FuelSOME

Multifuel SOFC system with Maritime Energy vectors

Projekt europejski FuelSOME – koncepcja zastosowania stałotlenkowych ogniw paliwowych (SOFC)

PROF. DR HAB. INŻ. EUGENIUSZ MOLGA – WUT

WARSZAWA, 17.03.2026

"Funded by the European Union under the Grant Agreement no. 101069828. Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Climate, Infrastructure and Environment Executive Agency. Neither the European Union nor the granting authority can be held responsible for them."

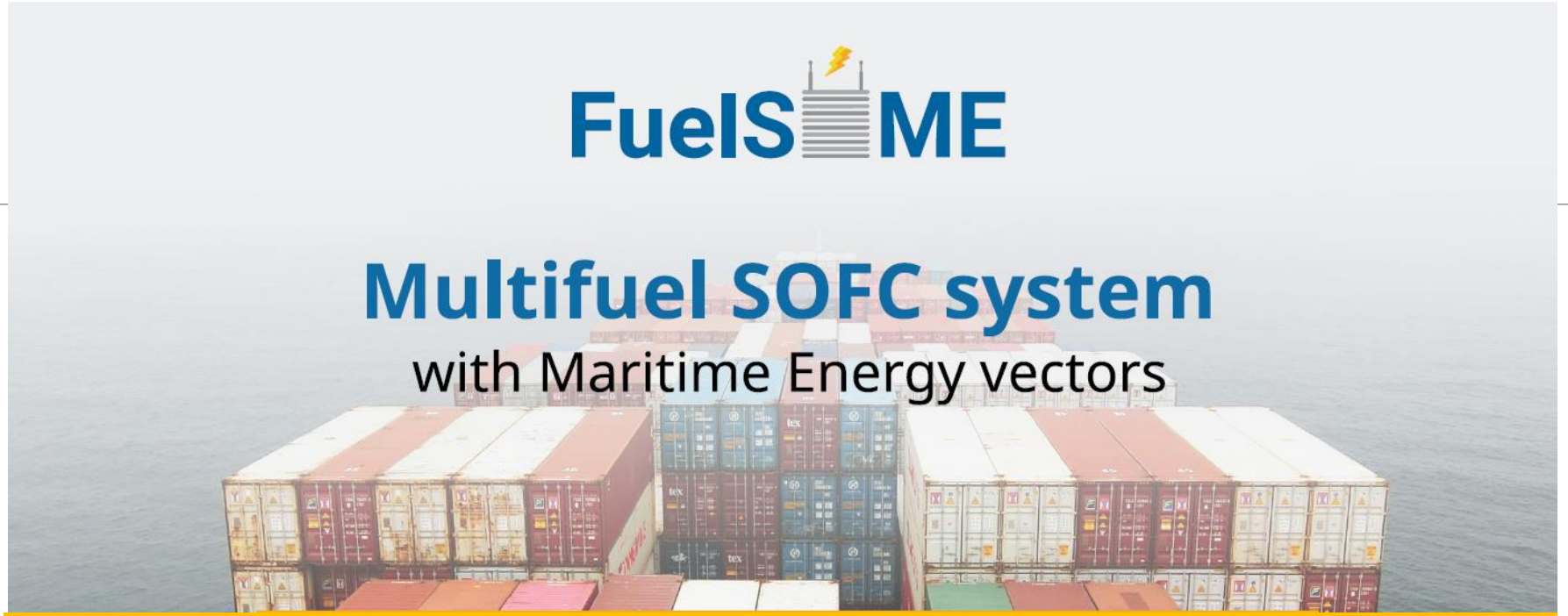
Spis treści

01 **Wstęp – istota i cele projektu**

02 **Nasze zadania**

03 **Głębokie adsorpcyjne odsiarczanie metanolu**

- **modelowanie i optymalizacja procesu**



Funded by the European Union

Projekt FuelSOME ma za zadanie opracowanie elastycznego i skalowalnego układu do wytwarzania energii elektrycznej przez Stałotlenkowe Ogniwa Paliwowe (SOFC) w zastosowaniu do napędu pełnomorskich statków

Project Start: **01/09/2022** | EC Budget: **€ 2.499.985,50** | Duration: **48 Months** | Partners: **8**

Skład Konsorcjum

1.	AVL LIST GMBH	Austria
2.	AEE – Institut fur Nachhaltige Technologien	Austria
3.	ATENA SCARL – Distretto Alta Technologia Energia Ambiente	Italy
4.	EBOS TTECHNOLOGIES LIMITED	Cyprus
5.	ELCOGEN OY	Finland
6.	POLITECHNIKA WARSZAWSKA, WIChiP	Poland
7.	TEKNOLOGIAN TUTKIMUSKESKUS VTT OY	Finland
8.	ZURCHER HOCHSCHULE FUR ANGEWANDTA WISSENCHAFTEN	Switzerland

Call: HORIZON-CL5-2021-D2-01
(Cross-sectoral solutions for the climate transition)
Topic: HORIZON-CL5-2021-D2-01-08
Type of Action: HORIZON-RIA
Proposal number: 101069828
Proposal acronym: FuelSOME

Nasz Zespół

1. Prof. dr hab. inż. Eugeniusz Molga – *Kierownik*
2. Prof. dr inż. Andrzej Stankiewicz
3. Prof. dr hab. inż. Robert Cherbański
4. Dr inż. Tomasz Kotkowski
5. Dr inż. Michał Lewak

Istota Projektu

Obecnie: Napęd statków pełnomorskich – ciężkie frakcje ropy naftowej

Transport morski emituje ponad 1 mln ton CO_2/rok, czyli 2,5% antropogenicznych GHG

- zanieczyszczenia: NOx, SOx, PM

Cel Projektu: Zastąpienie paliw petrochemicznych przez napęd elektryczny

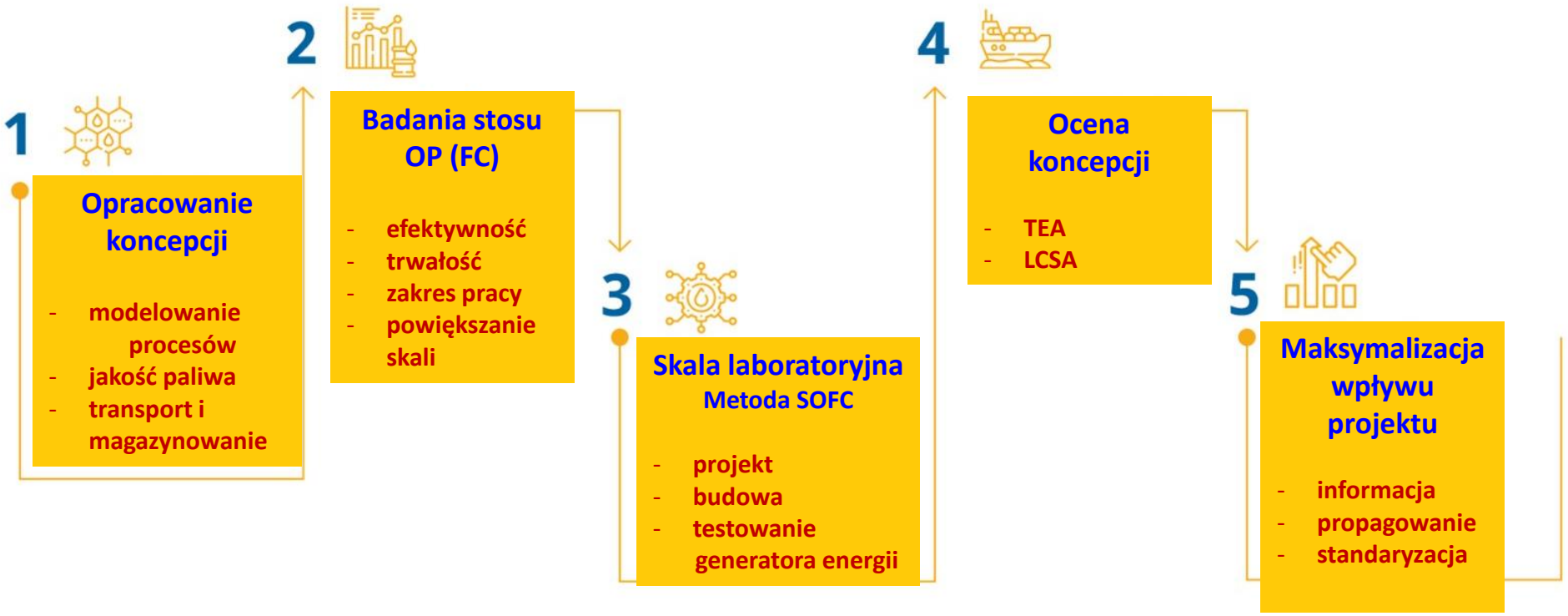
Przetwarzanie energii
Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)

