktury tankowania w UE może być kluczowym aspektem rozwoju zastosowania paliw RFNBO w tym sektorze.

Komercjalizacja zastosowania RFNBO

2025 - 2030

TRL

7-8



Transport morski i lotniczy

- Zarówno transport morski jak i lotniczy są sektorami trudnymi do elektryfikacji.
- Aby doprowadzić do dekarbonizacji tych sektorów w pierwszej kolejności (przejściowo) wykorzystywane będą paliwa pochodzenia biologicznego (np. zużyte oleje roślinne).
- W perspektywie średnio i długoterminowej pełna dekarbonizacja transportu morskiego i lotniczego może zostać zrealizowana z wykorzystaniem pochodnych wodoru m.in. odnawialnego amoniaku, odnawialnego metanolu i paliw syntetycznych (np. e-kerozyna).
- Pierwsze projekty zastosowania paliw RFNBO w tych sektorach transportu są już realizowane.
- Sektor lotniczy jest w EU ETS, a transport morski zostanie włączony do tego systemu od 2024 r.

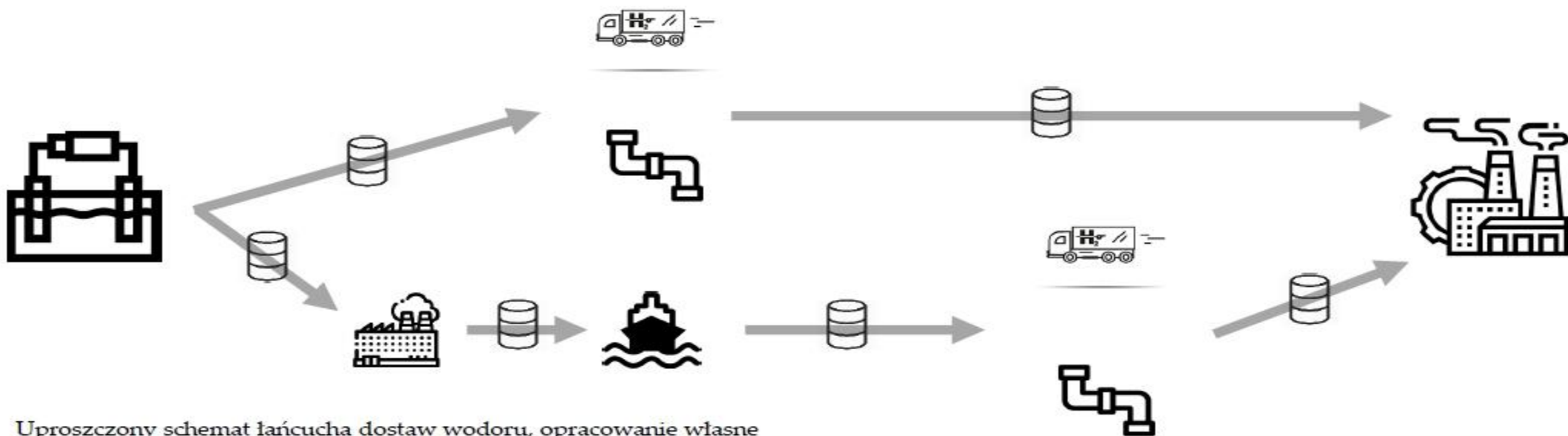
Komercjalizacja zastosowania RFNBO

2030-2035

TRL

6-7

Magazynowanie w łańcuchu dostaw wodoru



Uproszczony schemat łańcucha dostaw wodoru, opracowanie własne

Przykładowe metody magazynowania wodoru w zależności od stanu skupienia

Forma gazowa			Forma ciekła			Forma stała	
Skompresowany wodór	Syntetyczne węglowodory		Ciekły wodór	Hybrydy chemiczne	LOHC	Wodorki metali	Materiały porowate
	Skompresowany metan / SNG						
	Ciekły SNG			Amoniak	MCH	Borowodorek	Grafen
	Syntetyczna benzyna			Metanol	DBT	Stopy typu-AB	Aerożel węglowy
	Syntetyczny diesel			Izopropanol	Benzen	Wodorek glinu	Nano rurki węglowe



Magazynowanie chemiczne wodoru - amoniak

Amoniak:

Gęstość w postaci ciekłej 610 kg/m³

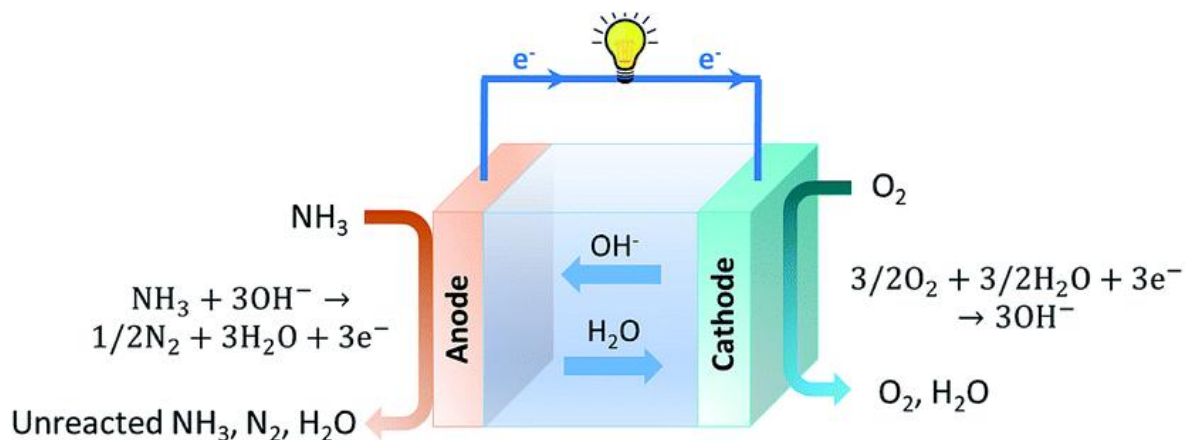
Stan ciekły w 20 °C i około 9 bar



6 kg wodoru z 34 kg amoniaku

Uznawany za najkorzystniejszy związek chemiczny do magazynowania i transportu

Roczna światowa produkcji około 150 mln ton rocznie





Magazynowanie chemiczne wodoru - metanol

Metanol:

Gęstość ciekłego metanolu: 792 kg/m³; benzyna 720-775 kg/m³

Reforming metanolu: $\text{CH}_3\text{OH} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow 3\text{H}_2 + \text{CO}_2$

6kg wodoru z 32 kg MeOH 18,8% kg H₂/kgMeOH => **14,9% kgH₂/m³ MeOH**

Zastosowanie:

- jako rozpuszczalnik w syntezie organicznej
- w farmaceutyce, przemyśle barwników, tworzyw sztucznych, włókien syntetycznych
- jako paliwo lub składnik paliwa w silnikach spalinowych (samoloty, motocykle żużlowe, monster trucki, modelarskie silniki żarowe) i ogniwach paliwowych DMFC
- w produkcji materiałów wybuchowych, estrów metylowych, formaldehydu, kwasu mrówkowego, polioksymetyleny (politrioksan, poliformaldehyd, tarnoform), MTBE

Światowa produkcja:

111 mln ton rocznie



Etery dimetylowy DME

Gęstość ciekłego DME: 735 kg/m³, infrastruktura jak dla LPG, zbiornik do 85%

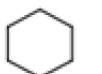
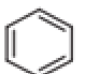
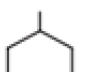
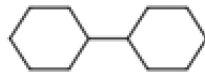
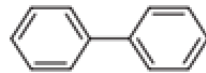
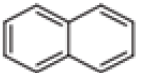
12 kg wodoru z 46 kg DME 26,1% kg H₂/kgDME → **19,2% kgH₂/m³ DME;**

CH₃-O-CH₃ + 3H₂O → 6H₂ + 2CO₂ **16,3%kgH₂/m³ zbiornika**

Zastosowanie:

- potencjalny substytut oleju napędowego, magazyn wodoru,
- substrat w przemyśle chemicznym,
- wykorzystanie w przemyśle kosmetycznym i chłodnictwie

Liquid Organic Hydrides - LOC

	H ^o	kJ/mol	kJ/mol of H ₂
 →  + 3H ₂		+ 205.9	+ 68.6
 →  + 3H ₂		+ 204.8	+ 68.3
 →  + 6H ₂		+ 399.5	+ 66.6
 →  + 5H ₂	(cis-)	+ 320.1	+ 64.0
	(trans-)	+ 333.4	+ 66.7

- 6 kg wodoru na 78 kg benzenu

- wydzielanie się innych związków organicznych

+ odnawialny nośnik

+ brak skomplikowanych procesów



- **Technologie w stopniu wymagającym niewielkich nakładów do komercjalizacji**
- **Wysoki poziom zaawansowania na każdym etapie projektowania technologii**
- **Możliwość dalszego ulepszania technologii**
- **Stosunkowo łatwe do spełnienia parametry prowadzenia procesów**
- **Szerokie zastosowanie związków magazynujących na rynku energetycznym i chemicznym – mniejsze ryzyko inwestycyjne**
- **Technologie przejściowe od gospodarki emisyjnej do nisko lub zero emisyjnej**
- **Większa dostępność aparaturowa i materiałowa**
- **Technologie przewidywalne od strony technologicznej**
- **Znacznie łatwiejszy transport i magazynowanie**



