



Politechnika Śląska w Gliwicach
Katedra Maszyn i Urządzeń Energetycznych

SIŁOWNIE BIOMASOWE ZINTEGROWANE Z GENERACJĄ WODORU

Tadeusz Chmielniak, Tomasz Chmielniak^{a)}

^{a)} Katedra Maszyn Ciepłych i Przepływowych, AGH

XXXV Konferencja : **Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej. Bezpieczeństwo energetyczne Polski i UE w świetle obecnej sytuacji gospodarczej świata. Zakopane 15 -18 10 2023**



Politechnika
Śląska

www.kmiue.polsl.pl

WPROWADZENIE

Ograniczenie globalnego ocieplenia do 2°C (1.5°C) wymaga wprowadzenia różnych klas technologii, w tym technologii usuwania ditlenku węgla z atmosfery. Mówimy tu o technologiach „ujemnych emisji” (Negative Emissions Technologies –NET). Pod tym pojęciem rozumie się zazwyczaj celowe działanie człowieka na rzecz usunięcia emisji CO₂ z atmosfery (Minx et al., 2018). Wyróżniamy tu działania obejmujące: konwersję biosurowców z wychwytywaniem i składowaniem dwutlenku węgla (BECCS), zalesianie (Afforestation and Reforestation – AR), bezpośredni wychwyt ditlenku węgla z powietrza i jego składowanie (Direct air carbon capture and storage - DACCS), technologie przyspieszonego procesu wietrzenia (rozkładu) skał (Enhanced weathering – EW), nawożenie oceanów (Ocean fertilization - OF), technologie biowęgla (Biochar – BC) i sekwestracji węgla w glebie (Soil carbon sequestration – SCS).

Jan C Minx et al, *Negative emissions—Part 1: Research landscape and synthesis*. Environmental Research Letters 13 (2018) 063001



OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA TECHNOLOGII

- Wśród nich szczególną rolę odgrywają technologie BECCS. Ogólny potencjał ujemnej emisji technologii z grupy BECCS oceniono na 0.5 – 5 GtCO₂/rok (stan osiągnięty w 2050r.) przy cenie 100 – 200 USD/ Mg CO₂. Udział technologii z grupy (BECCS) stanowi od 10 do 20% całkowitego szacowanego efektu wszystkich możliwych przedsięwzięć NET (2050r.), (Fuss et al., 2018) .
- Struktury technologiczne z grupy BECCS są złożone. Różnią się one szczegółowymi rozwiązaniami w zakresie rodzaju wykorzystanej biomasy (odpadów), technologiami jej uszlachetniania i konwersji (suszenie, rozdrabnianie, zgazowanie lub piroliza), sposobami oczyszczania produktów konwersji, sposobami generacji wodoru z wykorzystaniem OZE, jego metanizacji, sposobami wykorzystania ciepła procesowego, technologiami separacji ditlenku węgla, różnymi postaciami produktów końcowych (elektryczność, ciepło, chłód i inne) i innymi elementami.

Fuss et al., *Negative emissions—Part 2: Costs, potentials and side effects*. Environ. Res. Lett. 13 (2018) 063002



OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA TECHNOLOGII

Skuteczna analiza efektywności instalacji o odpowiedniej strukturze technologicznej wymaga modelowania wielu modułów i ich integracji. Główne moduły to: konwersja termo – chemiczna surowca biomasowego, oczyszczanie gazu, separacja ditlenku węgla, generacja wodoru (w tym elektroliza), generacja elektryczności (w tym: ogniwa paliwowe, spalanie tlenowe, turbiny gazowe). Modelowanie i analiza procesów cząstkowych i urządzeń tworzących instalacje BECCS są szeroko reprezentowane w literaturze.



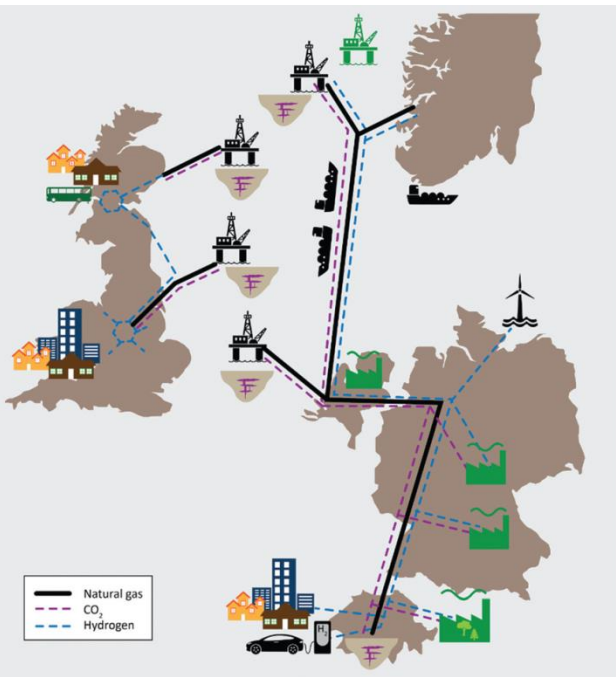
OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA TECHNOLOGII c.d.

Mimo rozległej literatury poświęconej różnym aspektom BECCS, publikacji dotyczących dyskusji różnych struktur technologicznych, ich hierarchizacji i analizy jest mniej. Wynika to z zapewne z wielu możliwych kombinacji poszczególnych modułów, wpływu uwarunkowań lokalnych na rozwiązania technologiczne (dostępność biomasy, rola tej klasy technologii w systemie energetycznym itd.) oraz różnorodnych możliwości ukierunkowania technologii do zastosowań w przemyśle.

Ogólnie rzecz biorąc struktury technologiczne (BECCS) można podzielić na te, które nie zawierają modułów generacji wodoru z wykorzystaniem zewnętrznej odnawialnej energii napędowej (wiatr, energetyka słoneczna, energetyka jądrowa i te instalacje, które są w różnym zakresie zintegrowane z instalacjami produkcji wodoru z tych źródeł.