Różne paliwa
Amoniak
Metanol
Wodór

Końcowe zastosowanie:
Napęd statków pełnomorskich

Projekt Europejski FuelSOME: https://fuelsome.eu/

CELE PROJEKTU



TEA – Techo-Economic Assesment

LCSA – Life Cycle Sustainability Assesment

Politechnika Warszawska

Ogniwa stałotlenkowe

(Solid Oxide Fuel Cell - SOFC)

Ogniwa stałe, w których ciekły elektrolit zastąpiono membraną ceramiczną będącą dobrym przewodnikiem jonów tlenu

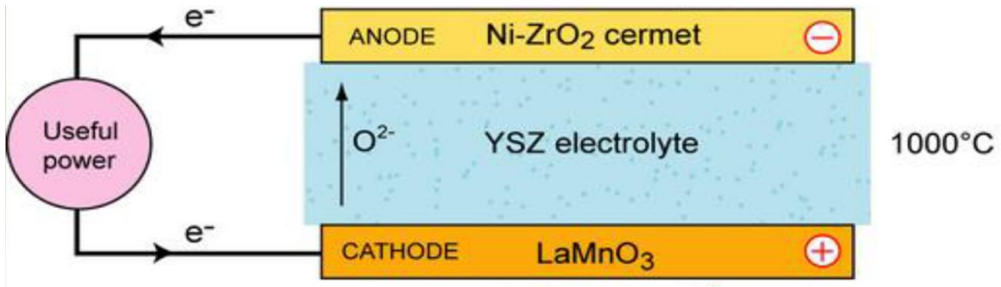
Reakcja na anodzie

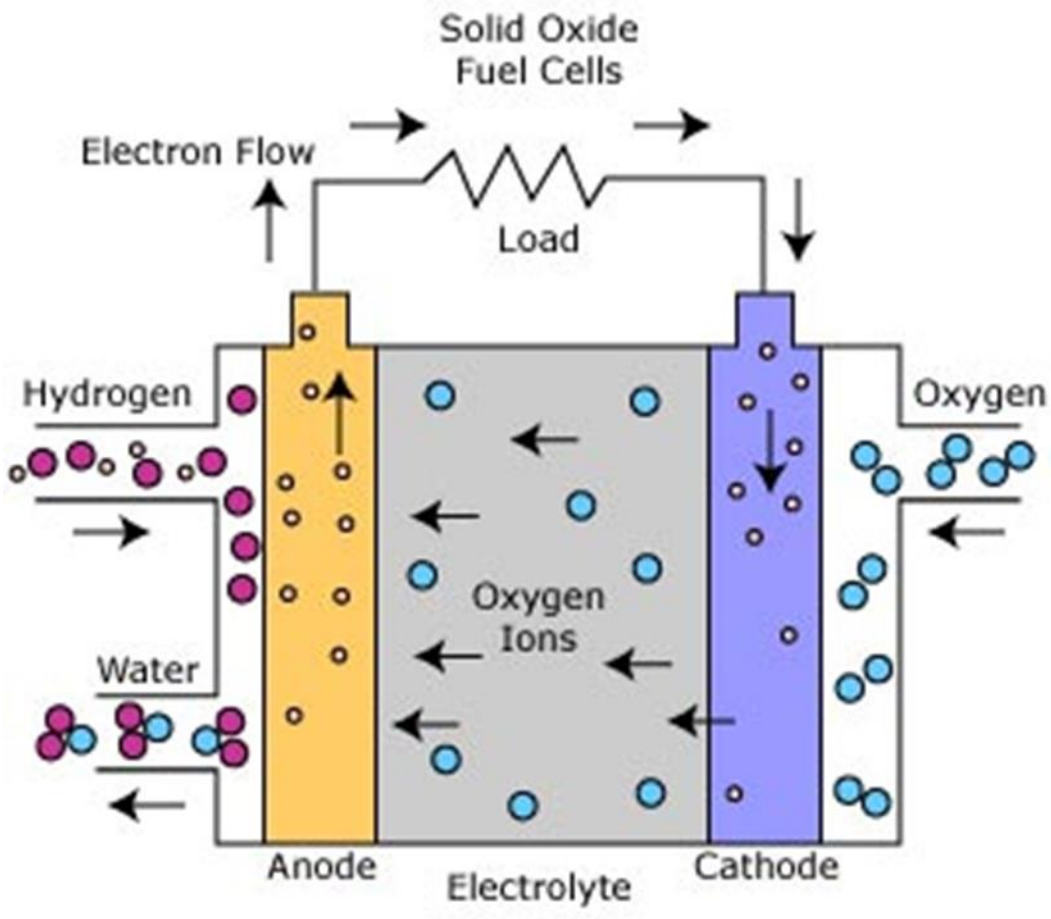
$2H_2 + 2O^{2-} => 2H_2O + 4\ e^-$

O^{2-} przenoszone przez stały elektrolit

Reakcja na katodzie

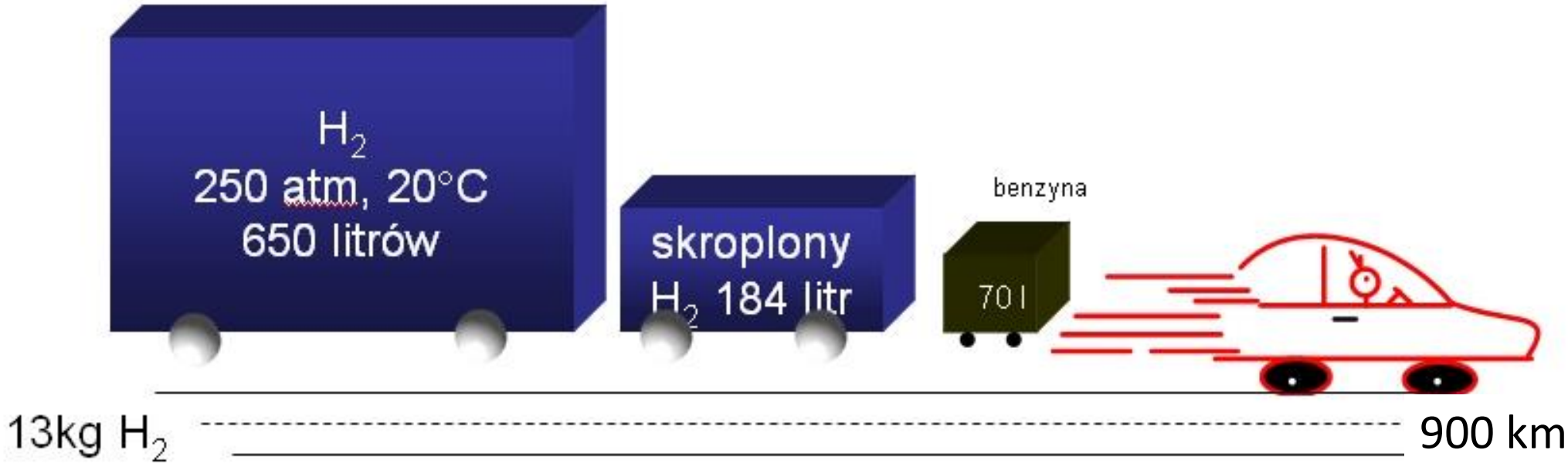
$O2 + 4e^- => 2O^{2-}$





Problemy z magazynowaniem i transportem wodoru

Magazynowanie bezpośrednie wodoru – problem trudny i kosztowny

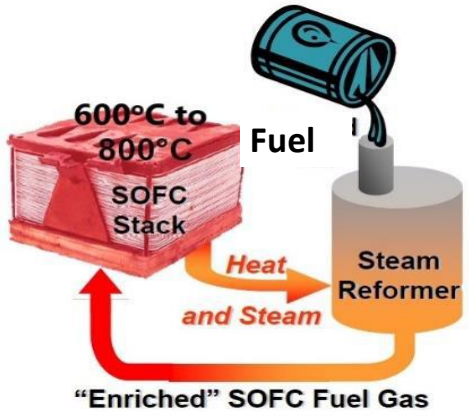


https://openin.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=225:magazynowanie-wodoru&catid=37&Itemid=218

Wynika stąd potrzeba magazynowania energii – inne paliwa m.in. amoniak, metanol !!