Wybrane metody magazynowanie wodoru w formie gazowej

Kawerny solne

- Wykorzystywane od lat 70 XX wieku do przechowywania wodoru;
- Niskie straty – wydajność na poziomie około 98%;
- Niskie ryzyko zanieczyszczenia przechowywanego wodoru;
- Wysokie ciśnienie umożliwia reagowanie na sytuacje rynkowe (wykorzystanie w szczytach);
- Głębokość magazynu: 300-1800 m;
- Całkowita pojemność w stosunku do wielkości kawerny: 70%;
- Ciśnienie magazynu: 35-210 barów;
- Wymagana stała objętość gazu w magazynie: 25-25%.

TRL

8-9

Pojemność magazynu

300-120.000 t H₂

Kawerny skalne

- Montaż wykładziny stalowej zapewniającej gazoszczelność;
- Wymaga kontroli ciśnienia w celu uniknięcia deformacji górotworu oraz wykładziny;
- Głębokość magazynu: ok. 1000 m;
- Całkowita pojemność w stosunku do wielkości kawerny 90%;
- Ciśnienie magazynu: 20-200 barów;
- Pilotażowa instalacja powstaje Luleå (Szwecja) na głębokości 30 m, pojemność 100 m³. Pilotaż jest częścią wdrażania redukcji żelaza za pomocą wodoru w szwedzkim przemyśle hutniczym;
- Wymagana stała objętość gazu w magazynie: 10-20%.

TRL

4-5

Pojemność magazynu

300-2.500 t H₂

Wyczerpane złoża gazu

- Ograniczona elastyczność powoduje, że ta forma magazynowania ma charakter sezonowy a nie szczytowy;
- Pozostałości gazu / ropy mogą prowadzić do reakcji chemicznej z H₂ i powstawania metanu;
- Głębokość magazynu: 300-2700 m;
- Ciśnienie magazynu: 15-285 barów;
- Na świecie prowadzono dwie instalacje pilotażowe - w Argentynie i Austrii, które łączyły magazynowanie gazu z wodorem;
- Wymagana stała objętość gazu w magazynie: 45-60%.

TRL

3

Pojemność magazynu

300-400.000 t H₂

Zbiorniki ciśnieniowe

- Występują zarówno w formie stacjonarnej (np. przy instalacjach przemysłowych), jak i w formie mobilnej (np. w transporcie intermodalnym);
- Zbiorniki wykonane z materiałów kompozytowych zmniejszają wagę całej instalacji, przy czym są droższe niż stalowe odpowiedniki;
- Ciśnienie magazynu: 150-800 barów;
- Najbardziej rozpowszechniona metoda magazynowania wodoru obecnie.

TRL

9

Pojemność magazynu

do 1,1 t H₂



Wybrane metody magazynowanie wodoru w formie ciekłej i stałej

Ciekły wodór

- Dojrzała technologia zbiornikowa działająca komercyjnie na świecie dla małej i średniej skali magazynowania;
- W odróżnieniu od części innych metod brak potrzeby zagospodarowania węgla;
- Wysokie zużycie energii w celu utrzymania wodoru w stanie ciekłym;
- Średnia możliwość zwiększania elastyczności systemu;
- Palność substancji;
- Przybliżona objętość potrzebna do zmagazynowania 100 kg wodoru: 1,41 m³.

TRL

7-9

Pojemność magazynu*

do 270 t H₂

Amoniak

- Dojrzała technologia zbiornikowa działająca komercyjnie na świecie;
- Większa skala zastosowania niż w przypadku ciekłego wodoru;
- Potrzeba przeprowadzenia rekonwersji dla odzyskania wodoru;
- Brak potrzeby zagospodarowania węgla;
- Średnie zużycie energii na potrzeby magazynowania;
- Średnia możliwość zwiększania elastyczności systemu;
- Palność substancji;
- Przybliżona objętość potrzebna do zmagazynowania 100 kg wodoru: 0,88 m³.

TRL

9

Pojemność magazynu*

do 6.000 t H₂

LOHC (MCH)

- Średni poziom gotowości technologicznej i poziomu komercjalizacji technologii zbiornikowego magazynowania;
- Potrzeba przeprowadzenia rekonwersji dla odzyskania wodoru;
- Potrzeba zagospodarowania węgla;
- Niskie zużycie energii na potrzeby magazynowania;
- Duża możliwość zwiększania elastyczności systemu;
- Palność substancji;
- Przybliżona objętość potrzebna do zmagazynowania 100 kg wodoru: 2,12 m³.