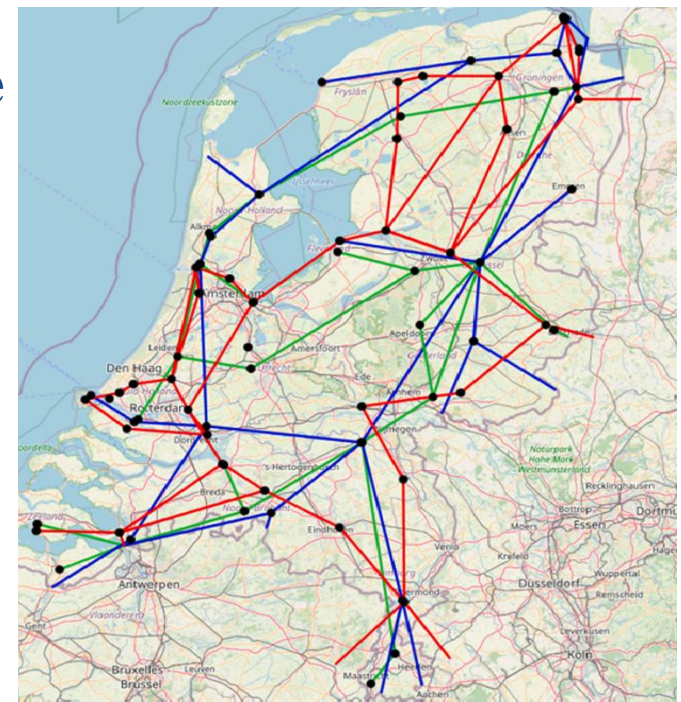


Systemy przesyłowe



Możliwe europejskie łańcuchy produkcji, transportu, magazynowania i wykorzystania H₂, CO₂ i gazu ziemnego.

Mijndert van der Spek et al., Perspective on the hydrogen economy as a pathway to reach net-zero CO₂ emissions in Europe. *Energy Environ. Sci.*, 2022, 15, 1034



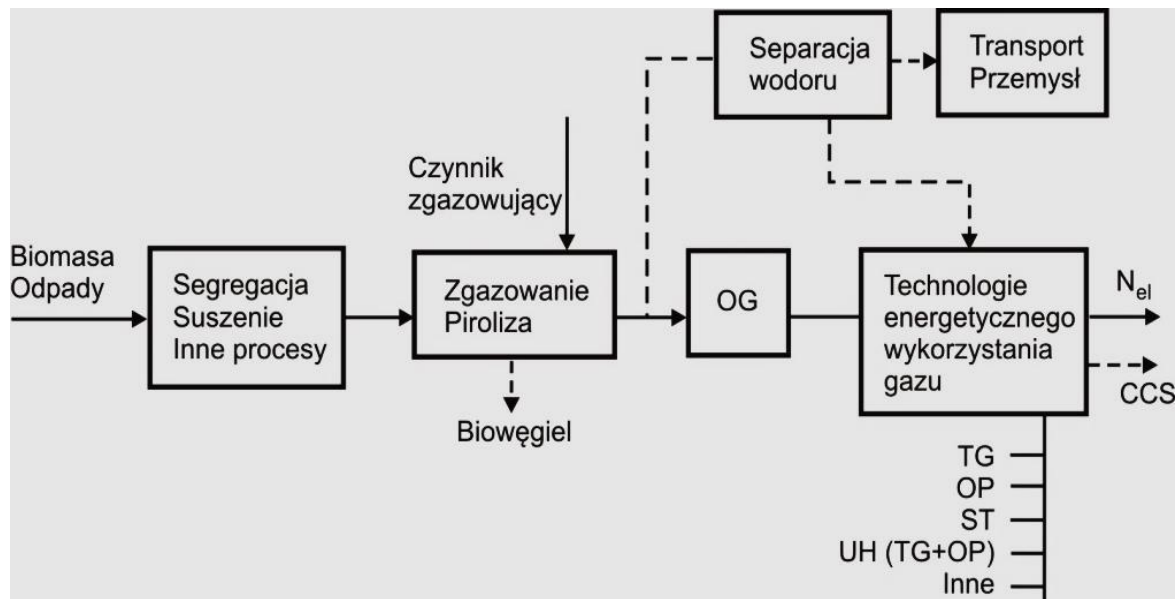
Topologie holenderskich sieci przesyłowych energii elektrycznej (czerwony), wodoru (niebieski) i metanu (zielony) w roku 2050

Binod Koirala et al., Integrated electricity, hydrogen and methane system modelling framework: Application to the Dutch Infrastructure Outlook 2050. *Applied Energy* 289 (2021) 116713



OGÓLNA CHARAKTERYSTYKA TECHNOLOGII c.d.

Układy energetyczne pierwszej grupy omawianej grupy ze zgazowaniem biomasy mieszczą się w schemacie pokazanym na rys. (Chmielniak, 2022, Primus et al., 2021). W schemacie pokazanym na rys. mieszczą się bardzo zróżnicowane układy energetyczne, które mogą spełniać ważne funkcje w podnoszeniu sprawności energetycznej i ekonomicznej konwersji biomasy i odpadów oraz w ograniczaniu emisji ditlenku węgla.

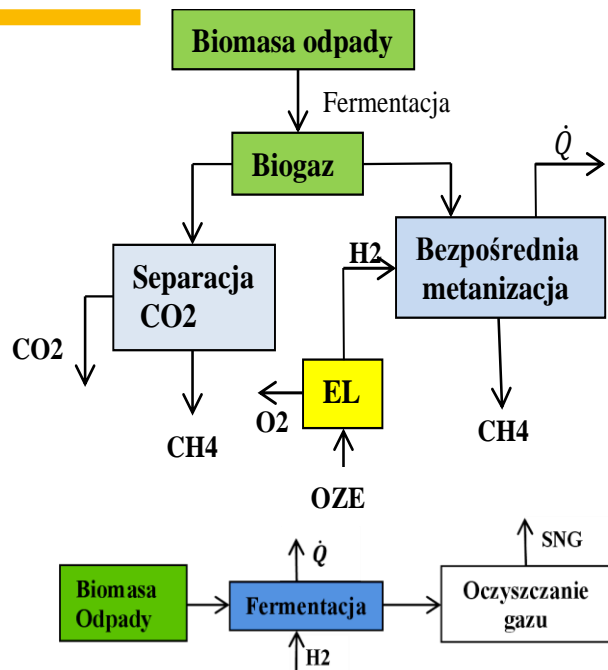


Rys. Ogólna koncepcja energetycznego wykorzystania biomasy i odpadów z separacją lub bez separacji ditlenku węgla.