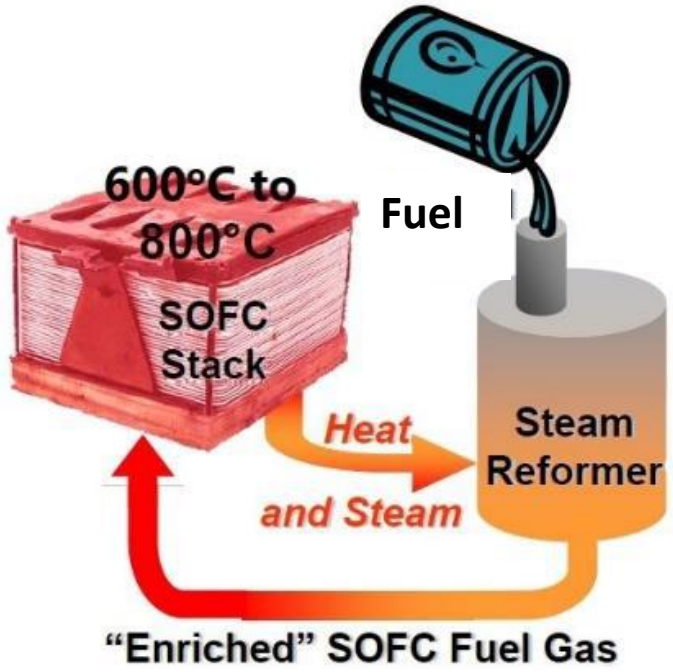
Ogólna koncepcja projektu

Projekt Europejski FuelSOME: https://fuelsome.eu/



Politechnika
Warszawska

Zakres naszych zadań



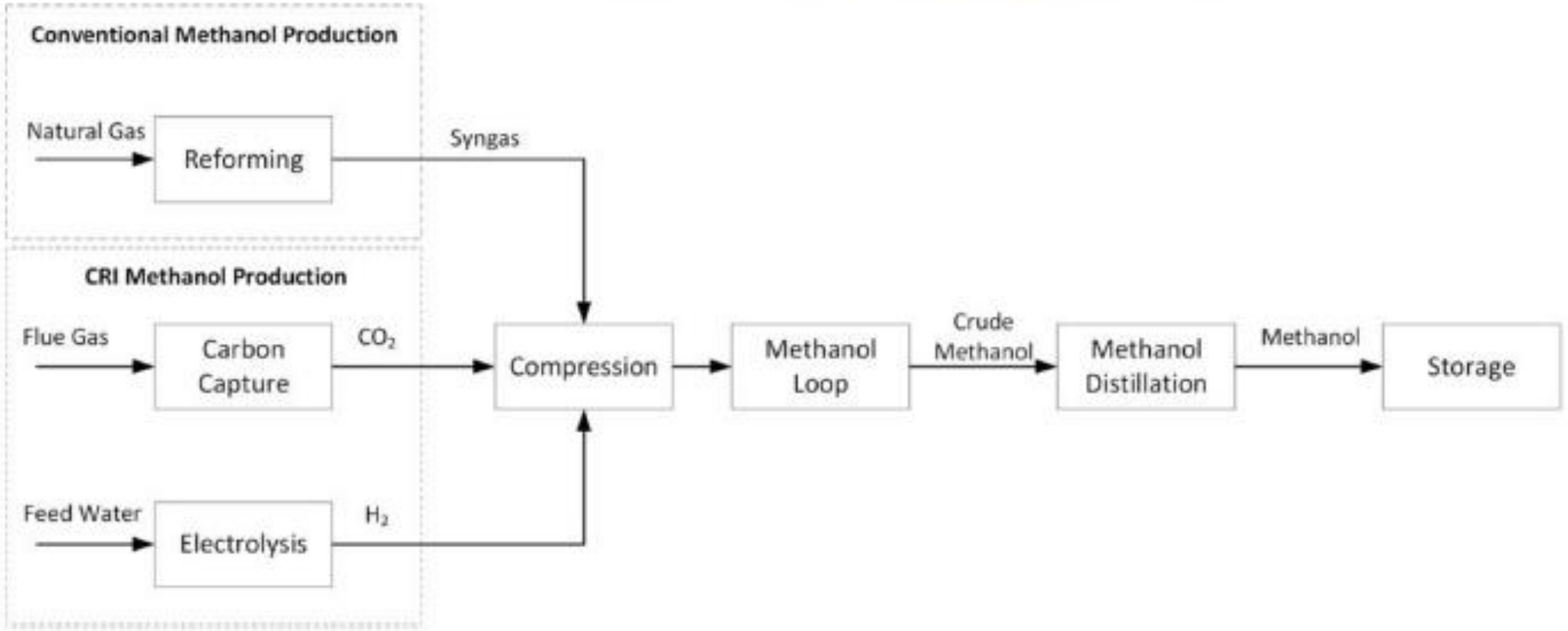
Cele działań

- zaprojektowanie ogólnej koncepcji zasilania SOFC paliwami
  - wodorem, amoniakiem, metanolem)
- zdefiniowanie wymagań jakości paliw
- optymalizacja ścieżek dostarczania paliw
  - wybór metod wytwarzania, oczyszczania, transportu i magazynowania

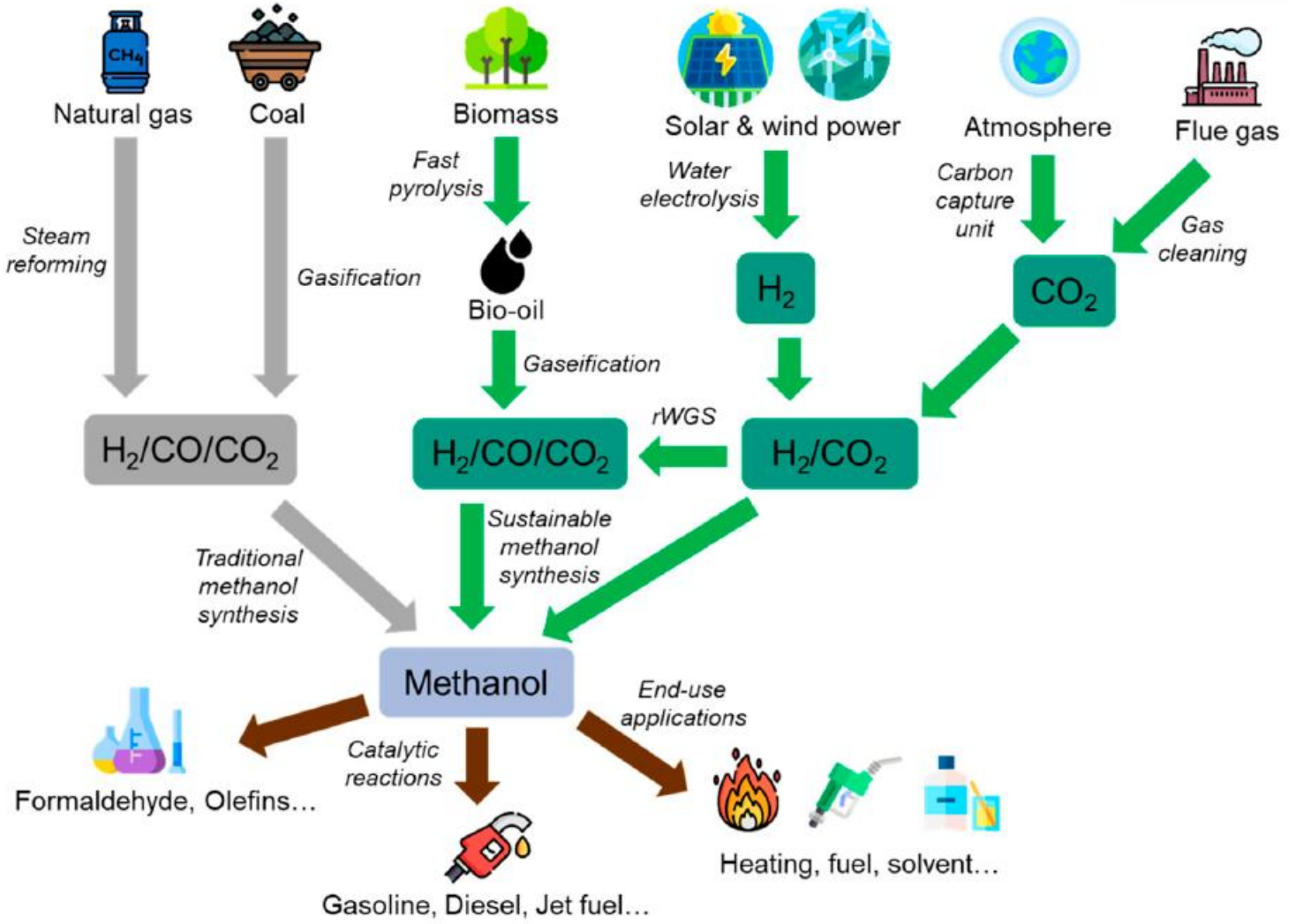
Wymagania producenta SOFC
dotyczące czystości paliw

	Initial heating	Heating/cooling under reducing conditions	Initial of stack loading	Nominal loading
Fuel; flow rate ($I^{(faradic)}$)[7], (U_{fuel})[8]	balance pressure drop, use reducing gas	$I^{(faradic)}$ = 2A	maximum([$I^{(faradic)}$ = 15A]; [U_{fuel} = 35 – 55 %])	U_{fuel} = 40 – 70 %
Fuel; oxygen-to-carbon ratio (*O/C*)[9]	No carbon containing fuel should be used	min 2.5	min 2.5	min 2.0
Fuel; methane content (*DIR*)[10]	No carbon containing fuel should be used	max 0.50	max 0.55	max 0.65
Fuel; max sulfur content[11]	30 mol-ppb	30 mol-ppb	30 mol-ppb	30 mol-ppb
Fuel; max C_xH_yZ content[12]	10 mol-ppm	10 mol-ppm	10 mol-ppm	10 mol-ppm
Maximum working pressure	50 mbar(g)	50 mbar(g)	50 mbar(g)	50 mbar(g)
Maximum pressure difference[13]	10 mbar	10 mbar	10 mbar	10 mbar