TRL

6-8

Pojemność magazynu*

do 4.750 t H₂

Wodorek glinu (f. stała)

- Średni poziom gotowości technologicznej, przy czym wykorzystanie wodoru glinu jest skomercjalizowane przemysłowo;
- Potrzeba przeprowadzenia rekonwersji dla odzyskania wodoru;
- Brak potrzeby zagospodarowania węgla;
- Niska możliwość zwiększania elastyczności systemu;
- Niepalność substancji;
- Przybliżona objętość potrzebna do zmagazynowania 100 kg wodoru: 1,04 m³.

TRL

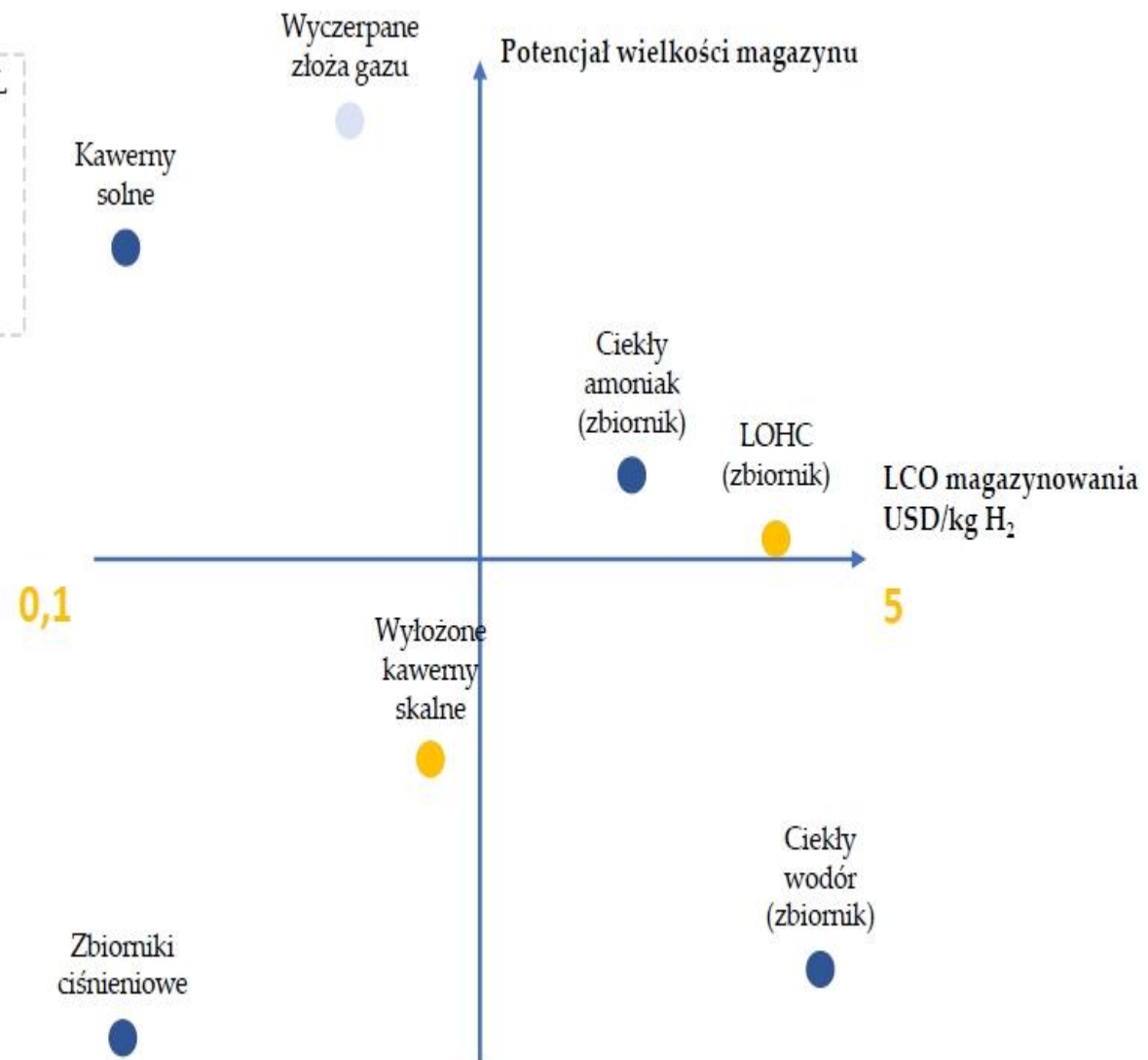
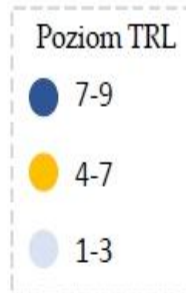
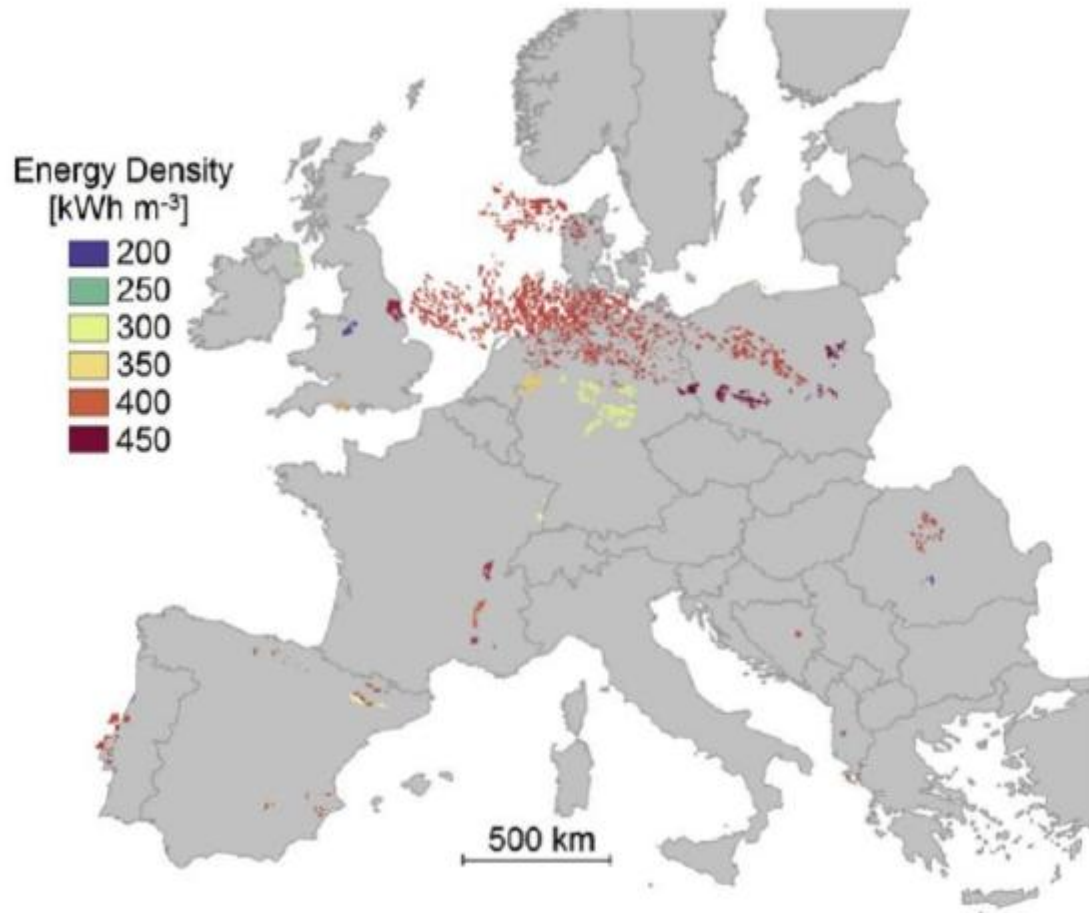
5-8