Primus A., Chmielniak T., Rosik-Dulewska Cz., Concepts of energy use of municipal solid waste, Archives of Environmental Protection ,Vol. 47 no. 2 pp. 70–80, 2021; Chmielniak Tadeusz, Technological structures of hydrogen energetics. Prace Katedry MIUE Pol. Śląskiej - 14 th INTERNATIONAL CONFERENCE ON BOILER TECHNOLOGY. POLAND 2022



BIOGAZ - WODÓR

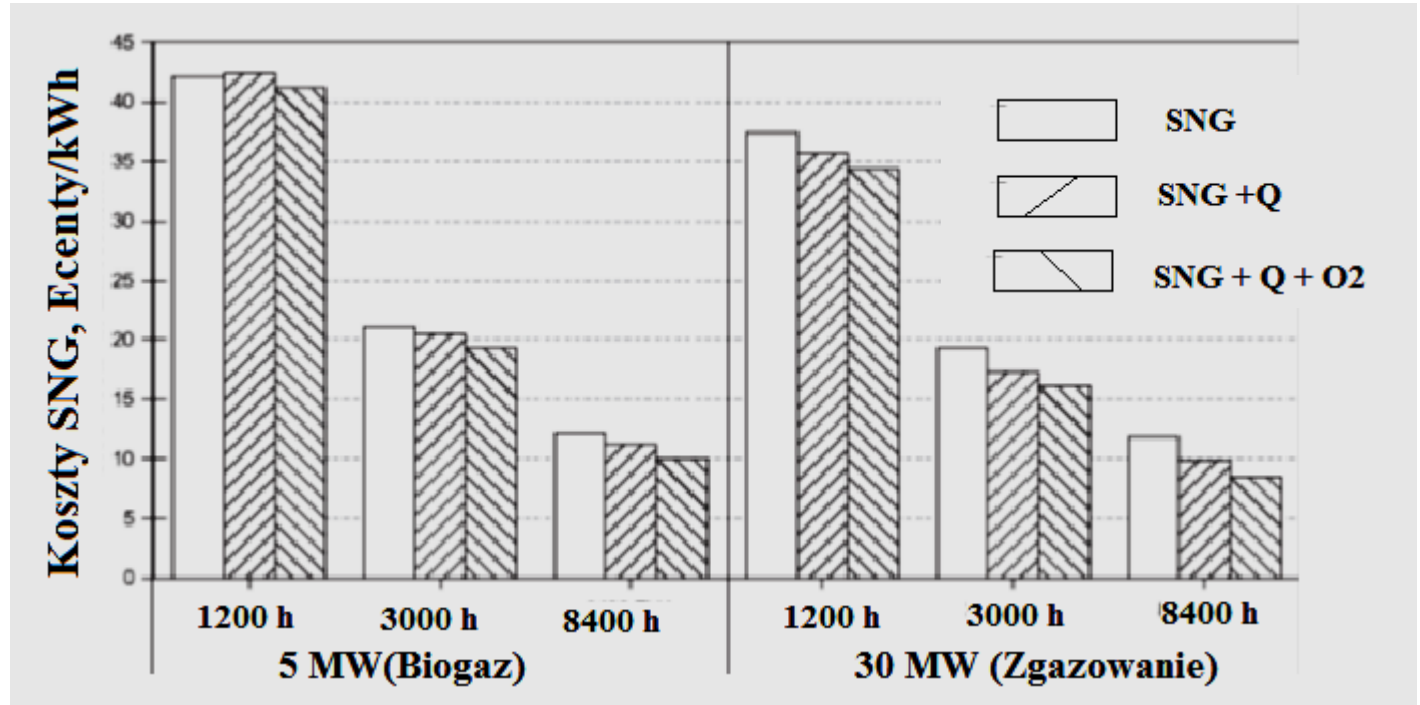


Rodzaj technologii	Biogaz - Separacja CO2	Biogaz + wodór	Uwagi
<i>Strumienie masy, kg/h</i>			
Biogaz do procesu	610	610	
Biogaz do palnika katalicznego	78	-	
Wodór do procesu metanizacji	-	67.2	
Woda do elektrolizera	-	603	
Sorbent	7750	-	30% K2CO3
Ditlenek węgla	387.3	-	
Biometan	216.3	369.6	
<i>Bilanse energii, MW</i>			
Biometan, MW _{LHW}	2.95	4.81	
Ciepło, MW _t	0,201	0,154	
Elektrolizer PM	-	4.03	
Inne potrzeby	0.081	0.087	
<i>Sprawność, %</i>	87	68	

A. Perna, M Minutillo, and A. Sorce, Design and Modelling of Technologies for Upgrading and Direct Methanation of biogas: energy analysis and economic assessment . *E3S Web of Conferences* 238, 03002 (2021) 100 RES 2020



KOSZTY SNG

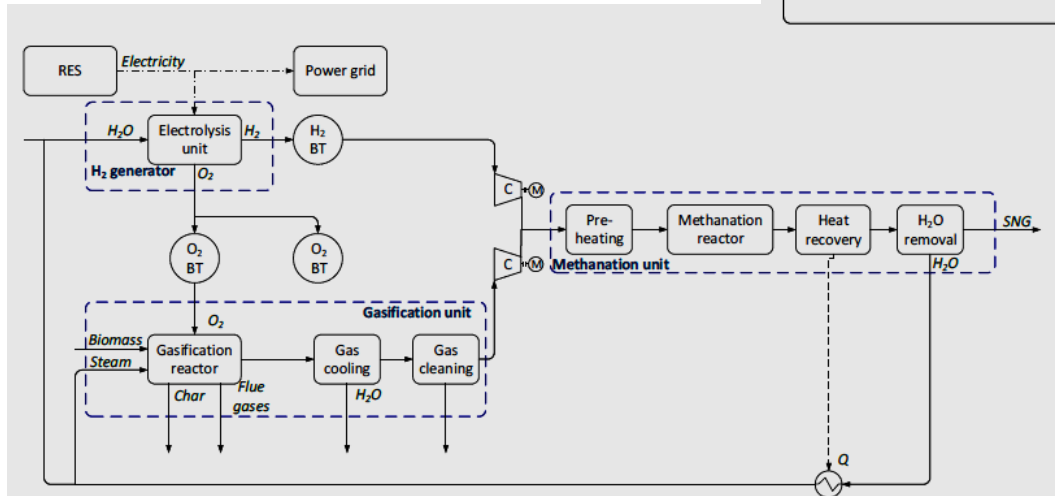
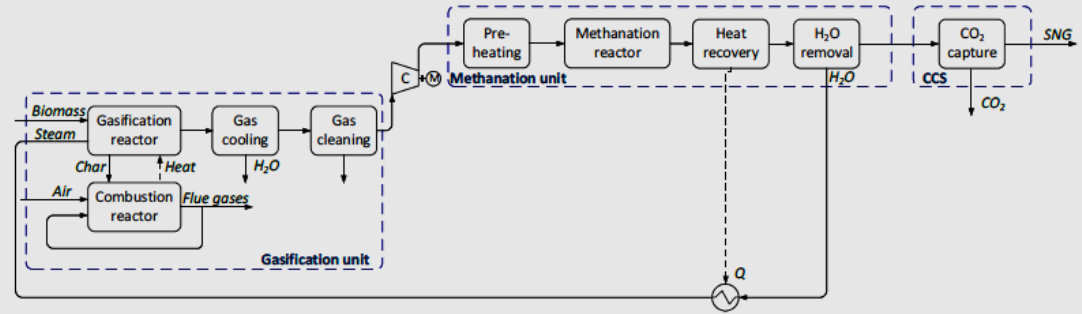