Synteza metanolu



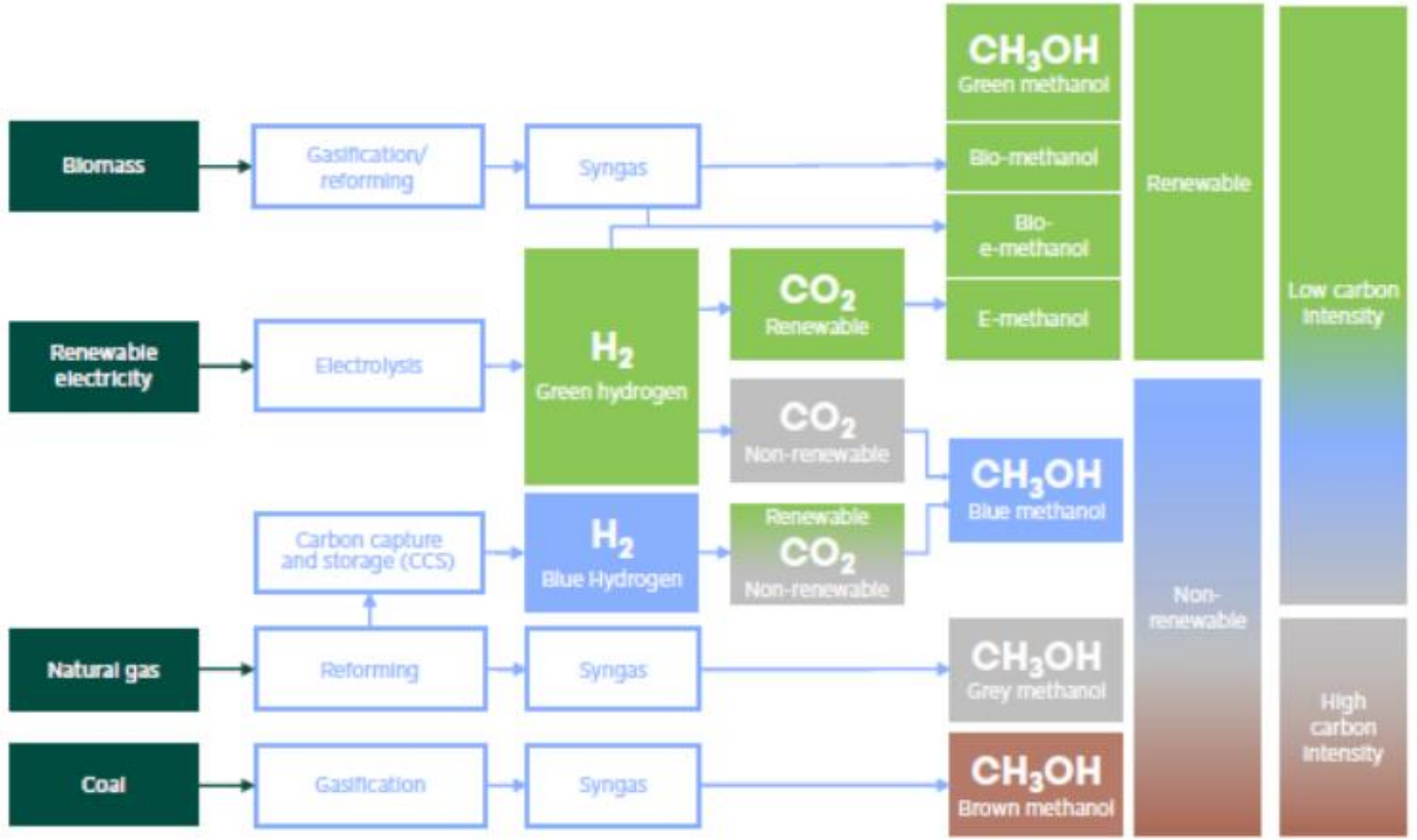
Synteza metanolu



Processes **2022**, *10*, 1535. https://doi.org/10.3390/pr10081535

Synteza metanolu

Produkcja zielonego metanolu



Renewable CO_2: *from bio-origin and through direct air capture (DAC)*

Non-renewable CO_2: *from fossil origin, industry*

Produkcja metanolu

Metoda - Grey/black	Metoda - Green (renewable)
Paliwa kopalne (gaz ziemny i węgiel)	- H2 z odnawialnej energii elektrycznej i CO_2 z wychytu
Gaz syntezowy do produkcji metanolu - $CO/CO_2/H_2$	Gaz syntezowy do produkcji metanolu - CO_2/H_2

$Cu/ZnO/Al_2O_3$ (CZA) katalizator, 200-300 °C, 50-100 bar

$CO(g) + 2H_2(g) \leftrightarrow CH_3OH(g)$ $\Delta H = -90.6\ kJ \cdot mol^{-1}$ (1)

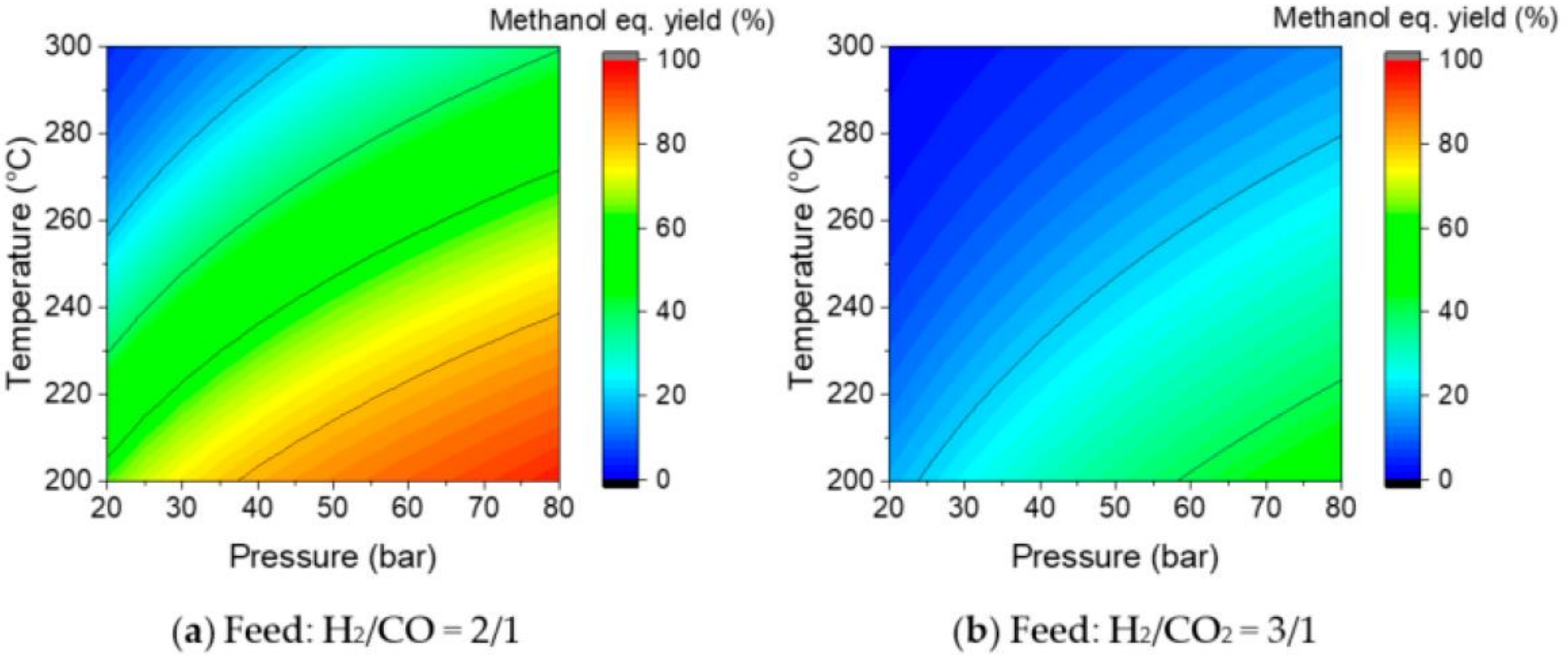
$CO_2(g) + 3H_2(g) \leftrightarrow CH_3OH(g) + H_2O(g)$ $\Delta H = -49.4\ kJ \cdot mol^{-1}$ (2)

rWGSR $CO_2(g) + H_2(g) \leftrightarrow CO(g) + H_2O(g)$ $\Delta H = 41.2\ kJ \cdot mol^{-1}$ (3)