Pojemność magazynu*

poniżej 0,26 t H₂

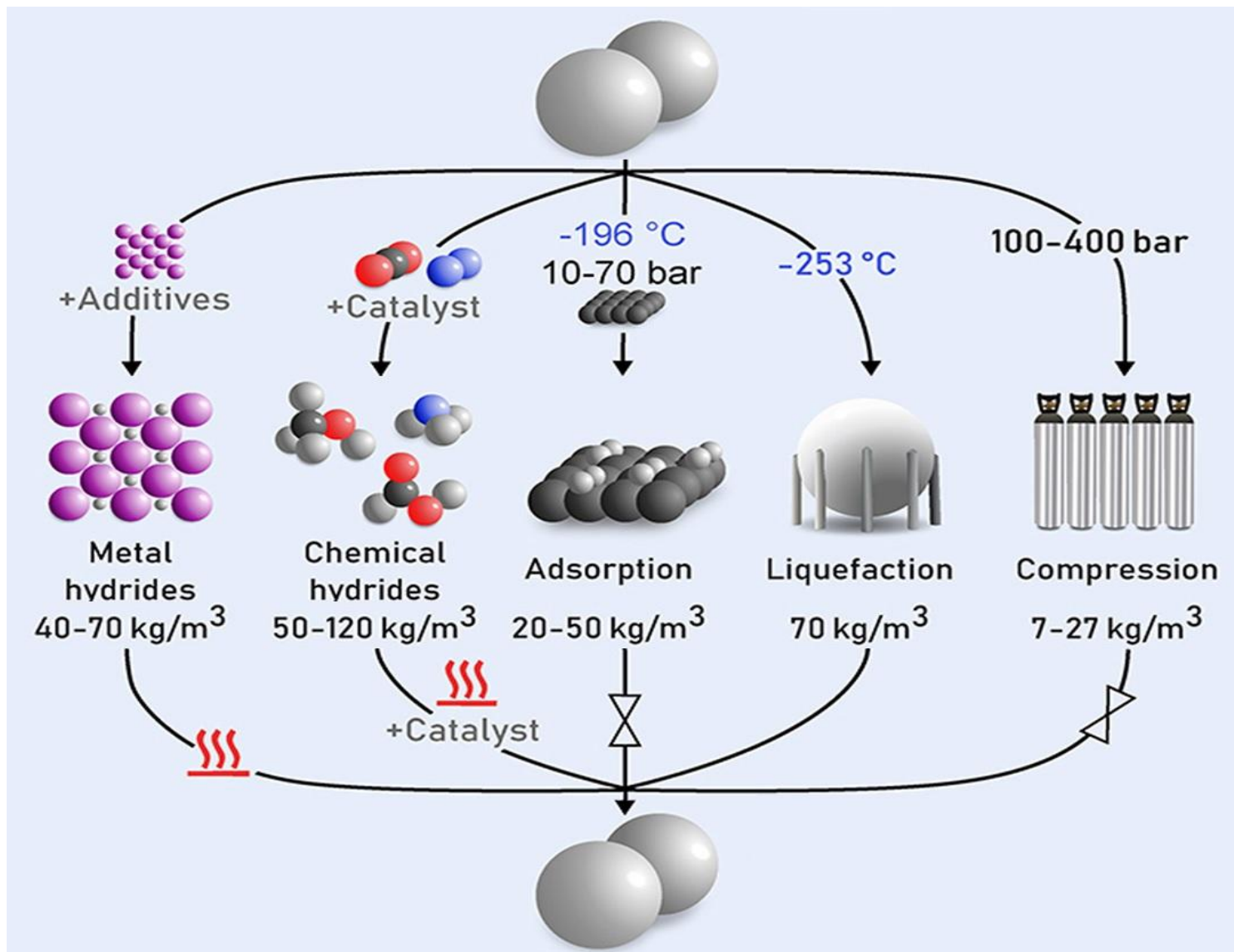


Rozkład kawern solnych o potencjale do wykorzystania