M. Goetz , et al., Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review. *Renewable Energy* 85 (2016) 1371-1390

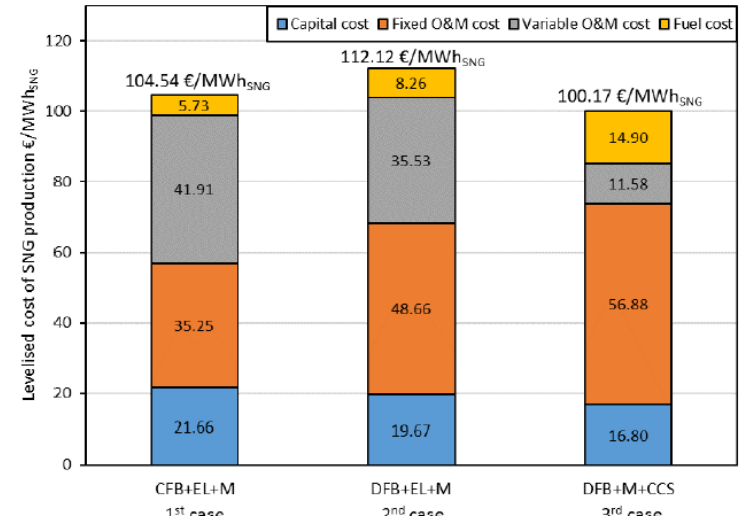


KOSZTY C.D.

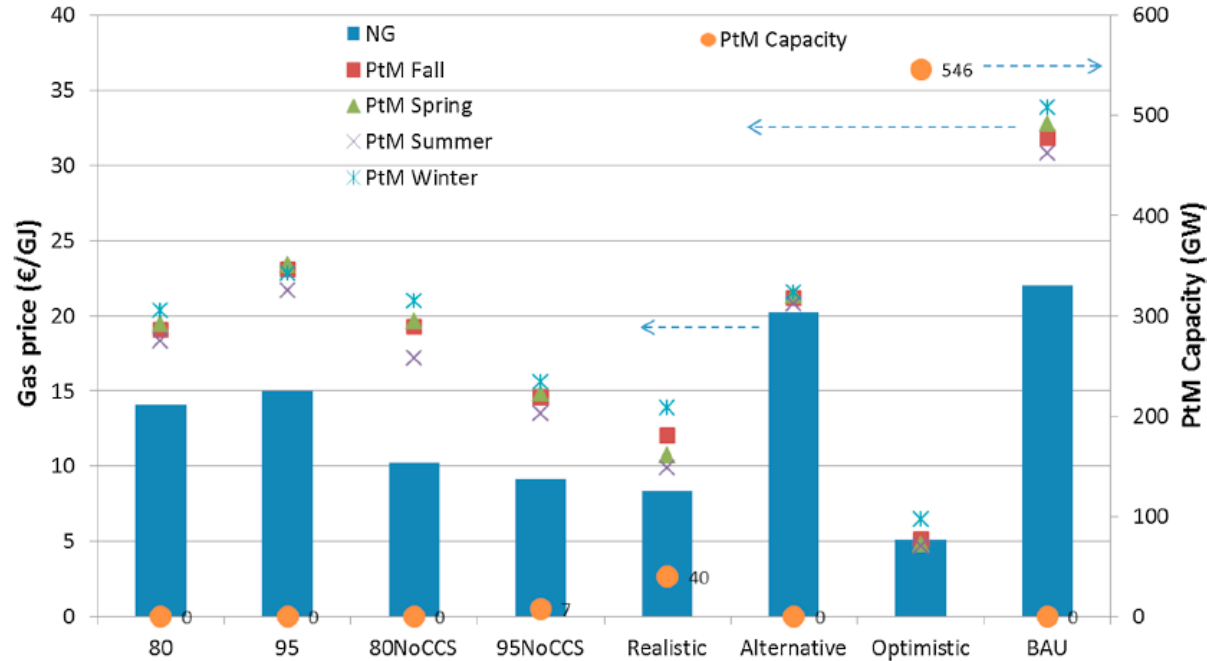
$$\dot{m}_B = 100 \text{ kg/h}$$



D. KATLA, Research on the potential of electrolysis and gasification of solid fuels for the production of synthetic natural gas in a polygeneration system. Doctoral Thesis in Environmental Engineering, Mining and Energy Silesian University of Technology, Gliwice, Poland, 2023

