

*Life cycle assessment review of biohydrogen production  
in biogas reforming process*

## Przegląd oceny cyklu życia produkcji biowodoru w procesie reformingu biogazu



*Life cycle assessment of H<sub>2</sub> prodn. by biogas reforming was comprehensively reviewed. In most cases, researchers reported that the LCA takes into account biogas prodn., reforming, construction, and decommissioning. The assessment showed that the anaerobic digestion plant is the most important subsystem in the entire life cycle. It converts both MeH and CO<sub>2</sub> from biogas into H<sub>2</sub>. Despite the fact the largest energy demand came from the H<sub>2</sub> prodn. plant, the biogas reforming process was generally beneficial. According to the life cycle assessment (LCA), the biogas-to- H<sub>2</sub> system is highly efficient and environmentally friendly.*

**Keywords:** biogas reforming, hydrogen, life cycle

Kompleksowo przeanalizowano ocenę cyklu życia (LCA) produkcji H<sub>2</sub> w procesie reformingu biogazu. W większości przypadków badacze przyjmują, że LCA uwzględnia produkcję biogazu, reforming, budowę instalacji i jej wycofanie z eksploatacji. Technologia reformingu biogazu jest jedną z najskuteczniejszych obecnie dostępnych technologii do zagospodarowania biogazu. Przekształca zarówno CH<sub>4</sub>, jak i CO<sub>2</sub> z biogazu w H<sub>2</sub>. Zgodnie z LCA proces reformingu biogazu do wodoru jest wysoce wydajny i przyjazny dla środowiska. Z tego powodu promowane jest wykorzystanie biogazu do zrównoważonej produkcji wodoru.

**Słowa kluczowe:** reforming biogazu, wodór, cykl życia

Przeciwdziałanie zmianom klimatycznym wymaga poważnych zmian w zużyciu energii i materiałów oraz w systemach zaopatrzenia<sup>1,2)</sup>. Pozwoli to zapewnić ludziom dobrobyt przy jednoczesnym zmniejszeniu wpływu na środowisko. Kluczowe strategie obejmują waloryzację energii z odpadów<sup>3)</sup>, wprowadzenie zasad gospodarki o obiegu zamkniętym i przejście z paliw kopalnych na odnawialne źródła energii, takie jak wodór, który może służyć zarówno jako wszechstronne paliwo, jak i nośnik energii w różnych sektorach gospodarki<sup>4)</sup>. Wodór ma kluczowe znaczenie dla osiągnięcia celu, jakim jest neutralność pod względem emisji ditlenku węgla do 2050 r.<sup>5)</sup> a biogaz, wytwarzany w wyniku fermentacji beztlenowej odpadów organicznych<sup>6, 7)</sup>, oferuje potencjał do produkcji tzw. odnawialnego (zielone-

go) wodoru<sup>8)</sup>. Chociaż biogaz wykorzystywany jest głównie do produkcji energii elektrycznej i ciepłej, to jego rola w produkcji wodoru jest obiecująca, zwłaszcza w zakresie gospodarki obiegu zamkniętego w sektorze rolnym<sup>9)</sup>.

### Reforming biogazu i produkcja wodoru

Produkcja wodoru w procesie reformingu biogazu obejmuje trzy kluczowe etapy: wytwarzanie gazu syntezowego (SG) poprzez reforming parowy, reakcje konwersji gazu wodnego (WGS) i oczyszczanie gazu. W procesie reformingu parowego biogaz jest przekształcany katalitycznie w gaz syntezowy, składający się głównie z H<sub>2</sub>, CO, CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub>, przy czym proces ten jest wysoce endotermiczny. Następnie



Mgr inż. Mamo ABAWALO (ORCID: 0000-0003-0663-2992) jest doktorantem w Szkole Doktorów Politechniki Śląskiej w Gliwicach.



Prof. dr hab. inż. Krzysztof PIKOŃ (ORCID 0000-0003-1589-7247) w roku 1993 ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Energetycznym Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Jest kierownikiem Katedry Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Specjalność – inżynieria środowiska i energetyka.

