

Załącznik II
AUTOREFERAT

dr inż. Barbara Dybek
Zakład Technologiczny
Oddział Poznań
Instytut Technologiczno-Przyrodniczy
– Państwowy Instytut Badawczy
Falenty
Al. Hrabaska 3
05-090 Raszyn
e-mail: b.dybek@itp.edu.pl

Poznań 2024

SPIS TREŚCI

1. DANE PERSONALNE	4
2. POSIADANE DYPLOMY I STOPNIE NAUKOWE	4
3. INFORMACJA O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH.....	4
4. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA	6
4.1. OKREŚLENIE OSIĄGNIĘCIA.....	6
4.1.1. Charakterystyka wkładu do nauki z odwołaniem się do najważniejszych publikacji (osiągnięć naukowych).	13
4.2. WPROWADZENIE	15
4.3. PRZEGLĄD LITERATURY Z PODZIAŁEM TEMATYCZNYM	17
4.3.1. Właściwości gnojowicy świńskiej stosowanej w procesie fermentacji	17
4.3.2. Produkcja biogazu	19
4.3.3. Odsiarczanie biogazu.....	22
4.3.4. System kogeneracji dla biogazowni rolniczej	32
4.3.5. Inwestycja w biogazownię rolniczą.....	41
4.3.6. Aspekty produkcji biogazu w zależności od rodzaju substratu.....	48
4.3.7. Aspekty produkcji „kolorowego” wodoru i biowodoru	54
4.3.8. Efektywność produkcji biometanu przy udziale obornika koziego	59
4.3.9. Podsumowanie przeglądu literatury	69
4.4. CEL I ZAKRES OSIĄGNIĘCIA	71
4.5. METODYKA BADAŃ	73
4.5.1. Produkcja i uzdatnianie biogazu rolniczego w kogeneracji	73
4.5.1.1. Gnojowica świńska.....	74
4.5.1.2. Model monosubstratowego reaktora przepływowego biogazu wraz z instalacją tzw. „ścieżką biogazu”	77
4.5.1.3. Rezultaty z badań	81
4.5.1.4. Ocena mobilnej jednostki kogeneracyjnej na biogaz	91
4.5.2. Model inwestycyjny	99
4.5.3. Substraty stosowane do produkcji biogazu	106
4.5.4. Ocena produkcji biowodoru – rozwój zielonej energii	118
4.5.5. Produkcja biometanu w warunkach fotofermentacji - rezultaty z badań.....	126
4.6. SYNTETYCZNY OPIS PRAC.....	134
4.6.1. Praca nr O1	134

4.6.2. Praca nr O2	139
4.6.3. Praca nr O3	146
4.6.4. Praca nr O4	151
4.6.5. Praca nr O5	159
4.6.6. Praca nr O6	168
4.6.7. Praca nr O7	174
4.6.8. Praca nr O8	182
4.7. PODSUMOWANIE OSIĄGNIĘCIA	187
4.8. LITERATURA	193

1. DANE PERSONALNE

Imię i Nazwisko: **Barbara Dybek**

Miejsce pracy: Zakład Technologiczny
Oddział Poznań
Instytut Technologiczno-Przyrodniczy - Państwowy Instytut Badawczy
Falenty
Al. Hrabska 3
05-090 Raszyn

2. POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE – Z PODANIEM PODMIOTU NADAJĄCEGO STOPIEŃ, ROKU ICH UZYSKANIA ORAZ TYTUŁU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ:

- a) **magister inżynier**, kierunek: Inżynieria Środowiska, Politechnika Opolska, Wydział Mechaniczny, Katedra Inżynierii Procesowej 02.07.1998 r., temat pracy magisterskiej: *Analiza układów odpylających rusztowe chłodniki klinkieru na przykładzie cementowni „Strzelce Opolskie S.A.”*,
Promotor: Prof. dr hab.inż. Leon Troniewski,
- b) **doktor nauk technicznych**, dziedzina nauk: technicznych, dyscyplina naukowa: Budowa Eksploatacja Maszyn, Specjalizacja: Inżynieria Procesowa, Rada Wydziału Mechanicznego Politechniki Opolskiej w Opolu, 27.11.2002 r., temat pracy doktorskiej: *„Udział objętościowy faz przy przepływie trójfazowym gaz-ciecz-ciecz w kanałach poziomych”*,
Promotor: dr hab. inż. Stanisław Witczak, prof. PO;
- c) **studia podyplomowe**: „Zarządzanie projektami w organizacjach”, Politechnika Opolska, Wydział Inżynierii Produkcji i Logistyki, 22.06.2018 r., temat pracy dyplomowej: *„Serwis zbiornika magazynowego ropy naftowej o pojemności 47.500 m³ w Rafinerii Shell – Dania”*;
Opiekun: dr inż. Iwona Łapuńka