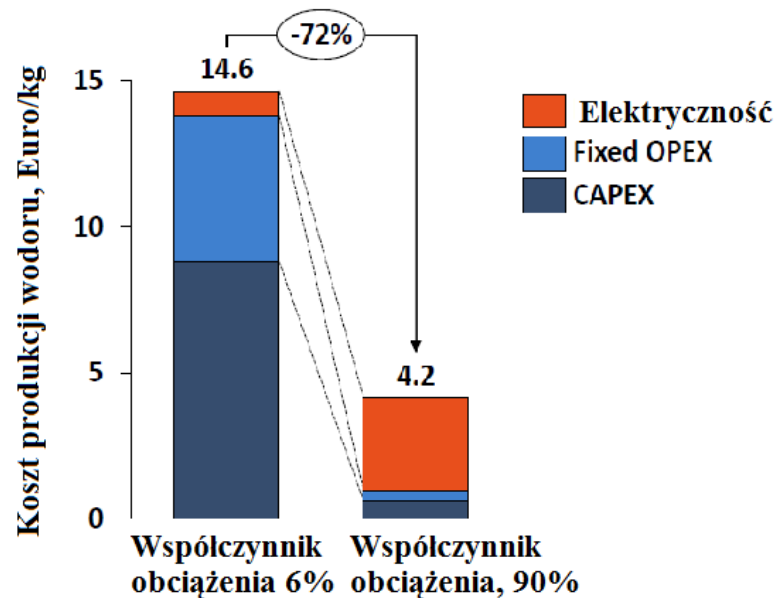
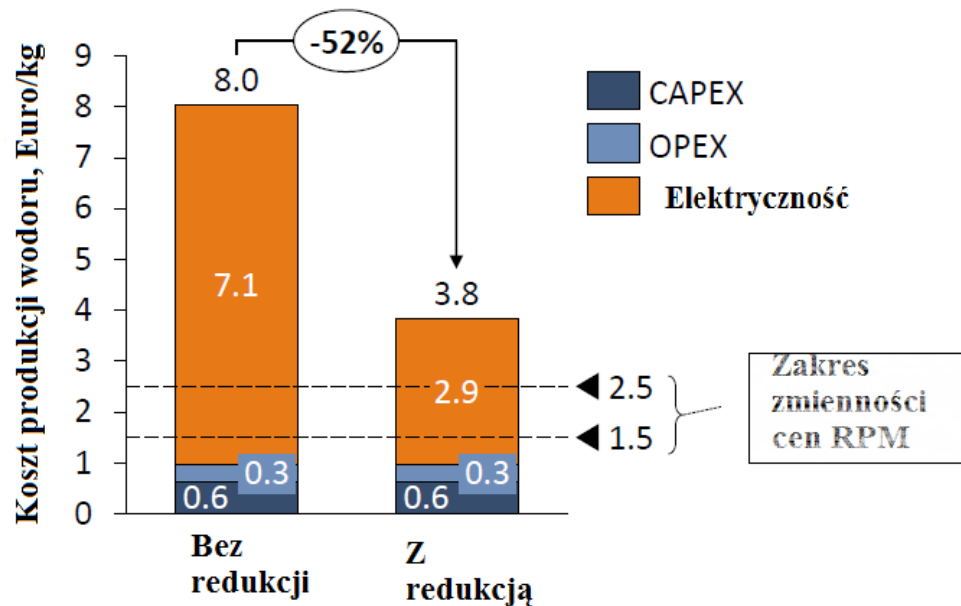


KOSZTY C.D.



Herib Blancoa ert al., Potential of Power-to-Methane in the EU energy transition to a low carbon system using cost optimization. Applied Energy 232 (2018) 323–340

Koszty produkcji wodoru



REFHYNE. Clean Refinery Hydrogen for Europe. D7.2 Brief summary report on initial policy implications of the bulk electrolyser model, Dezember 2020, <https://refhyne/>

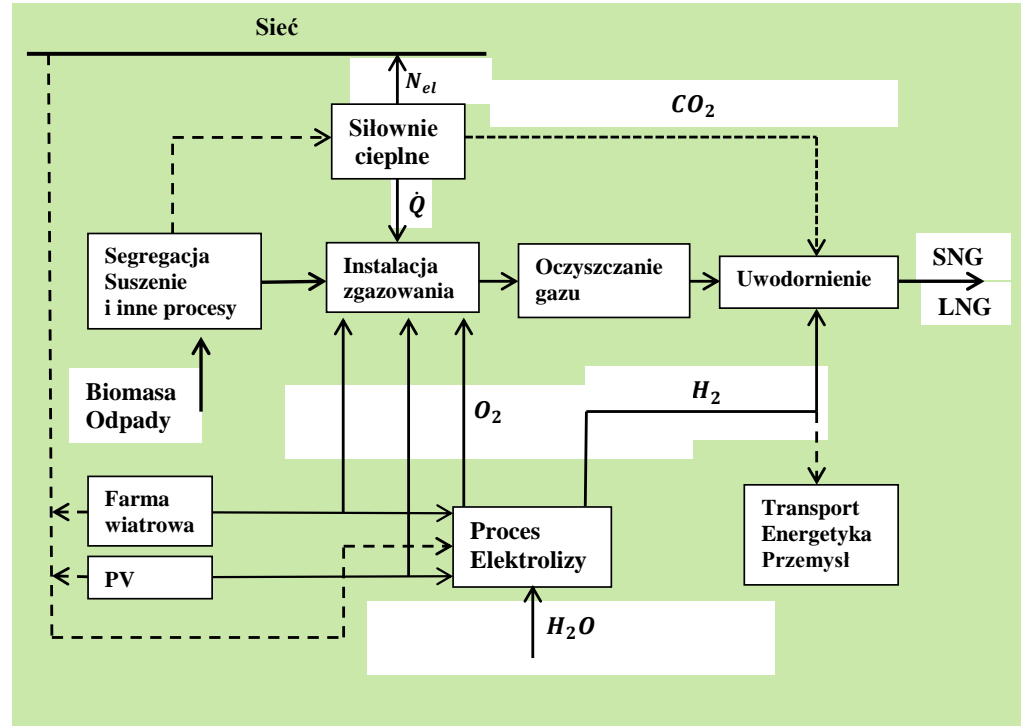
Koszty produkcji wodoru c.d.

- Dla niskiego współczynnika obciążenia obserwujemy niski udział kosztów elektryczności w koszcie produkcji wodoru, wysoki jest natomiast udział kosztów inwestycyjnych i stałych kosztów operacyjnych
- Wysoki stopień obciążenia – niski udział kosztów inwestycyjnych i operacyjnych, wysoki elektryczności
- Wpływ zmienności cen elektryczności jest zależny od stopnia obciążenia, dla niskiego stopnia pojawienie się cen ujemnych nie rekompensuje zazwyczaj wysokiego udziału kosztów inwestycyjnych i operacyjnych w kosztach produkcji wodoru