\* Adres do korespondencji:

Katedra Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów, Politechnika Śląska w Gliwicach, ul. Konarskiego 18, 44-100 Gliwice, e-mail: mamo.abawalo@polsl.pl

w reaktorze WGS CO i H<sub>2</sub>O przekształcane są w dodatkowy wodór oraz CO<sub>2</sub>, a strumień gazów poddawany jest oczyszczaniu za pomocą adsorpcji zmiennociśnieniowej (PSA) lub separacji membranowej, w wyniku których otrzymuje się wodór o wysokiej czystości. Separacja membranowa jest coraz bardziej preferowana ze względu na niskie zużycie energii i zdolność do osiągnięcia ponad 99-proc. czystości końcowego produktu<sup>10)</sup>.

Reforming biogazu zyskał na popularności jako metoda produkcji odnawialnego wodoru, która pomaga osiągnąć cele UE w zakresie dostaw wodoru do 2030 r. Do jego produkcji szczególnie przydatny jest biogaz wytwarzany z odpadów rolniczych. Odpowiednia zawartość wilgoci i CO<sub>2</sub>, które wspomagają reakcje reformingu parowego i suchego, czyni go bardziej zrównoważoną alternatywą dla tradycyjnego spalania. Badania wykazały znaczną poprawę uzysku wodoru dzięki technologiom, takim jak reaktory membranowe z palladem i srebrem, które w zoptymalizowanych warunkach zwiększają jego odzysk i czystość. Ostatnie badania nad reformingiem parowym biogazu przy wyższych współczynnikach konwersji i odzysku wodoru osiągniętych przy określonych ustawieniach ciśnienia i temperatury z zastosowaniem zaawansowanych reaktorów membranowych wykazały poziom czystości wodoru do 96%. Jednak mimo że reforming biogazu przynosi korzyści dla środowiska i stanowi spory potencjał w zakresie produkcji zielonego wodoru, to nadal istnieją wyzwania technologiczne, którym należy sprostać, aby z powodzeniem wdrożyć go na dużą skalę<sup>11, 12)</sup>.

## LCA produkcji wodoru z reformingu biogazu

LCA to znormalizowana metoda oceny wpływu na środowisko i wykorzystania zasobów w całym cyklu życia produktu lub systemu, od pozyskania surowców do utylizacji, zgodnie z definicją zawartą w normach SETAC i ISO<sup>13)</sup>. LCA pomaga zwiększyć efektywność wykorzystania zasobów i zminimalizować ryzyko dla środowiska poprzez analizę wszystkich etapów produkcji, użytkowania i wycofania z eksploatacji<sup>14)</sup>. Metoda ta znalazła szerokie zastosowanie w ocenie procesów bioenergetycznych, chociaż istnieje niewiele badań dotyczących LCA reformingu biogazu do wodoru<sup>15, 16)</sup>. Analiza LCA składa się z czterech etapów: określenia celu i zakresu, inwentaryzacji cyklu życia, oceny oddziaływania na środowisko oraz interpretacji wyników.



Fig. 1. Primary steps and application of the LCA methodology<sup>12)</sup>

Rys. 1. Podstawowe kroki i zastosowanie metodyki LCA

W ostatnim czasie wzrasta zainteresowanie oceną wpływu na środowisko produkcji wodoru w procesie reformingu biogazu za pomocą metodyki LCA, zgodnie z normami<sup>17, 18)</sup>. Pomimo rosnącej liczby badań, nie przeprowadzono kompleksowego przeglądu w celu przeanalizowania i porównania tych badań, a bez skonsolidowanego przeglądu trudno jest zrozumieć pełny wpływ reformingu biogazu na środowisko i zidentyfikować wspólne wyzwania lub obszary wymagające poprawy w systemach przekształcania biogazu w wodór. Battista i współpr.<sup>19)</sup> porównali trzy metody: zastosowanie silników spalinowych z elektrolizą, reforming parowy i proces BioRobur. Ich prace pokazały, że proces BioRobur przewyższa inne metody, oferując mniejsze zużycie energii i zmniejszony potencjał tworzenia efektu cieplarnianego dzięki zaawansowanym systemom katalitycznym i integracji wszystkich procesów. Podkreśla to znaczenie innowacyjnych technologii w poprawie zrównoważonego charakteru produkcji wodoru na bazie biogazu.