3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH:

10.1998 – 08.2015 Stanowisko: Nauczyciel akademicki
Politechnika Opolska
Wydział Mechaniczny
Katedra Inżynierii Procesowej

09.2020 – 08.2022 Stanowisko: Specjalista ds. inżynieryjno-technicznych

	Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach Zakład Energii Odnawialnych (do 12.2021) Zakład Technologiczny (01.2022 - nadal) Oddział Poznań
08.2022 – nadal	Stanowisko: Adiunkt Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach Zakład Technologiczny (01.2022 - nadal) Oddział Poznań
07.2022 – 09.2022	Stanowisko: Ekspert wiodący „Mikrobiogazownia rolnicza” podzadanie 3.1.8, „Wsparcie prac związanych z przygotowaniem planu strategicznego WPR na lata 2023-2027” zadanie 7. Dotacja 2022 w ramach umowy nr DIW.ib.070.1.2022 zawartej z Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach Zakład Technologiczny Oddział Poznań
09.2023 – 12.2023	Stanowisko: Ekspert „Wsparcie bieżące w trakcie wdrażania instrumentów PS WPR” podzadanie 9 w Zadaniu 5 „Ewaluacja i wsparcie analityczne z zakresu Wspólnej Polityki Rolnej”, Dotacja 2023 w ramach umowy nr DIW.ib.070.1.2023 zawartej z Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach Zakład Technologiczny Oddział Poznań
09.2023 – 12.2023	Stanowisko: Ekspert wiodący „Ochrona gleb użytkowanych rolniczo” w Zadaniu 2, Dotacja 2023 w ramach umowy nr DIW.ib.070.1.2023 zawartej z Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi Instytut Technologiczno-Przyrodniczy w Falentach Zakład Technologiczny Oddział Poznań

4. WSKAZANIE OSIĄGNIĘCIA WYNIKAJĄCEGO Z ART. 219 UST. 1 PKT. 2B USTAWY Z DNIA 20 LIPCA 2018 R. PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM I NAUCE (DZ. U. Z 2021 R. POZ. 478 Z PÓŹN. ZM.).

4.1. OKREŚLENIE OSIĄGNIĘCIA

a) tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego

**„PRODUKCJA BIOGAZU W ASPEKCIE
OCENY TECHNOLOGICZNEJ ORAZ ZASTOSOWANYCH SUBSTRATÓW”**

Osiągnięcie dokumentuje cykl 8 publikacji powiązanych tematycznie, wydanych po uzyskaniu przez wnioskodawcę stopnia naukowego doktora.

b) wykaz prac dokumentujący osiągnięcie naukowe:

- O1. Klimek, K.; Kapłan, M.; Syrotyuk, S.; Konieczny, R.; Anders, D.; **Dybek, B.**; Karwacka, A.; Wałowski, G. Production of Agricultural Biogas with the Use of a Hydrodynamic Mixing System of a Polydisperse Substrate in a Reactor with an Adhesive Bed. *Energies* **2021**, 14, 3538. <https://doi.org/10.3390/en14123538> (140 pkt wg MNiSW^d; IF₂₀₂₁ = 3,252^a; IF_{5-year} = 3,0^b; Cite Score₂₀₂₁ (Scopus) = 5,0; SJR₂₀₂₃ = 0,65).

Mój wkład w opublikowanie tej pracy polegał na: - opracowaniu: koncepcji badań i ich wykonaniu, metodologii badań.

Oświadczam, że udział w publikację (osiągnięcie naukowe) jest w ujęciu ilościowym równy: 26,7%.