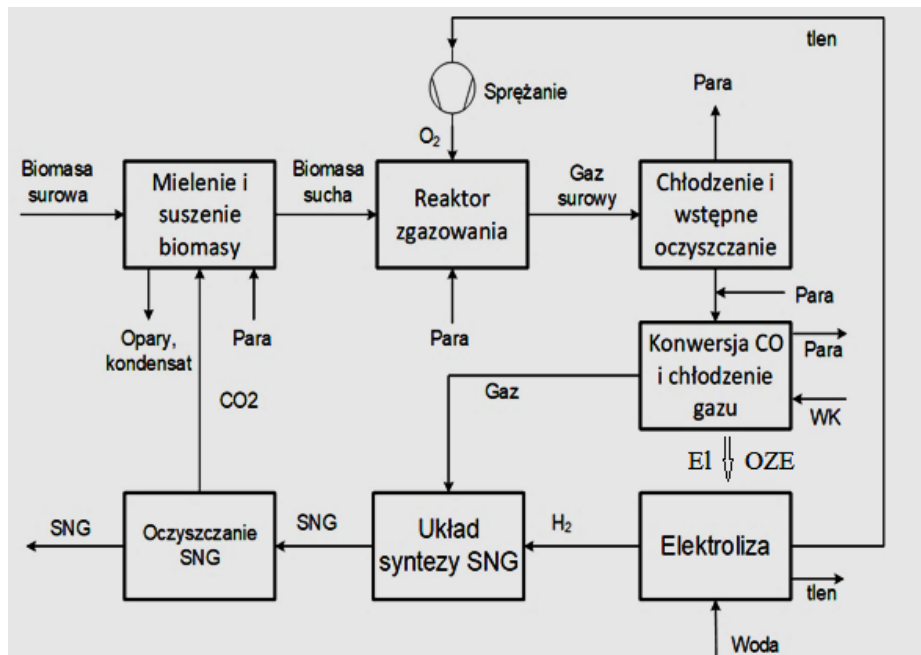
STUDIUM PRZYPADKU

Wiele z proponowanych i analizowanych w literaturze układów energetycznych z generacją wodoru i z ujemną emisją ujmuje pokazana na rys. ogólna struktura technologiczna (Chmielniak, 2022). Generowany w procesie spalania tlenowego gazu syntezowego ditlenek węgla jest wykorzystywany do metanizacji wodoru. Gaz syntezowy po oczyszczeniu zasila ogniwo paliwowe. Strumień opuszczający ogniwo jest spalany tlenowo, a spaliny wykorzystywane w układzie gazowo – parowym. Strumień spalin z turbiny gazowej o wysokim stężeniu ditlenku węgla jest kierowany do modułu separacyjnego.



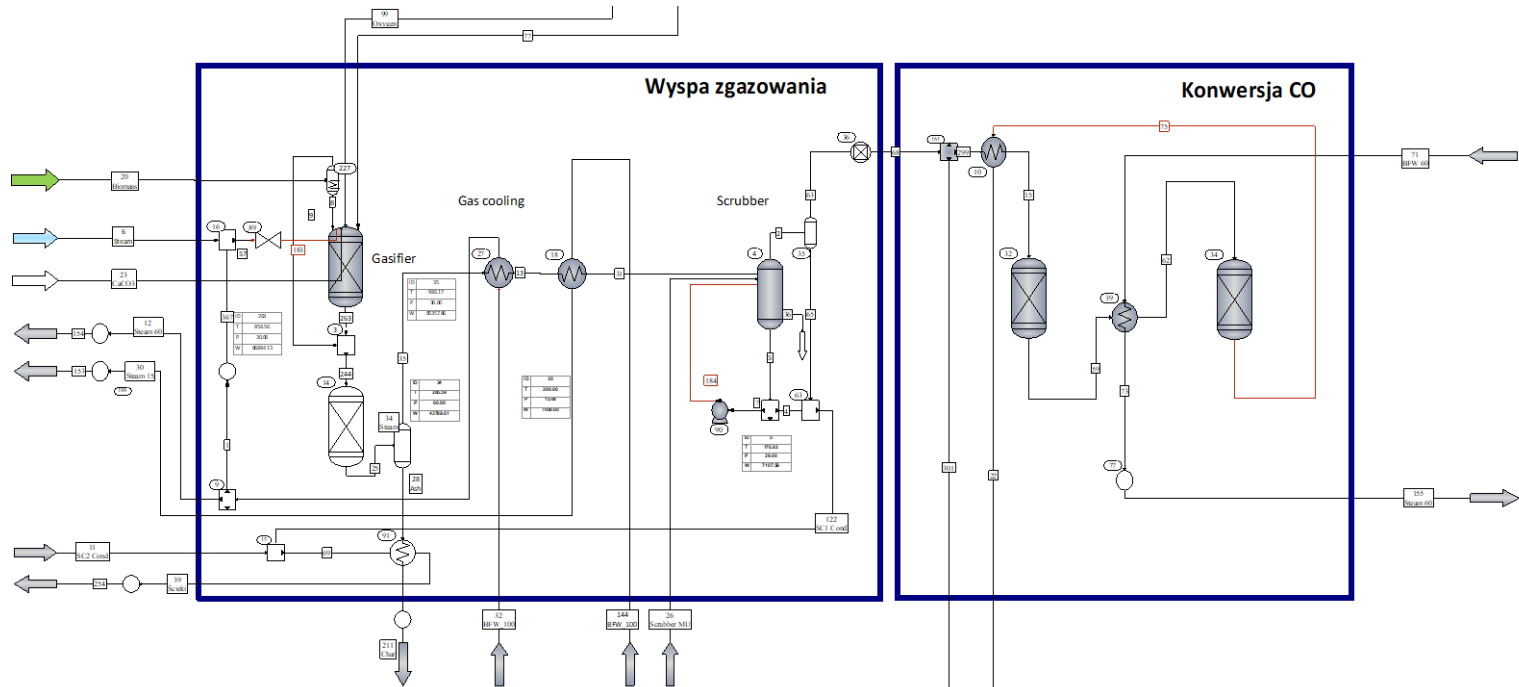
Chmielniak Tadeusz, Technological structures of hydrogen energetics. Prace Katedry MIUE Pol. Śląskiej - 14th INTERNATIONAL CONFERENCE ON BOILER TECHNOLOGY. POLAND 2022