Podobnie Di Marcoberardino i współpr.<sup>20)</sup> badali system BIONICO, który stosuje membrany palladowe w reaktorze reformingowym. System wykazał poprawę wydajności o 40–50% w porównaniu z tradycyjnymi metodami, takimi jak autotermiczny i parowy reforming metanu. Jednak efektywność środowiskowa systemu BIONICO zależy w dużym stopniu od ilości zużytej energii elektrycznej, szczególnie w przypadku dużych ilości biogazu. Rozwiązania te sugerują, że chociaż zaawansowane technologie są bardzo obiecujące, ich wpływ na środowisko jest ściśle związany z rodzajem i wydajnością energii elektrycznej wykorzystywanej w tym procesie.

## Analiza LCA w reformingu biogazu

### Określenie celu i zakresu

Badania LCA dotyczące reformingu biogazu mają na celu ocenę wpływu produkcji wodoru na środowisko i zidentyfikowanie ekologicznych „punktów zapalnych” w całym procesie<sup>21)</sup>. Celem jest ocena zrównoważonego charakteru produkcji wodoru na bazie biogazu za pomocą różnych jednostek funkcjonalnych, takich jak kg, m<sup>3</sup> lub kWh,



Dr inż. Marcin LANDRAT (ORCID: 0000-0003-0658-6578) w roku 1998 ukończył studia na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Jest adiunktem w Katedrze Technologii i Urządzeń Zagospodarowania Odpadów na Wydziale Inżynierii Środowiska i Energetyki tej uczelni. Specjalność – gospodarka odpadami.

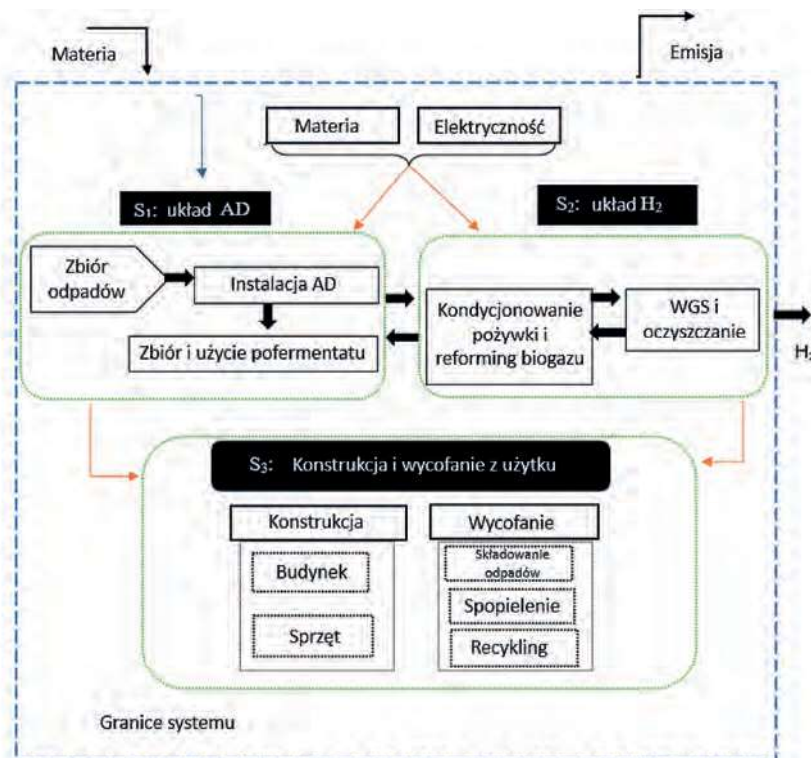


Fig. 2. LCA boundaries of the H<sub>2</sub> production from biogas reforming system<sup>22)</sup>