Reversible – equilibrium reactions – recycling is required

Synteza metanolu

$Cu/ZnO/Al_2O_3$ (CZA) katalizator, 200-300 °C, 50-100 bar



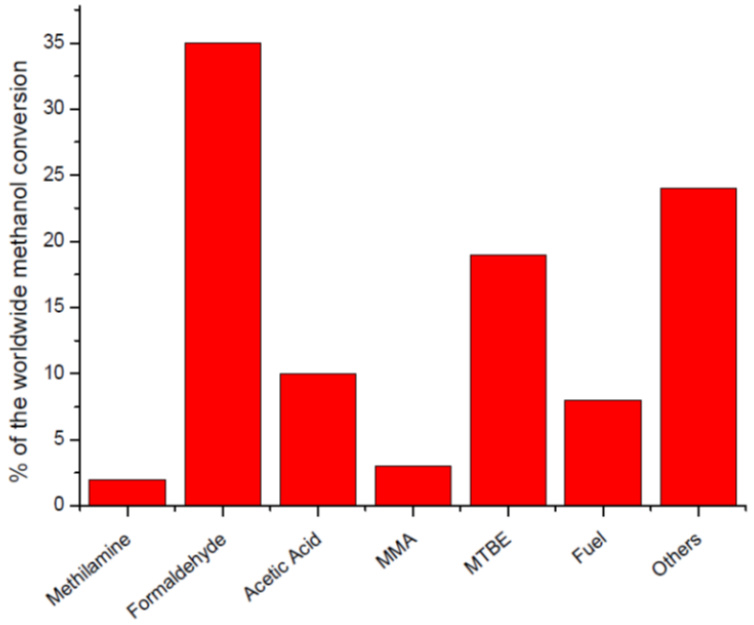
Równowagowe wydajności metanolu

Processes **2022**, *10*, 1535. https://doi.org/10.3390/pr10081535

Produkcja i konsumpcja metanolu

Światowa produkcja metanolu – 110 mln ton/rok

Produkcja		Konsumpcja	
China	75 %	China	58 %
USA	6.2 %	Asia-Pacific	16%
Russia	4.8 %	Europe	13%
		Nord America	10%



Konsumpcja metanolu

- Surowiec chemiczny
- Paliwa (i.e. additives, biodisel, DME, FC) – 8%
  w tym FC mniej niż 0.02%

Wymagania producenta SOFC
dotyczące czystości paliw

Czystość metanolu zalecana przez the International Methanol Producers and Consumers Association (IMPCA)

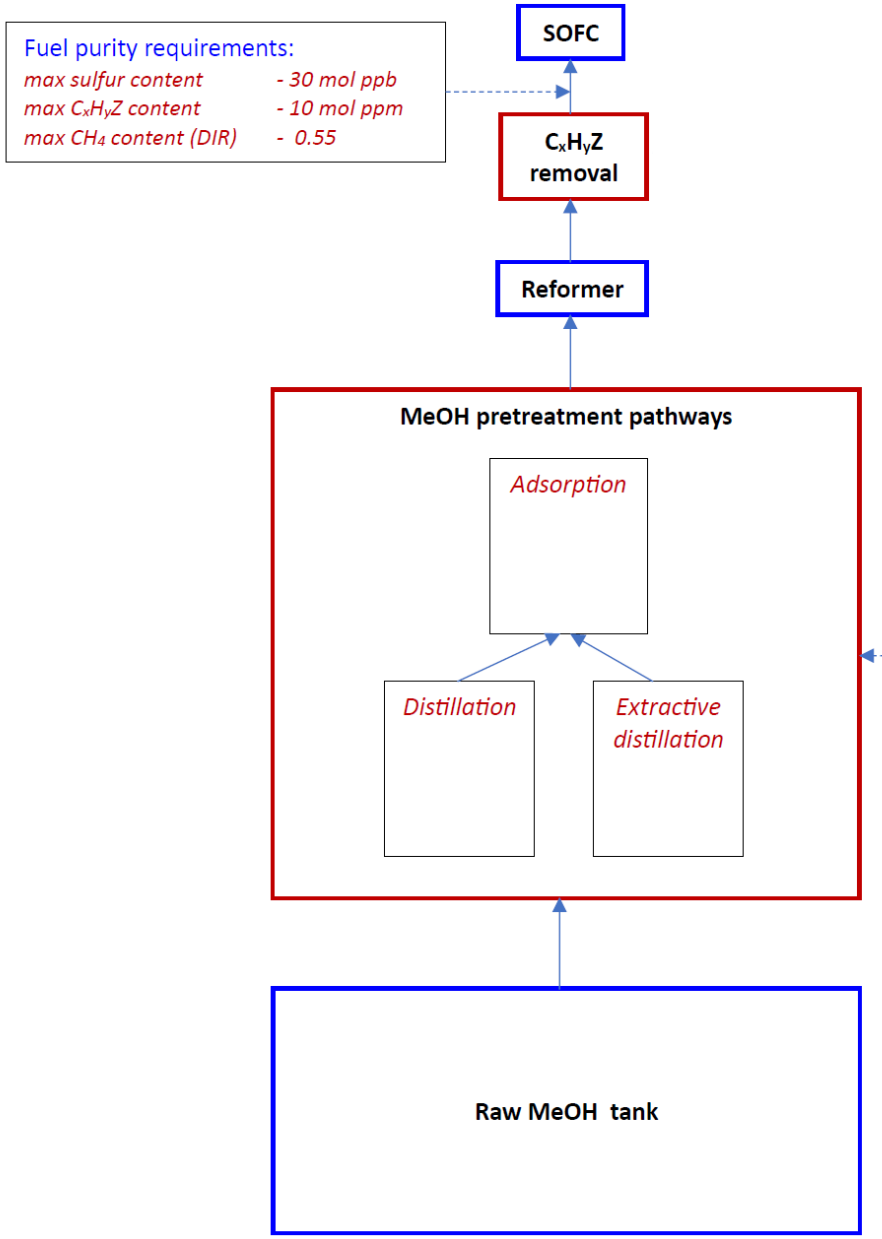
Sulphur [mg/kg] max 0.5 ➔ 500 [mol ppb]

	Initial heating	Heating/cooling under reducing conditions	Initial of stack loading	Nominal loading
Fuel; flow rate ($I^{(faradic)}$)[7], (U_{fuel})[8]	balance pressure drop, use reducing gas	$I^{(faradic)}$ = 2A	maximum([$I^{(faradic)}$ = 15A]; [U_{fuel} = 35 – 55 %])	U_{fuel} = 40 – 70 %
Fuel; oxygen-to-carbon ratio (*O/C*)[9]	No carbon containing fuel should be used	min 2.5	min 2.5	min 2.0
Fuel; methane content (*DIR*)[10]	No carbon containing fuel should be used	max 0.50	max 0.55	max 0.65
Fuel; max sulfur content[11]	30 mol-ppb	30 mol-ppb	30 mol-ppb	30 mol-ppb
Fuel; max C_xH_yZ content[12]	10 mol-ppm	10 mol-ppm	10 mol-ppm	10 mol-ppm

Wykonane prace

1. Rozpoznanie rynku dla pozyskiwania paliw : wodór, amoniak, metanol
2. Wybór metod analitycznych
3. Przegląd metod oczyszczania odpowiednich do uzyskania KPIs (Key Performance Indicators)
4. Wskazanie metody oczyszczania
5. Modelowanie wybranego procesu oczyszczania
6. Analiza ekonomiczna i optymalizacja wybranego procesu
7. Wskazówki do implementacji wybranego procesu w praktyce

Nasze działania



Potrzebne:

- **wymagane strumienie metanolu**
- **rodzaj zanieczyszczeń**
  (rodzaj związków siarki, stężenia)

Do wyznaczenia:

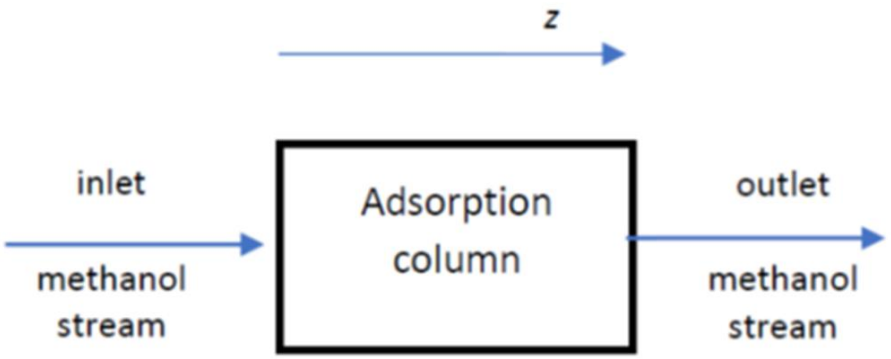
- **rodzaj sorbentu**
- **efektywność oczyszczania**

Zadania

- **modelowanie procesów**
- **obliczenia symulacyjne**
- **optymalizacja techn.-ekonom.**
- **propozycja implementacji**

Modelowanie głębokiego adsorpcyjnego odsiarczania metanolu

1. **Układ testujący: dibenzothiophen (DBT) rozpuszczony w metanolu – węgiel aktywowany (AC)**
2. **Proces prowadzony w kolumnie z wypełnieniem**