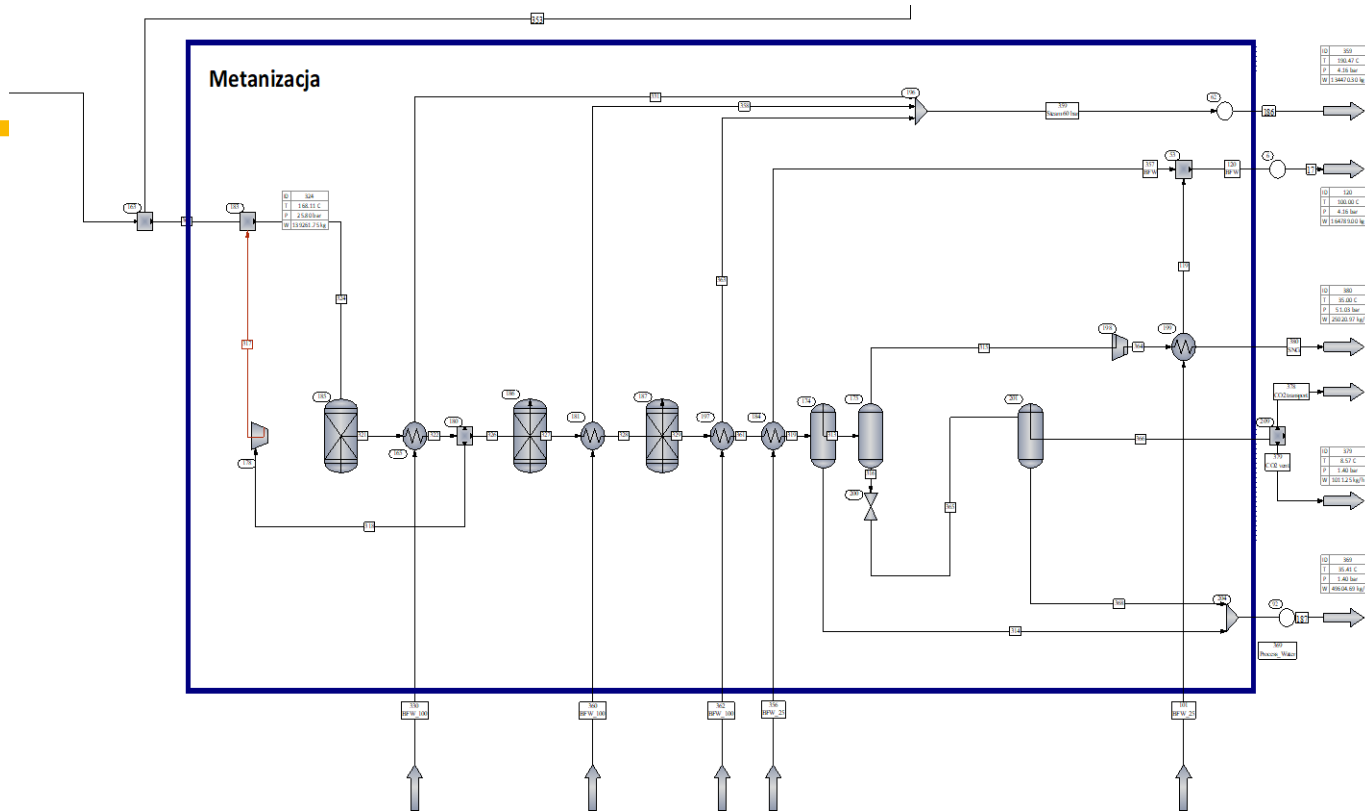
STUDIUM PRZYPADKU C.D.



Szczegółowej analizie poddano układ nieco uproszczony (bez modułu spalania biomasy) z reaktorem zgazowania biomasy , elektrolizerem i reaktorem metanizacji. Głównym celem było określenie podstawowych bilansów substancji i energii dla układu dużej mocy. Analizowano bowiem układ z komercyjnym układem zgazowania o przepływie biomasy przekraczającej 64 tony/h

Studium przypadku c.d.





Q1	300
T	130.47 C
P	4.76 bar
M	1.944 t(33.7 MJ)

Q1	100
T	130.00 C
P	4.76 bar
M	1.944 t(33.7 MJ)

Q1	300
T	81.00 C
P	1.51 bar
M	2.922 t(51.4 MJ)

Q1	378
T	8.57 C
P	1.46 bar
M	7.762 t(137.6 MJ)

Q1	378
T	8.57 C
P	1.46 bar
M	7.762 t(137.6 MJ)

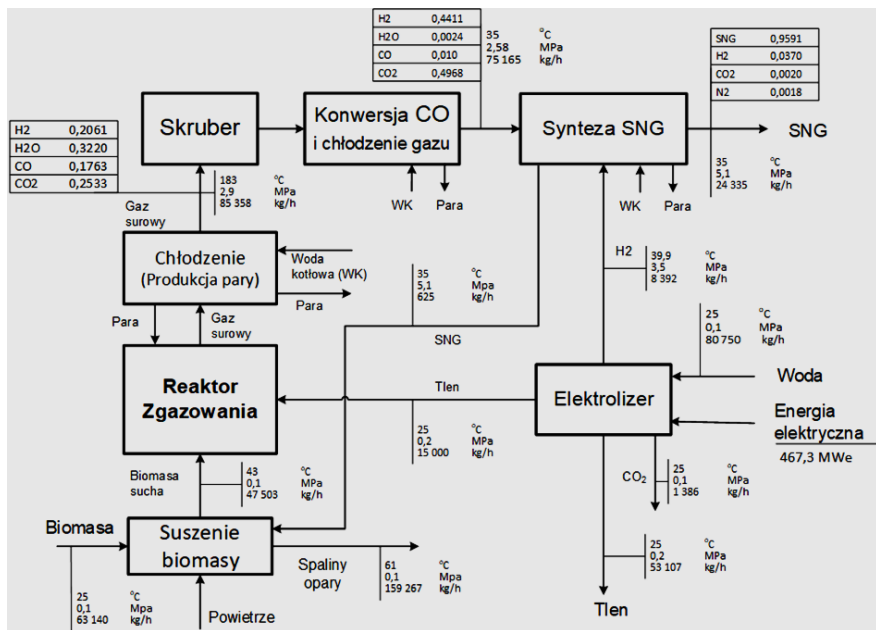
Q1	300
T	81.41 C
P	1.46 bar
M	4.48 t(78.5 MJ)

Stream No.	300
Name	DMG
Flow	→ 0.00 kg/h
Mass flow (kg/h)	15.75 307.6
Temp. C	81.0000
Press. bar	1.1 0000
Pressure (bar)	5.52 40 004
Temp. K	354.15
Mass. kg/s	4.37 51 044
Component molar	
Carbon	0.00000
Hydrogen	1.146 204
Nitrogen	0.181 383
Oxygen	0.00000
Sulfur	0.00000
Water	0.00000
Micro Oxide	0.00000
Carbon Monoxide	0.001 676
Carbon Dioxide	0.170 704
Propane Sulfide	0.00000
Carbon Sulfide	0.00000
Sulfur Oxide	0.00000
Molar Mass	58.21 621 5
Hydrogen	0.00000
Ammonia	0.00000
Ethane	0.00000
Ethene	0.00000
Butane	0.00000
Propane Oxide	0.00000
Propane Sulfide	0.00000
Methanol	0.00000
Ethanol	0.00000
Acetic Acid	0.00000
Carbon Dioxide	0.00000

Studium przypadku c.d.