Rys. 2. Granice LCA produkcji H<sub>2</sub> w procesie reformingu biogazu

do pomiaru wydajności systemu. Na przykład Battista i współpr.<sup>19)</sup> zdefiniowali jednostkę funkcjonalną jako wytwarzającą 4,5 kg/h wodoru o czystości 99,99%, podczas gdy inni stosują 1 kg wodoru, obejmując wszystkie etapy produkcji. Jednostki te umożliwiają porównanie różnych technologii, takich jak proces BioRobur, reforming parowy i systemy ICE+Electrolyser. Granice systemu zazwyczaj są zgodne z podejściem „od kołyski do bramy”, oceniając etapy od dostawy surowców do produkcji wodoru, chociaż

Table 1. Description of the LCA impact parameters used for biogas reforming

Tabela 1. Opis parametrów wpływu LCA stosowanych w reformingu biogazu

Parametr wpływu	Opis <sup>25-29)</sup>	Jednostka
Potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP)	Proces, który prowadzi do wzrostu temperatury w niższych warstwach atmosfery. Dzieje się tak, ponieważ gazy cieplarniane pochłaniają lub odbijają część promieniowania podczerwonego (IR). Kluczowymi gazami cieplarnianymi biorącymi udział w tym procesie są ditlenek węgla (CO <sub>2</sub> ), tlenek węgla (CO), metan (CH <sub>4</sub> ) i tlenki azotu (N <sub>2</sub> O).	1 kg CO <sub>2</sub>
Utlenianie fotochemiczne	Zjawisko, które powoduje wzrost stężenia ozonu w warstwie atmosferycznej zwanej troposferą. Głównymi substancjami chemicznymi odpowiedzialnymi za ten negatywny efekt są ditlenek siarki (SO <sub>2</sub> ), tlenek azotu (NO), a także niemetanowe lotne związki organiczne (NMLZO) i amoniak.	1 kg C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>
Zubożenie warstwy ozonowej (OLD)	Jest spowodowane gazami, takimi jak związki chlorowane i bromowane, m.in. chlorofluorowęglowodór-11 (CFC-11), które mogą modyfikować stratosferyczną warstwę ozonową. Zubożenie to osłabia zdolność warstwy do ochrony przed szkodliwym promieniowaniem UVB, co stanowi poważne zagrożenie dla zdrowia ludzkiego.	1 kg CFC-11
Eutrofizacja	Zjawisko, które powoduje nieprawidłowy wzrost roślin w wyniku gromadzenia się składników odżywczych w środowisku. Głównymi substancjami chemicznymi odpowiedzialnymi za ten negatywny efekt są fosfor (P) i tlenki azotu (NO <sub>x</sub> ), azotany i amoniak (NH <sub>3</sub> ), które mogą gromadzić się w powietrzu lub wodzie.	1 kg PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>
Zakwaszenie	Proces, który prowadzi do szkodliwych skutków dla środowiska w skali regionalnej, takich jak kwaśne deszcze i zahamowanie wzrostu roślinności. Głównymi substancjami chemicznymi przyczyniającymi się do tego efektu są ditlenek siarki (SO <sub>2</sub> ), tlenki azotu (NO <sub>x</sub> ) i amoniak (NH <sub>3</sub> ).	1 kg SO <sub>2</sub>
Zapotrzebowanie na energię brutto (GER)	Zapotrzebowanie na energię brutto (GER) mierzy całkowite zapotrzebowanie na energię wszystkich czynności i materiałów zaangażowanych w proces. Oblicza się ją poprzez zsumowanie wkładów, które określa się poprzez pomnożenie masy każdego konkretnego surowca przez jego wartość opałową brutto <sup>19)</sup> .	MJ

niektóre badania przyjmują perspektywę „od kołyski do grobu”, w tym wykorzystanie wodoru<sup>22)</sup>. Kluczowe procesy obejmują S<sub>1</sub> – zbiórkę odpadów, fermentację beztlenową, S<sub>2</sub> – reforming biogazu oraz S<sub>3</sub> – budowę/likwidację instalacji, przy czym produkty pofermentacyjne są często wykorzystywane jako nawozy organiczne w celu dalszego zmniejszenia wpływu na środowisko. Granice systemu, przedstawione na rys. 2, wybrano w taki sposób, aby uwzględnić wszystkie kroki niezbędne do działania całego systemu.