w celu magazynowania wodoru



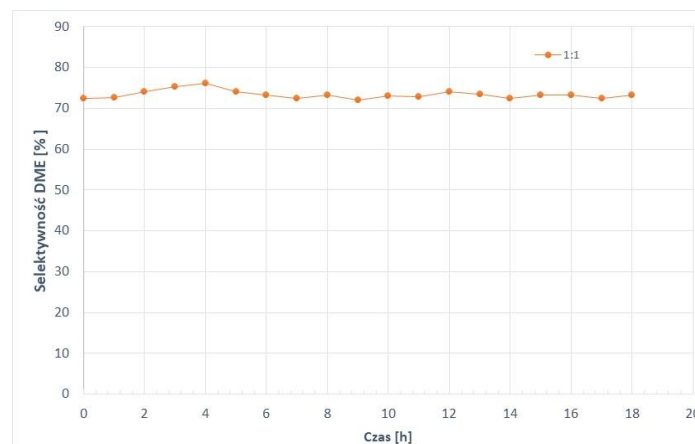
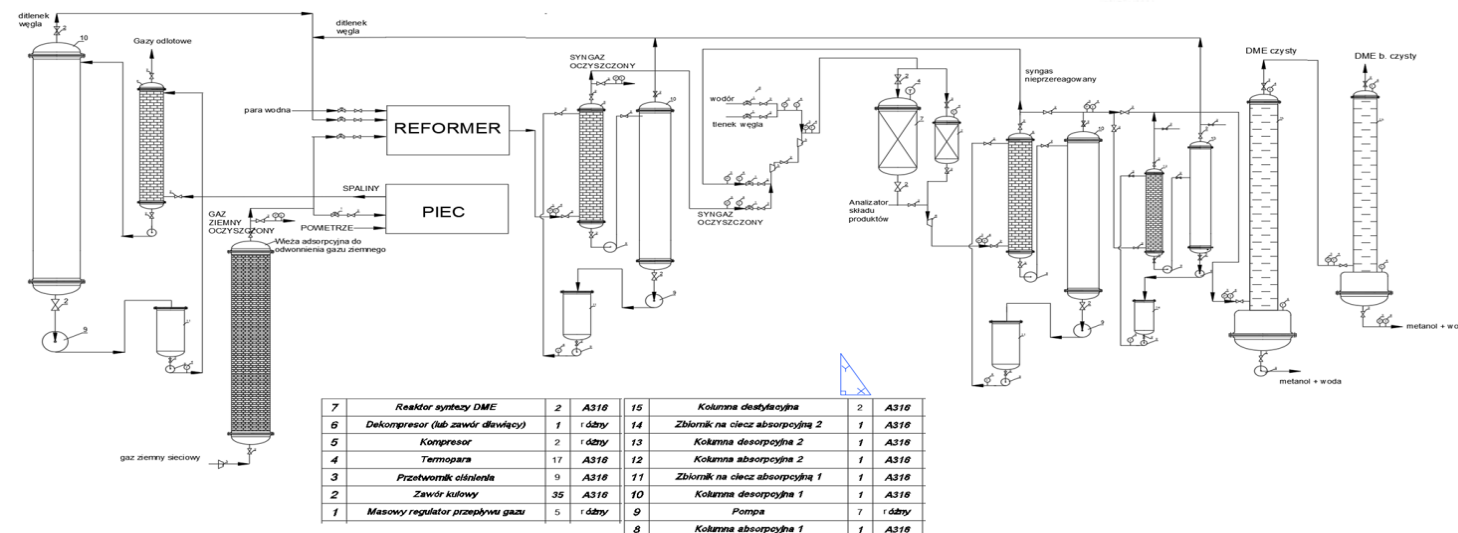
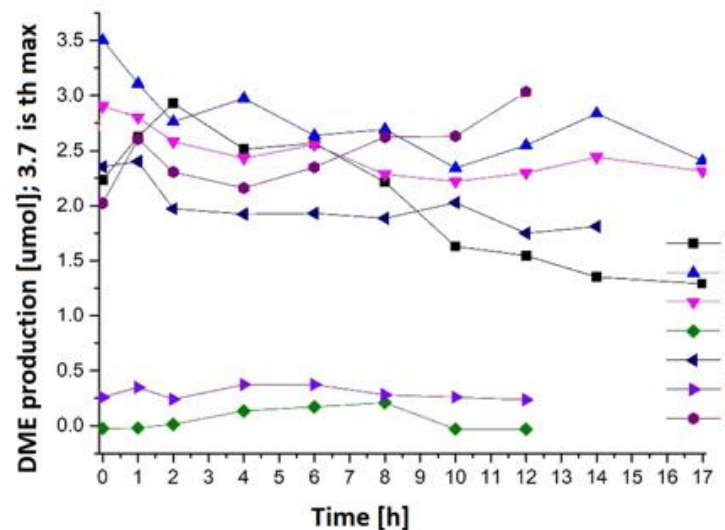