BILANSE



Strumień	t [oC]	p [bar]	Przepływ masowy [kg/h]	entalpia chemiczna [MW]	entalpia fizyczna [MW]	entalpia razem [MW]
Biomasa	25,0	1,0	63 140,0	242,39	0,00	242,4
Woda elektrolizer	25,0	1,0	80 750,0		0,00	0,0
CaCO3	25,0	40,0	453,0		0,00	0,0
Powietrze	25,0	1,0	136 887,6		0,00	0,0
Woda kotłowa	25,0	4,5	215 844,2		0,03	0,0
Woda chłodząca	15,0	4,5	89 323,4		-1,03	-1,0
Energia elektryczna						467,3
Total Input			586 398,2	242,4	-1,0	708,7
SNG	35,0	51,0	24 335,0	374,9	-0,16	374,7
Tlen	25,0	35,0	53 107,4		-0,12	-0,1
Para - 4,5	164,7	4,2	52 847,1		39,33	39,3
Para - 15	200,0	15,0	7 000,0		5,23	5,2
Para - 60	292,0	59,7	119 151,2		91,10	91,1
Woda kotłowa	101,7	4,2	19 845,3		1,77	1,8
Woda chłodząca	26,0	4,2	89 324,0		0,11	0,1
Woda elektrolizer	25,1	35,0	4 250,0		0,00	0,0
Popiół	25,0	1,0	1 526,4		0,00	0,0
Ścieki	99,6	1,0	54 358,2		7,22	7,2
Spaliny/opary	60,8	1,0	159 267,2		14,93	14,9
CO2_zrzut	8,6	1,4	1 386,4		-0,01	0,0
Straty						174,4
Total output			586 398,2	374,9	159,4	708,7
Sprawność	72%					



Wybrane instalacje demonstracyjne

REFHYNE. Clean Refinery Hydrogen for Europe, 10 MW PME , cel 100 MW – Shell (REFHYNE. *REFHYNE Project 10 MW Electrolyser Rhineland Refinery—General Overview*; Fuel Cells and Hydrogen Joint Undertaking: Brussels, Belgium, 2018, REFHYNE. Partners. 2021. Available online: <https://refhyne.eu/about/partners/> (accessed on 8 March 2021))

Greenlab P2X 12MW & GreenHyScale 100 MW (Large-scale EU co-funded P2X project consisting of a 100 MW electrolysis plant aiming to demonstrate production using 17 of our HyProvide® X1200 starting with a 12 MW P2X plant).

Deutsche Energie-Agentur-Strategieplattform Power to Gas, Audi E-Gas Projekt. 2021.
(6000 kW) Catalytic methanation

HELMETH (Kalsruhe, Germany SOEL (15 kW) Catalytic methanation)

Tauron- KIC InnoEnergy (Strumień CO₂ – 4,5 Nm³/h Strumień H₂ – 18,0 Nm³/h Temperatura procesowa – 300–350°C Ciśnienie gazu – do 15 b . Produkcja metanu – 4,4 Nm³/h

Manuel Baileraa, et al., Power to Gas projects review: Lab, pilot and demo plants for storing renewable energy and CO₂, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 69 (2017) 292–312



UWAGI KOŃCOWE

- **Wodór, mimo wielu zgłaszanych wątpliwości, jest uważany za ważny nośnik energii o wysokim potencjale, istotnie wspomagający proces dekarbonizacji całej gospodarki, w tym szczególnie tych jej gałęzi, które trudno poddają się pełnej elektryfikacji (np. transport ciężki, lądowy, morski, lotniczy, wybrane gałęzie przemysłu). Podkreśla to zarówno Strategia wodorowa UE, jak również Polska Strategia wodorowa. Obok najbardziej rozpowszechnionych układów kogeneracyjnych z produkcją wodoru lub bez, przedmiotem analiz i studiów są układy poligeneracyjne (wytwarzanie wodoru elektryczności, ciepła, chłodu, wody użytkowej) o różnej strukturze technologicznej i różnych rodzajach ogniw.**
- **Ważną rolę w osiągnięciu celów klimatycznych mogą odegrać technologie BECCS (BioEnergy with Carbon Capture and Storage, konwersja biosurowców z wychwytywaniem i składowaniem dwutlenku węgla). Ogólny potencjał ujemnej emisji technologii z grupy BECCS ocenia się na 0.5 – 5 GtCO₂/rok (stan osiągnięty w 2050r.) przy cenie 100 – 200 USD/ Mg CO₂. Udział technologii z grupy (BECCS) stanowi od 10 do 20% całkowitego szacowanego efektu wszystkich możliwych przedsięwzięć NET (2050r.),**



UWAGI KOŃCOWE

- **W prezentacji dokonano ogólnej charakterystyki techniczno – ekonomicznych technologii należących lub zbliżonych do klasy BECCS z wykorzystaniem zgazowania oraz biologicznej konwersji biomasy i odpadów ,**
- **Omówiono dostępne w literaturze analizy kosztów generacji SNG, wskazując na ich zróżnicowanie,**
- **Szczegółowej analizie poddano instalację metanizacji dużej mocy, zawierającej moduł zgazowania biomasy, elektrolizer i generator metanu. Podano podstawowe bilanse substancji i energii,**
- **Scharakteryzowano stan technologii generacji wodoru oraz instalacji demonstracyjnych,**



UWAGI KOŃCOWE

- Mimo bogatej literatury przedmiotu dalszego wysiłku badawczego wymaga uzyskanie dojrzałości wdrożeniowej nowych koncepcji generacji i wykorzystania nowych paliw z wykorzystania biomasy i odpadów, zwłaszcza dużej mocy,
- Konieczne są dalsze studia metodologiczne umożliwiające optymalizację sposobów integracji różnych modułów technologicznych w złożonych instalacjach BECCS z różnymi źródłami energii i źródłami ditlenku węgla,
- W Polsce w wielu ośrodkach prowadzi się badania różnych modułów wchodzących w instalacje klasy BECCS (elektrolizerów, ogniw paliwowych, zgazowania biomasy i odpadów, składowania ditlenku węgla), a także przeprowadza analizy systemowe układów integrujących te moduły. Brak jest jednak szerszej koordynacji tych badań, koniecznej choćby ze względu na przygotowanie know – how oraz przyśpieszenie aplikacji przemysłowych. Jest celowym sformułowanie odpowiedniego programu strategicznego, którego jednym z celów byłoby przygotowanie i budowa odpowiednich instalacji demonstracyjnych.



Dziękuję za uwagę

tadeusz.chmielniak@polsl.pl