### Analiza zbioru danych w cyklu życia (LCI)

Whiting i Azapagic<sup>23)</sup> dostarczyli dane na temat produkcji biogazu z beztlenowej fermentacji na potrzeby wytwarzania energii elektrycznej i ciepła, a dane operacyjne reformingu uzyskali za pomocą symulacji Aspen Plus. Dane dotyczące surowca i operacji dostarczyli właściciele gospodarstw, natomiast wymagania dotyczące materiałów budowlanych zwiększono z 300 m<sup>3</sup> do 800 m<sup>3</sup> instalacji fermentacji beztlenowej<sup>24)</sup>. Uwzględniono również informacje dotyczące masy jednostkowej reformera i systemu katalizatora. Faza oceny wpływu cyklu

życia (LCIA) ocenia wpływ produkcji wodoru na środowisko, wykorzystując oprogramowanie, takie jak SimaPro i Gabi z metodologiami charakterystyki, takimi jak ReCiPe 2016 i CML<sup>25)</sup>. Wpływy te są klasyfikowane jako zdrowie człowieka, ekosystemy i zasoby.

### Ocena wpływu cyklu życia (LCIA) reformingu biogazu

Główne kategorie oddziaływania wykorzystane w badaniu LCA w kontekście reformingu biogazu to<sup>26-29)</sup>: poten-

Table 2. Main inventory data (per 1 kg H<sub>2</sub>) of subsystems 1 and 3<sup>12)</sup>

Tabela 2. Główne dane inwentaryzacyjne (na kg H<sub>2</sub>) podsystemów 1 i 3<sup>12)</sup>

Dane		Wartość
<b>Wejściowe</b>		
<b>Konstrukcja</b>		
Beton, g	(S3)	500,47
Wzmacniana stal, g	(S3)	18,18
Chromowana stal, g	(S3)	2,18
Miedź, g	(S3)	0,20
Laminowane drewno, g	(S3)	9,22
Tworzywo HDPE, g	(S3)	0,08
Wysokoudarowy polistyren (HIPS), g	(S3)	0,95
Tworzywo PVC, g	(S3)	0,13
Guma syntetyczna, g	(S3)	0,51
<b>Instalacja AD</b>		
Obornik, kg	(S1)	25,51
Kiszonka kukurydziana, kg	(S1)	8,50
Korytka paszowe, kg	(S1)	8,50
Serwatka serowa, kg	(S1)	8,50
Prąd, kJ	(S1)	4054,96
<b>Wyjściowe technologiczne</b>		
Poferment, kg	(S1)	42,82
Biogaz, Nm <sup>3</sup>	(S1)	7,18
<b>Wyjściowe do środowiska</b>		
CO <sub>2</sub> , biogeny, g	(S1)	90,42
CH <sub>4</sub> , biogeny, g	(S1)	284,19
NH <sub>3</sub> , g	(S1)	40,45
<b>Unikane produkty</b>		
Nawóz potasowy, g	(S1)	67,23
Nawóz fosforowy, g	(S1)	179,84
Nawóz azotowy, g	(S1)	57,81

cjał globalnego ocieplenia (GWP), zubożenie warstwy ozonowej (OLD), utlenianie fotochemiczne, zakwaszenie, eutrofizacja i globalne zapotrzebowanie na energię (GER), których najistotniejsze cechy podsumowano w tabeli 1.

### Interpretacja wyników LCA

Według Hajjaji i współpr.<sup>14)</sup> główne dane inwentaryzacyjne dotyczące produkcji wodoru z systemu reformingu biogazu, wyszczególnione w tabelach 2 i 3, stanowią kluczowy wynik analizy cyklu życia przeprowadzonej w tym badaniu.