Model procesu głębokiej adsorpcyjnej desulfuryzacji metanolu

Równania modelowe

- **bilans masy w fazie ciekłej**

$$D_L \frac{\partial^2 c_{DBT}}{\partial z^2} - u \frac{\partial c_{DBT}}{\partial z} - \frac{6(1-\varepsilon)}{\varepsilon d_p} K_{gl} \left(c_{DBT} - \overline{c_{DBT,p}}\right) = \frac{\partial c_{DBT}}{\partial t} \quad (1)$$

gdzie ε – porowatość złoża, u – prędkość cieczy,

c_{DBT} - stężenie DBT w cieczy,

$\overline{c_{DBT,p}}$ – średnie stężenie DBT w porach adsorbnetu ,

D_L – współczynnik dyspersji osiowej,

K_{gl} - zastępczy współczynnik przenoszenia masy (zewnętrzne i wewnętrzne opory przenoszenia masy),

d_p – średnica ziaren adsorbentu

- **bilans masy w porach adsorbentu**

$$\varepsilon_p \frac{\partial \overline{c_{DBT,p}}}{\partial t} = \frac{6}{d_p} K_{gl} \left(c_{DBT} - \overline{c_{DBT,p}}\right) - (1-\varepsilon_p)\, \rho_s \frac{\partial \overline{q_{DBT}}}{\partial t} \quad (2)$$

gdzie $\overline{q_{DBT}}$ – średnie stężenie zaadsorbowanego DBT, ρ_s – gęstość fazy stałej, ε_p – porowatość ziaren adsorbentu,

Model procesu

Równania modelowe

- **zastępczy współczynnik przenoszenia masy**

$$\frac{1}{K_{gl}} = \frac{1}{k_f} + \frac{1}{k_i} \qquad (3)$$

gdzie k_f – współczynnik wnikania masy na zewnątrz ziarna,

k_i – pozorny współczynnik przenoszenia masy w ziarnie

$$k_i = \frac{10 D_i}{d_p} \qquad (4)$$

- Glueckauf (1955), Santacesaria et al. (1982), Silva et al. (2011)

D_i – efektywny współczynnik dyfuzji w porach ziarna

- **zależność równowagowa**

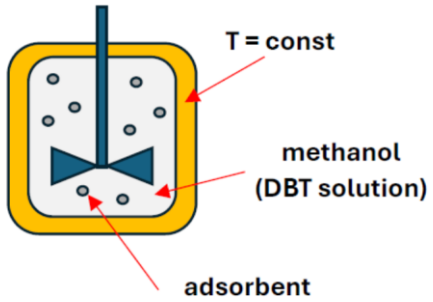
$$q_{DBT,eq} = \frac{q_m K_L c_{DBT,p}}{1 + K_L c_{DBT,p}} \qquad (A.5)$$

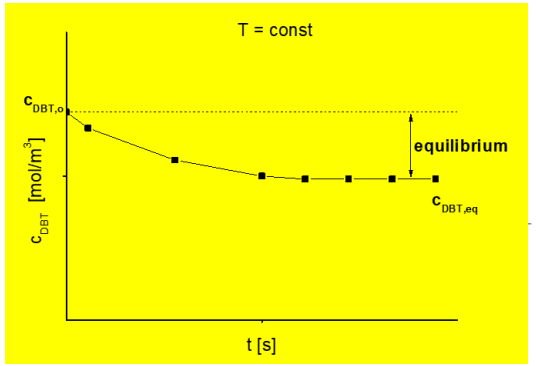
g

Model procesu

Równania modelowe

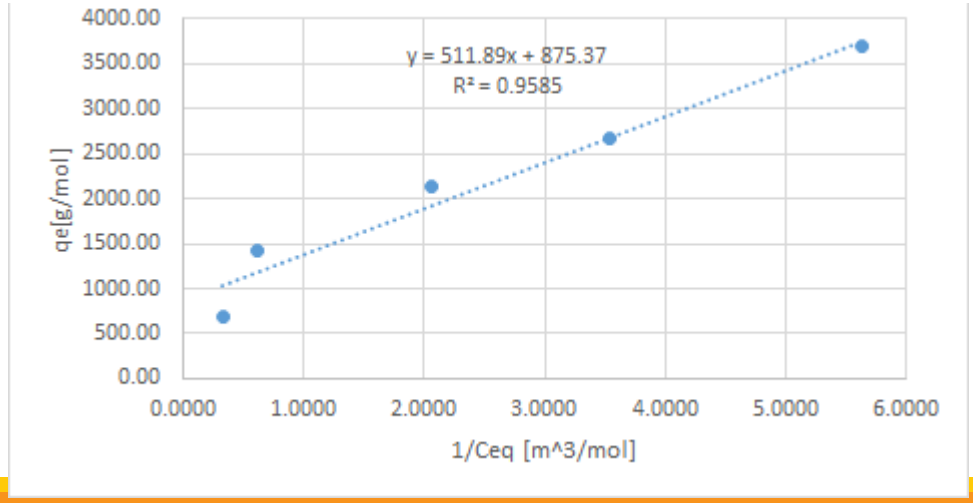
- wyznaczenie zależności równowagowej



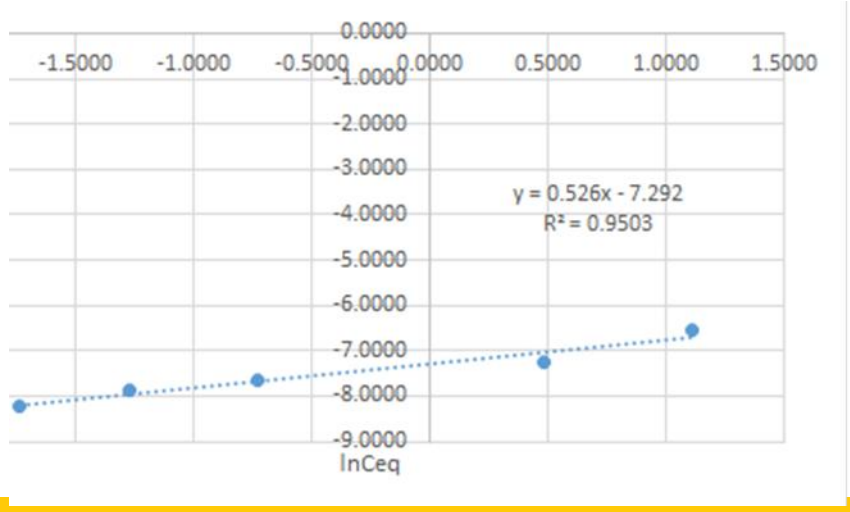


$$q_{eq} = \frac{V_L\left(c_{DBT,o} - c_{DBT,eq}\right)}{m_{ads}} \Rightarrow q_{eq} = f\left(c_{DBT,eq}\right)$$