Model według, którego obliczono udział % to składowa ilości współautorów + składowa ilości działań merytorycznych, dwie wartości stanowią sumę

Przykład dla O1:

- 8 współautorów stanowi 100%, a dla 1 współautora składowa wynosi 12,5%;

- 14 działań merytorycznych stanowi 100%, a 1 działanie stanowi 7,1%, ponieważ Barbara Dybek zaangażowana została w 2 działania (Author Contributions) składowa wynosi 14,2,0%;

- suma składowych wynosi 26,7% w zaokrągleniu 27%.

- O2. Klimek, K.; Kapłań, M.; Syrotyuk, S.; Bakach, N.; Kapustin, N.; Konieczny, R.; Dobrzyński, J.; Borek, K.; Anders, D.; **Dybek, B.**; Karwacka, A.; Wałowski, G. Investment Model of Agricultural Biogas Plants for Individual Farms in Poland. *Energies* **2021**, *14*, 7375. <https://doi.org/10.3390/en14217375> (140 pkt wg MNiSW^d; IF₂₀₂₁ = 3,252^a; IF_{5-year} = 3,0^b; Cite Score₂₀₂₁ (Scopus) = 5,0; SJR₂₀₂₃ = 0,65).

Mój wkład w opublikowanie tej pracy polegał na: - opracowaniu: koncepcji badań i ich wykonaniu, metodologii badań.

Oświadczam, że udział w publikację (osiągnięcie naukowe) jest w ujęciu ilościowym równy: 22,5%.

Model według, którego obliczono udział % to składowa ilości współautorów + składowa ilości działań merytorycznych, dwie wartości stanowią sumę

Przykład dla O2:

- 12 współautorów stanowi 100%, a dla 1 współautora składowa wynosi 8,3%;

- 14 działań merytorycznych stanowi 100%, a 1 działanie stanowi 7,1%, ponieważ Barbara Dybek zaangażowana została w 2 działania (Author Contributions) składowa wynosi 14,2,0%;

- suma składowych wynosi 22,5% w zaokrągleniu 22,5%.

- O3. Kapłań, M.; Klimek, K.; Syrotyuk, S.; Konieczny, R.; Jura, B.; Smoliński, A.; Szymenderski, J.; Budnik, K.; Anders, D.; **Dybek, B.**; Karwacka, A.; Wałowski, G. Raw Biogas Desulphurization Using the Adsorption-Absorption Technique for a Pilot Production of Agricultural Biogas from Pig Slurry in Poland. *Energies* **2021**, *14*, 5929. <https://doi.org/10.3390/en14185929>

(140 pkt wg MNiSW^d; IF₂₀₂₁ = 3,252^a; IF_{5-year} = 3,0^b; Cite Score₂₀₂₁ (Scopus) = 5,0; SJR₂₀₂₃ = 0,65).

Mój wkład w opublikowanie tej pracy polegał na: - opracowaniu: koncepcji badań i ich wykonaniu, metodologii badań.

Oświadczam, że udział w publikację (osiągnięcie naukowe) jest w ujęciu ilościowym równy: 22,5%.

Model według, którego obliczono udział % to składowa ilości współautorów + składowa ilości działań merytorycznych, dwie wartości stanowią sumę

Przykład dla O3:

- 12 współautorów stanowi 100%, a dla 1 współautora składowa wynosi 8,3%;

- 14 działań merytorycznych stanowi 100%, a 1 działanie stanowi 7,1%, ponieważ Barbara Dybek zaangażowana została w 2 działania (Author Contributions) składowa wynosi 14,2,0%;
- suma składowych wynosi 22,5% w zaokrągleniu 22,5%.

O4. : Ignatowicz, K.; Filipczak, G.; **Dybek, B.**; Wałowski, G. Biogas Production Depending on the Substrate Used: A Review and Evaluation Study—European Examples. *Energies* **2023**, 16, 798. <https://doi.org/10.3390/en16020798> (140 pkt wg MNiSW^d; IF₂₀₂₃ = 3,000^a; IF_{5-year} = 3,0^b; Cite Score₂₀₂₃ (Scopus) = 6,2; SJR₂₀₂₃ = 0,65).

Mój wkład w opublikowanie tej pracy polegał na: - opracowaniu: koncepcji artykułu, koncepcji badań i ich wykonaniu, metodologii badań, zbioru i archiwizacji danych; - analizie i zinterpretowaniu danych i wyników, - wykonaniu analizy badań; - zastosowaniu odpowiednich zasobów materiałowych; - użyciu odpowiedniego oprogramowania; - walidacji; - wizualizacji.