W tabeli 4 przedstawiono wyniki charakterystyki ILCD (The International Reference Life Cycle Data System) dla produkcji 1 kg wodoru, z uwzględnieniem pięciu kluczowych kategorii wpływu: potencjał zubożenia abiotycznego (ADP), potencjał tworzenia efektu cieplarnianego (GWP), potencjał zakwaszenia (AP), potencjał eutrofizacji (TEP – potencjał eutrofizacji łądu, FEP – potencjał eutrofizacji wód śródlądowych, MEP – potencjał eutrofizacji wód morskich) oraz skumulowane zapotrzebowanie na energię (CED), zarówno dla zasobów nieodnawialnych, jak i odnawialnych.

System reformingu biogazu emituje ok. 5,59 kg ekwiwalentu CO<sub>2</sub> na kilogram wyprodukowanego wodoru, przy

Table 3. Main inventory data (per 1 kg H<sub>2</sub>) of subsystems 2 and 3<sup>12)</sup>

Tabela 3. Główne dane inwentaryzacyjne (na 1 kg H<sub>2</sub>) podsystemów 2 i 3<sup>12)</sup>

Dane		Wartość
<b>Wejściowe</b>		
<b>Kondycjonowanie pożywki i reforming biogazu</b>		
Woda, kg	(S2)	7,58
Powietrze, kg	(S2)	19,12
Biogaz, Nm <sup>3</sup>	(S2)	7,18
Prąd, kJ	(S2)	1952,82
<b>Budowa</b>		
<b>Budynek</b>		
Beton, g	(S3)	227,90
Żelazo, g	(S3)	0,89
Stal, g	(S3)	72,81
Aluminium, g	(S3)	0,60
<b>Sprzęt</b>		
<b>Kondycjonowanie pożywki i reforming biogazu</b>		
Żeliwo, mg	(S3)	0,64
Stal, mg	(S3)	0,72
Alumina, mg	(S3)	0,96
Stal wysokostopowa, mg	(S3)	2,78
Stal niskostopowa, mg	(S3)	0,30
<b>WGS i oczyszczanie</b>		
Stal, mg	(S3)	4,00
Nikiel, mg	(S3)	0,15
Żeliwo, mg	(S3)	0,66
Żelazo, mg	(S3)	1,65
Alumina, mg	(S3)	2,13
Aluminium, mg	(S3)	1,12
Stal wysokostopowa, mg	(S3)	0,13
<b>Wyjściowe do środowiska</b>		
CO <sub>2</sub> , biogeny, kg	(S1)	13,43
<b>Wyjściowe technologiczne</b>		
H <sub>2</sub> , kg	(S1)	1

czym 96% tych emisji pochodzi z instalacji fermentacji beztlenowej (AD) z powodu strat metanu podczas produkcji biogazu (20%) i przechowywania pofermentu (80%). Chociaż emisje CO<sub>2</sub> z reformingu biogazu są biogenne i nie są uwzględniane w ocenach, proces ten emituje ok. połowy gazów cieplarnianych w porównaniu z konwencjonalnym reformingiem parowym metanu (SMR), co zwiększa jego opłacalność jako alternatywy. System reformingu biogazu ma również negatywny wpływ na potencjał zubożenia abiotycznego (ADP) wynikający z zastąpienia nawozów mineralnych pofermentem organicznym, ale przyczynia się do zmiany zakwaszenia z powodu emisji amoniaku, co prowadzi do pozytywnego wpływu na potencjał zakwaszenia (AP). Ponadto instalacja AD odpowiada za 86% potencjału ekotoksyczności dla środowiska morskiego (MEP) i 100% potencjału ekotoksyczności dla środowiska lądowego (TEP) z powodu strat amoniaku.