Izoterma Langmuira



Izoterma Freundlicha

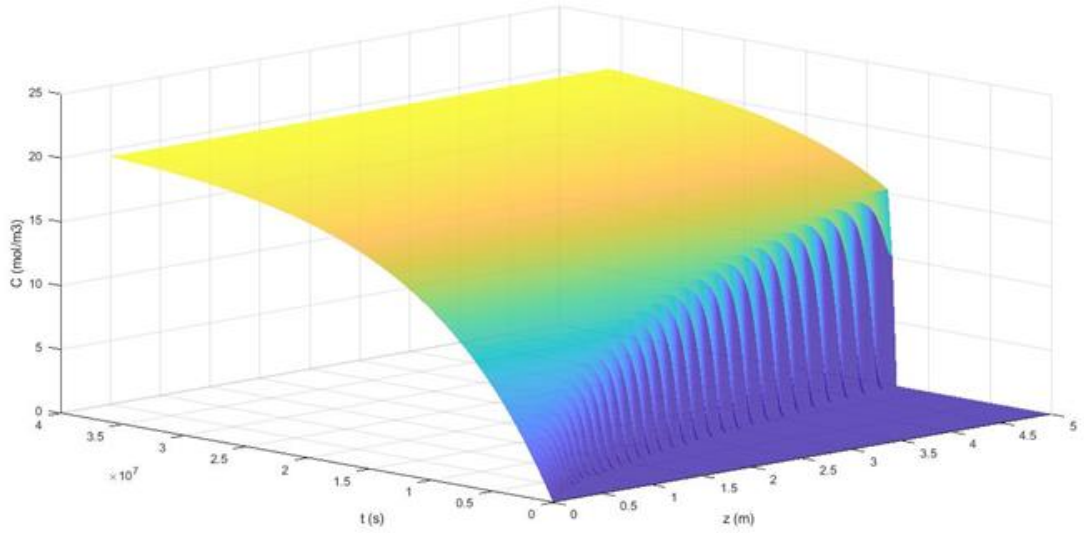


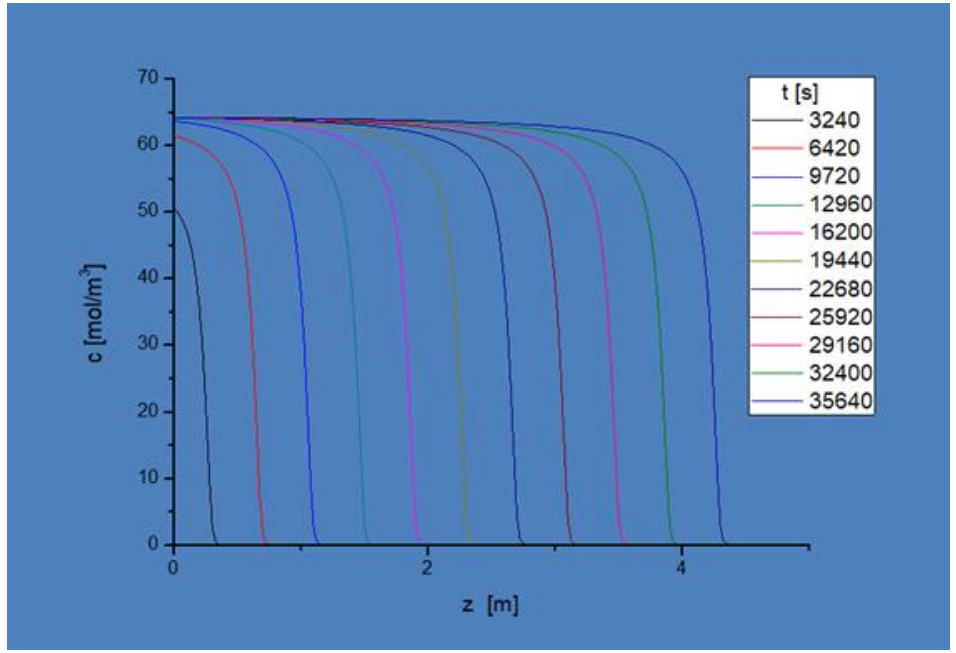
Model procesu

Rozwiązania modelu

- wybrane: średnica kolumny D_w , średnia ziarna adsorbentu - d_p , porowatość złoża - ε , porowatość ziarna - ε_p

- zmienne operacyjne: stężenie zanieczyszczeń - $c_{DBT,in}$ [mol/m^3], przepływ masowy metanolu G [kg/h]



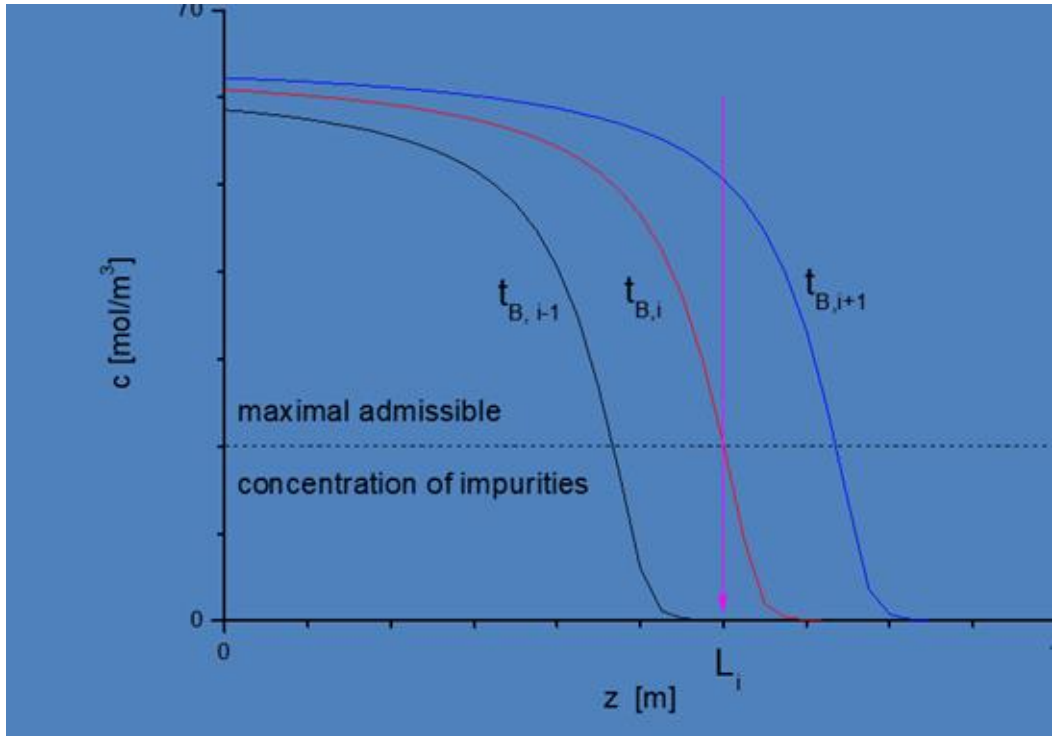


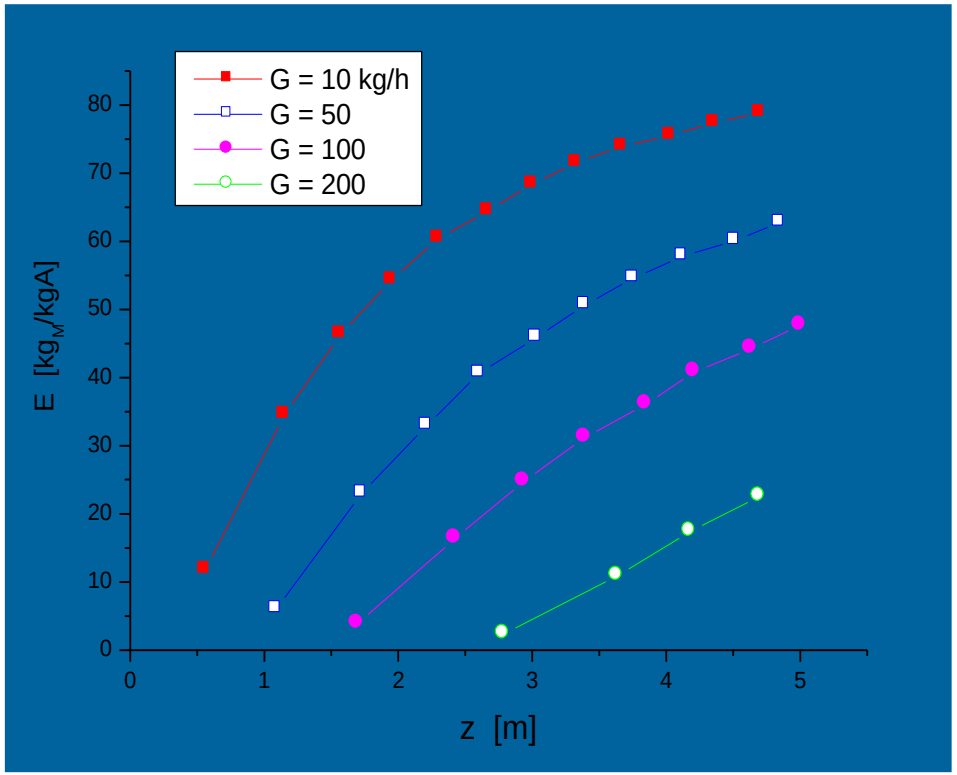
Model procesu

Wykresy operacyjne i analiza kosztów

- współczynnik efektywności

$$E = \frac{m_{PM}}{m_A} = \frac{t_{B,i} G}{F_o L_i (1-\epsilon) \rho_{s,a}}$$





Model procesu

Wykresy operacyjne i analiza kosztów

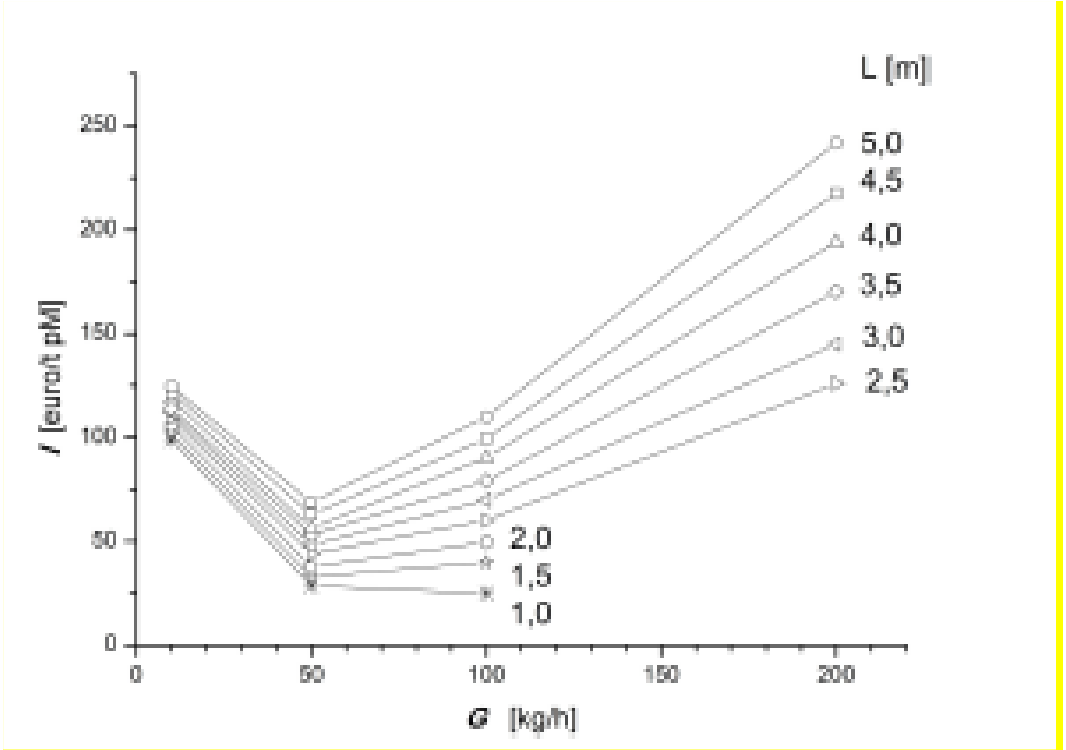
- wskaźnik kosztów $I\left[\frac{€}{kg}\right] = \frac{C_T}{m_{p,M}} = \frac{C_T}{t_{B,i}\,G}$ = f (D_w, L, d_p, ε, ε_p, G, $c_{DBT,in}$)

gdzie koszty całkowite $C_T = C_I + C_{op} = a(C_{Ip} + C_{Iv})\,t_{B,i} + C_{op}$

dla wybranych:

D_w , d_p , ε , ε_p , $c_{DBT,in}$

można znaleźć optymalne G dla danego L



System ekspercki (AI) do optymalizacji procesu odsiarczania

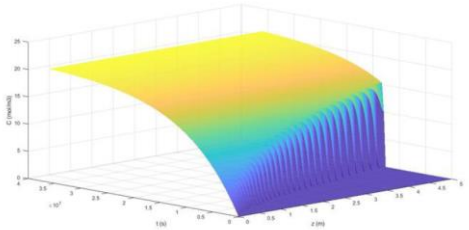
- zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (ANN)

Ogólne założenia

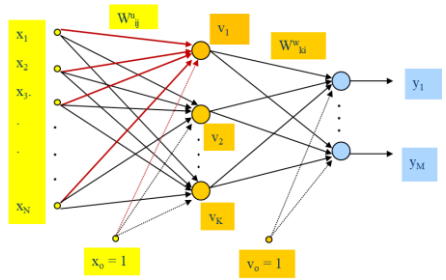
- opracowanie narzędzia (użyteczne i łatwe w użyciu) do projektowania w porcie procesu adsorpcyjnego odsiarczania bez konieczności prowadzenia obliczeń numerycznych

1. Przeprowadzenie serii obliczeń numerycznych - zebranie danych obliczeniowych
2. Konstrukcja sieci neuronowej (ANN) – uczenie sieci (wyznaczenie wag)
3. Opracowanie Systemu eksperckiego

Symulacje numeryczne



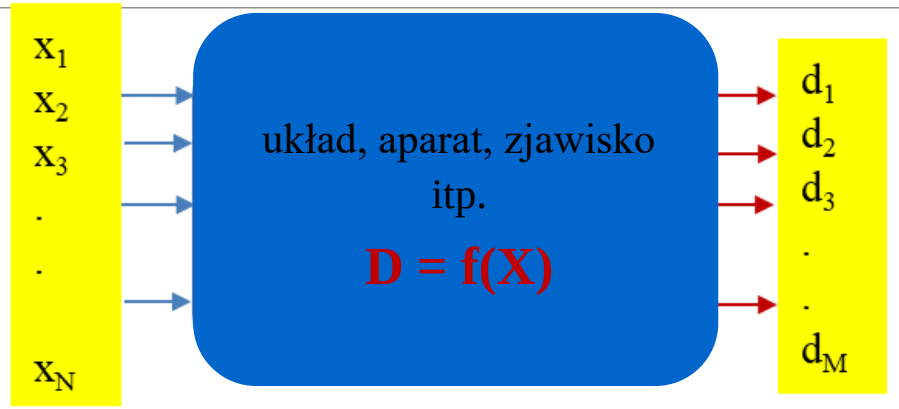
System ekspercki



Uczenie - wyznaczanie wartości wag sieci

1. Zestaw danych uczących

- zestaw danych doświadczalnych opisujących dany układ, zjawisko itp.



Sieć działa jak „czarna skrzynka”

- zachowanie układu opisywane jest przez nieznaną zależność funkcyjną: **D = *f*(X)**

gdzie wektory: **X =** $[x_1, x_2, x_3 \dots x_N]$ oraz **D =** $[d_1, d_2 \dots d_M]$ *mogą być wyznaczane doświadczalnie*

- podczas procedury doświadczalnej wyznaczany jest zestaw danych

zestaw danych wejściowych	*zestaw danych wyjściowych*
X = $[x_1, x_2, x_3 \dots x_N]$	**D =** $[d_1, d_2 \dots d_M]$
……	……
……	……
……	……
……	……

P – liczba eksperymentów (l. wzorców uczących)

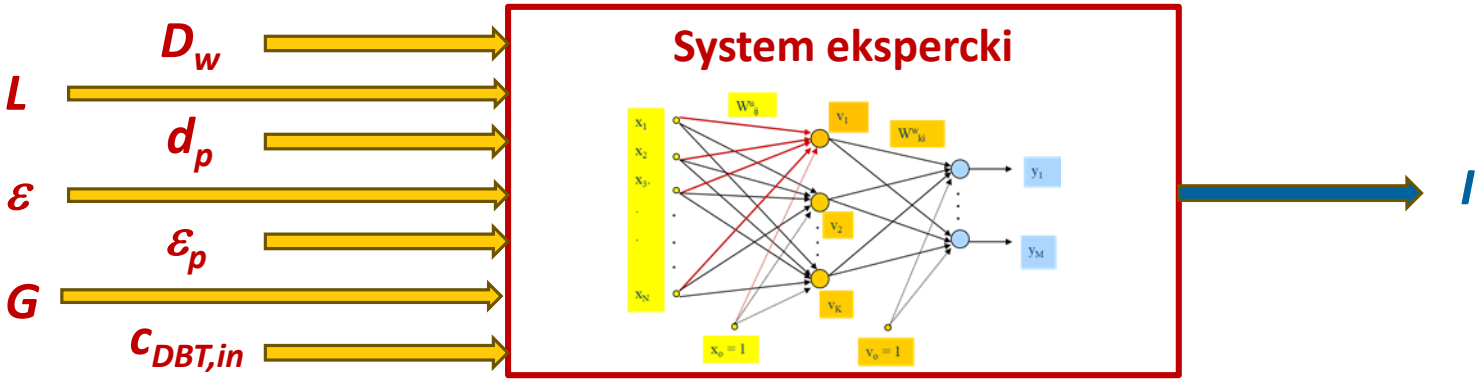
System ekspercki (AI) do optymalizacji procesu odsiarczania

Zasada działania Systemu eksperckiego

- **podstawa optymalizacji – minimalizacja kosztów odsiarczania**

$$I\left[\frac{€}{kg}\right] = \frac{C_T}{m_{p,M}} = \frac{C_T}{t_{B,i}\,G} = \mathrm{f}\,(D_w, L, d_p, \varepsilon, \varepsilon_p, G, c_{DBT,in})$$

- **sieć neuronowa odwzorowuje (aproksymuje) tę zależność funkcyjną**



Głębokie odsiarczanie metanolu – Podsumowanie

1. Modelowanie procesu odsiarczania

A. Konferencje

1A. Lewak M., Cherbański R., Stankiewicz A., Molga E.:

Sulfur removal from methanol for fuel cel applications, Book of Abstracts,

24th All-Polish Conference Chemical and Process Engineering, Szczecin (Poland), 13-16.06.2023

B. Publikacje

1B. Molga E., Cherbański R., Stankiewicz A., Lewak M.:

Modelling of deep adsorptive desulphurization of the methanol for fuel cell applications,

Chemical and Process Engineering: New Frontiers, 2024, 44(3), e72

2B. Kotkowski T.: Molga E., Cherbański R., Stankiewicz A.,

Adsorption equilibria in the system: DBT solutions in methanol – activated carbon, *w przygotowaniu*

2. Zastosowanie sztucznych sieci neuronowych (AI)

A. Konferencje

2A. Molga E., Chwojnowski K., Cherbański R., Stankiewicz A.:

Optimization of deep adsorptive purification of methanol – use of expert system based on neural network application,

Book of Abstracts, , XII All-Polish Scientific Conference, Chemical and Process Engineering for Environment and Medicine,

Sarbinowo (Poland), 11-14.09.2024

B. Publikacje

1B. Molga E., Cherbański R., Stankiewicz A., Chwojnowski K.:

Application of Artificial Neural Networks for representation of complex numerical calculations results - optimization of deep adsorptive purification of methanol, w przygotowaniu

FuelSHIP

Multifuel SOFC system with Maritime Energy vectors

Bardzo dziękuję za uwagę

EUGENIUSZ MOLGA

eugeniusz.molga@pw.edu.pl

WICHiP PW - WUT

https://www.ichip.pw.edu.pl