Magazynowanie wodoru w dużej skali





Projekty PG w temacie magazynowania wodoru - DME





POLITECHNIKA
GDAŃSKA

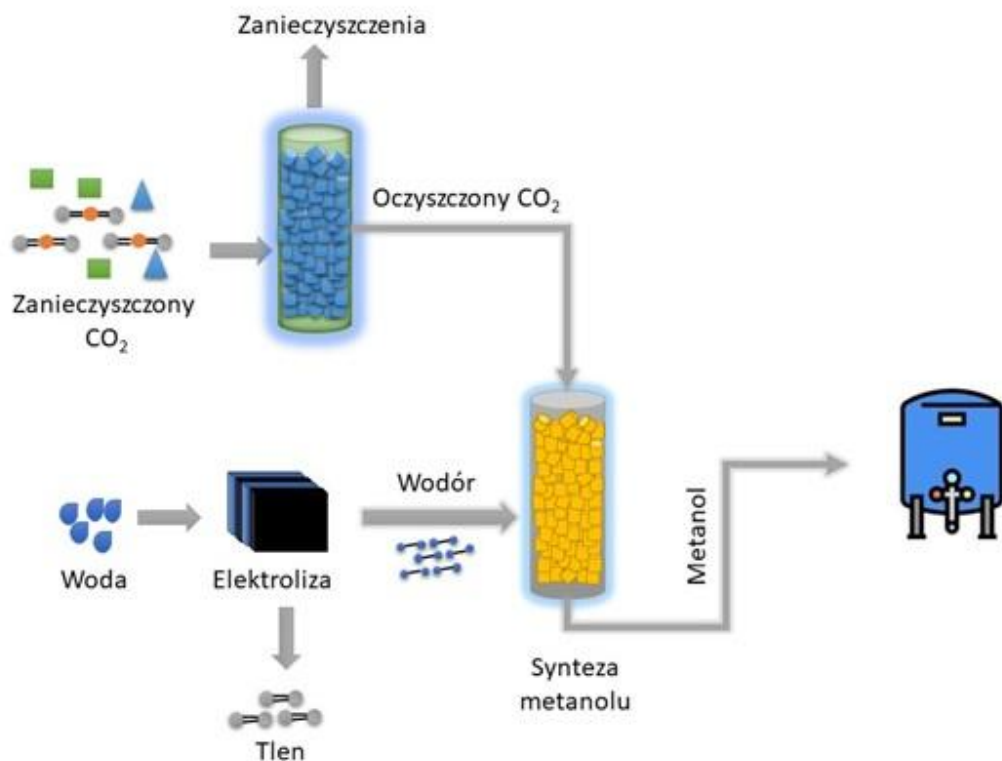


UCZELNIA
BADAWCZA

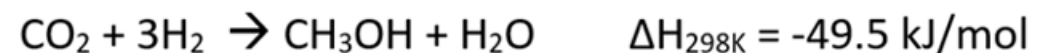
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

Projekty PG w temacie magazynowania wodoru – DME, faza demonstracyjna

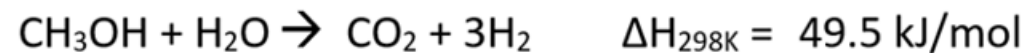




I Synteza metanolu, T do 300°, p 40-60 bar



II Odzyskiwanie wodoru: T do 300°C, p do 5bar





POLITECHNIKA
GDAŃSKA



UCZELNIA
BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI



CENTRUM
TECHNOLOGII
WODOROWYCH

Dziękuję za uwagę!!!

Dostępność
technologii?

Koszty

Ochrona
środowiska?

Centrum Technologii Wodorowych Politechniki Gdańskiej

Obszary naszej działalności:

Diagnostyka ogniw paliwowych

W ramach tego obszaru świadczymy usługi analizy i diagnostyki istniejących układów paliwowych, w szczególności w zakresie procesu korozji materiałów wykorzystywanych w ogniwach paliwowych.

Magazynowanie wodoru

Nasi specjaliści zajmują się stosowaniem związków chemicznych łatwych do syntezy z gazu syntezowego, wodoru i odpadowego ditlenku węgla, a także łatwo konwertowalnych do wodoru, w tym metanol i eter dimetylowy.

Produkcja biowodoru

W tym obszarze specjaliści zajmują się udoskonaleniem procesu produkcji biowodoru. Prowadzą badania nad określaniem potencjału wytwarzania biowodoru z odpadów, w tym doboru metod obróbki wstępnej surowca, optymalizacji parametrów procesowych wytwarzania biowodoru, analityki procesowej.

Produkcja energii

Obszar skupiony na projektowaniu struktur ochronnych dla ogniw paliwowych poprzez m.in. pokrywanie warstwami ochronnymi interkonektorów mechanicznych. Ponadto zespół specjalistów posiada doświadczenie w projektowaniu materiałów i nanomateriałów mających zastosowanie jako katalityczne powłoki zwiększające wydajność ogniw paliwowych.

Przetwarzanie energii

W tym obszarze skupiamy się na projektowaniu, budowie oraz diagnostyce przekształtników energoelektronicznych. Projektujemy układy sterujące napędami elektrycznymi dla samochodów elektrycznych i pojazdów trakcyjnych. Nasze rozwiązania i usługi mogą być stosowane w magazynach energii elektrycznej, prostownikach dedykowanych do baterii elektrochemicznych oraz stacjach ładowania pojazdów elektrycznych.

POLITECHNIKA GDAŃSKA
CENTRUM TECHNOLOGII WODOROWYCH
SEKRETARIAT: T: +48 58 3486468; M: +48 508836297
e-mail: ctw@pg.edu.pl

Dyrektor CTW
prof. Jacek Gębicki
mob. +48 692 422 454
e-mail: jacek.gebicki@pg.edu.pl