Z danych zawartych w tabeli 4 wynika, że wyprodukowanie 1 kg H<sub>2</sub> wymaga 4,97 MJ energii, przy czym 4,15 MJ

Table 4. LCIA results for the production of 1 kg of H<sub>2</sub><sup>[22]</sup>Tabela 4. Wyniki LCIA dla produkcji 1 kg H<sub>2</sub><sup>[22]</sup>

Kategoria wpływu	Ogółem	Instalacja fermentacji beztlenowej (AD)	Instalacja produkcji wodoru	Konstrukcja i wycofanie
GWP, kg CO <sub>2</sub> eq	5,59	5,38	5,99 · 10 <sup>-2</sup>	0,15
FEP, CTU eq	4,85	4,11	1,08	7,88
ADP, kg Sb eq	1,20 · 10 <sup>-4</sup>	1,54 · 10 <sup>-4</sup>	3,16 · 10 <sup>-6</sup>	3,03 · 10 <sup>-5</sup>
TEP, molc N eq	1,33	1,33	5,43 · 10 <sup>-4</sup>	2,26 · 10 <sup>-3</sup>
AP, molc H <sup>+</sup> eq	0,29	0,29	3,66 · 10 <sup>-4</sup>	9,31 · 10 <sup>-4</sup>
FEP, kg P eq	6,02 · 10 <sup>-5</sup>	1,88 · 10 <sup>-4</sup>	1,27 · 10 <sup>-5</sup>	1,15 · 10 <sup>-4</sup>
MEP, kg N eq	6,60 · 10 <sup>-3</sup>	5,66 · 10 <sup>-3</sup>	6,12 · 10 <sup>-4</sup>	3,29 · 10 <sup>-4</sup>
NRE, MJ eq	4,15	3,84	6,42	1,57
CED, MJ eq	4,98	3,94	6,72	2,19

GWP – potencjał tworzenia efektu cieplarnianego, ADP – potencjał zubożenia abiotycznego, TEP – potencjał eutrofizacji dla środowiska lądowego, AP – potencjał zakwaszenia, FEP – potencjał eutrofizacji wód śródlądowych, MEP – potencjał eutrofizacji wód morskich, NRE – wskaźnik energii netto, CED – skumulowane zapotrzebowanie na energię

jest nieodnawialne, a 0,82 MJ odnawialne. Instalacja H<sub>2</sub> ma największe zapotrzebowanie na energię ze względu na zużycie energii elektrycznej. Oszczędność energii na poziomie 3,94 MJ/kg H<sub>2</sub> wynika z zastosowania pofermentu zamiast nawozów mineralnych, a dodatkowo 1,48 MJ/kg H<sub>2</sub> pochodzi z recyklingu materiału roślinnego. Jednakże 3,78 MJ/kg H<sub>2</sub> jest zużywane w budowie infrastruktury i sprzęcie. Wskaźnik energii netto (NER) ocenia ogólną wydajność energetyczną systemu reformingu biogazu.

## Podsumowanie

Podsumowując, ocena cyklu życia procesu reformingu biogazu pokazuje, że instalacja AD jest najważniejszym podsystemem, przyczyniającym się do ogólnego wpływu systemu. Emisje gazów cieplarnianych w systemie wynoszą ok. 5,59 kg ekwiwalentu CO<sub>2</sub> na kg H<sub>2</sub>, co stanowi ok. połowę emisji pochodzących z konwencjonalnych metod produkcji wodoru. Stosowanie pofermentu zamiast nawozów mineralnych pomaga zmniejszyć wyczerpywanie się zasobów nieodnawialnych, chociaż budowa zakładu nadal wpływa na ADP w ok. 20%. Największe zapotrzebowanie na energię pochodzi z instalacji produkującej wodór, przede wszystkim ze względu na zużycie energii elektrycznej w procesie reformingu. Mimo to proces reformingu biogazu okazuje się ogólnie korzystny. Zmniejszenie wpływu na

środowisko poprzez ograniczanie nawozów i wspierające kredyty recyklingowe potwierdza wykorzystanie biogazu jako zrównoważonego i przyjaznego dla środowiska źródła produkcji wodoru.

*Praca wykonana w ramach SUBB 2024 przyznanej dla młodych naukowców 08/030/BKM24/0143.*

Otrzymano: 10-10-2024

Zrecenzowano: 21-10-2024

Zaakceptowano: 07-11-2024

Opublikowano: 19-12-2024

## LITERATURA

- [1] R. Ma, N. Abid, S. Yang, F. Ahmad, *Environ. Sci. Res. Int.* 2023, **30**, 115480.
- [2] M. Landrat, M. Abawalo, K. Pikoń, P.A. Fufa, S. Seyid, *Energies* 2024, **17**, 1988.
- [3] M. Landrat, M. Abawalo, K. Pikoń, R. Turczyn, *Energies* 2022, **15**, 9605.
- [4] D. Cudjoe, W. Chen, B. Zhu, *Fuel* 2022, **324**, 124476.
- [5] H. Lee, J. Ahn, D.G. Choi, S.Y. Park, *Energy* 2024, **304**, 132023.
- [6] J. Mukawa, T. Pająk, T. Rzepecki, M. Banaś, *Energies* 2022, **15**, 5255, doi:10.3390/en15145255.
- [7] J. Mukawa, T. Rzepecki, M. Banaś, T. Pająk, K. Gaska, *Energy* 2024, **311**, 133450, doi: 10.1016/J.ENERGY.2024.133450.
- [8] C. Bento, T.F. Lopes, P. Rodrigues, F. Gírio, C. Silva, *Int. J. Hydrog. Energy* 2024, **66**, 661.
- [9] M.R. Hamedi, A. Tsolakis, C.S. Lau, *Int. J. Hydrog. Energy* 2014, **39**, nr 24, 12532.
- [10] D. Pham Minh, T.J. Siang, D.-V.N. Vo, T.S. Phan, C. Ridart, A. Nzihou, [w:] *Hydrogen supply chains* (red. C. Azzaro-Pantel), Elsevier, 2018.
- [11] Wodór, [https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen\\_en](https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en), dostęp 30 sierpnia 2024 r.
- [12] A. Iulianelli, S. Liguori, Y. Huang, A. Basile, *J. Power Sourc.* 2015, **273**, 25.
- [13] Y. Jin, T. Chen, X. Chen, Z. Yu, *Appl. Energy* 2015, **151**, 227.
- [14] N. Hajjaji, S. Martinez, E. Trably, J.-P. Steyer, A. Helias, *Int. J. Hydrog. Energy* 2016, **41**, 6064.
- [15] M. Morales, J. Quintero, R. Conejeros, G. Aroca, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2015, **42**, 1349.
- [16] Y. Jin, T. Chen, X. Chen, Z. Yu, *Appl. Energy* 2015, **151**, 227.
- [17] ISO 14040:2006, *Environmental management. Life cycle assessment. Principles and framework.*
- [18] ISO14044:2006, *Environmental management. Life cycle assessment. Requirements and guidelines.*
- [19] F. Battista, Y.S. Montenegro Camacho, S. Hernández, S. Bensaid, A. Herrmann, H. Krause, D. Trimis, D. Fino, *Int. J. Hydrog. Energy* 2017, **42**, 14030.
- [20] G. Di Marcoberardino, X. Liao, A. Dauriat, M. Binotti, G. Manzolini, *Processes* 2019, **7**, 86.
- [21] N. Martínez-Ramón, M. Romay, D. Iribarren, J. Dufour, *Int. J. Hydrog. Energy* 2024, **78**, 373.
- [22] N.I.H.A. Aziz, M.M. Hanafiah, S.H. Gheewala, *Biomass Bioenerg.* 2019, **122**, 361.
- [23] A. Whiting, A. Azapagic, *Energy* 2014, **70**, 181.
- [24] A. Martínez-Rocamora, J. Solís-Guzmán, M. Marrero, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 2016, **58**, 1364.
- [25] Z. Hu, P. Tan, X. Yan, D. Lou, *Energy* 2008, **33**, nr 11, 1654.
- [26] Ecoinvent, Ecoinvent Database v3, Swiss Centre for Life Cycle Inventories, Zurich 2013.
- [27] A. Iulianelli, S. Liguori, Y. Huang, A. Basile, *J. Power Sourc.* 2015, **273**, 25.
- [28] D.D. Papadias, S. Ahmed, R. Kumar, *Energy* 2012, **44**, 257.
- [29] J. Castillo, T. Sato, N. Itoh, *Int. J. Hydrog. Energy* 2015, **40**, 3582.