Oświadczam, że udział w publikację (osiągnięcie naukowe) jest w ujęciu ilościowym równy: 96%.

Model według, którego obliczono udział % to składowa ilości współautorów + składowa ilości działań merytorycznych, dwie wartości stanowią sumę

Przykład dla O4:

- 4 współautorów stanowi 100%, a dla 1 współautora składowa wynosi 25%;
- 14 działań merytorycznych stanowi 100%, a 1 działanie stanowi 7,1%, ponieważ Barbara Dybek zaangażowana została w 10 działań (Author Contributions) składowa wynosi 71%;
- suma składowych wynosi 96% w zaokrągleniu 96%.

O5. : **Dybek, B.**; Anders, D.; Hołaj-Krzak, J.T.; Hałasa, Ł.; Maj, G.; Kapłan, M.; Klimek, K.; Filipczak, G.; Wałowski, G. Assessment of the Prospects of Polish Non-Food Energy Agriculture in the Context of a Renewable Energy Source. *Energies* **2023**, 16, 3315. <https://doi.org/10.3390/en16083315> (140 pkt wg MNiSW^d; IF₂₀₂₃ = 3,000^a; IF_{5-year} = 3,0^b; Cite Score₂₀₂₃ (Scopus) = 6,2; SJR₂₀₂₃ = 0,65).

Mój wkład w opublikowanie tej pracy polegał na: - opracowaniu: koncepcji artykułu, koncepcji badań i ich wykonaniu, metodologii badań; - - administracji projektu artykuł;

- analizie i zinterpretowaniu danych i wyników, - wykonaniu analizy badań;
- zastosowaniu odpowiednich zasobów materiałowych; - użyciu odpowiedniego oprogramowania; - walidacji; - wizualizacji; - napisaniu i zredagowaniu manuskryptu.

Oświadczam, że udział w publikację (osiągnięcie naukowe) jest w ujęciu ilościowym równy: 89,2%;

Model według, którego obliczono udział % to składowa ilości współautorów + składowa ilości działań merytorycznych, dwie wartości stanowią sumę

Przykład dla O5:

- 9 współautorów stanowi 100%, a dla 1 współautora składowa wynosi 11,1%;
- 14 działań merytorycznych stanowi 100%, a 1 działanie stanowi 7,1%, ponieważ Barbara Dybek zaangażowana została w 11 działań (Author Contributions) składowa wynosi 78,1%;
- suma składowych wynosi 89,2% w zaokrągleniu 89%.

- O6. Jarosz, Z.; Kapłan, M.; Klimek, K.; **Dybek, B.**; Herkowiak, M.; Wałowski, G. An Assessment of the Development of a Mobile Agricultural Biogas Plant in the Context of a Cogeneration System. *Appl. Sci.* **2023**, 13, 12447. <https://doi.org/10.3390/app132212447> (100 pkt wg MNiSW^d; IF₂₀₂₃ = 2,5^a; IF_{5-year} = 2,7^b; Cite Score₂₀₂₃ (Scopus) = 5,3; SJR₂₀₂₃ = 0,51).

Mój wkład w opublikowanie tej pracy polegał na: - opracowaniu: koncepcji artykułu, koncepcji badań i ich wykonaniu, metodologii badań; - analizie i zinterpretowaniu danych i wyników, - wykonaniu analizy badań; - zastosowaniu odpowiednich zasobów materiałowych; - użyciu odpowiedniego oprogramowania; - walidacji; - wizualizacji; - napisaniu i zredagowaniu manuskryptu.

Oświadczam, że udział w publikację (osiągnięcie naukowe) jest w ujęciu ilościowym równy: 87,6%;

Model według, którego obliczono udział % to składowa ilości współautorów + składowa ilości działań merytorycznych, dwie wartości stanowią sumę

Przykład dla O6:

- 6 współautorów stanowi 100%, a dla 1 współautora składowa wynosi 16,6%;
- 14 działań merytorycznych stanowi 100%, a 1 działanie stanowi 7,1%, ponieważ Barbara Dybek zaangażowana została w 10 działań (Author Contributions) składowa wynosi 71,0%;
- suma składowych wynosi 87,6% w zaokrągleniu 88%.

O7. Jarosz, Z.; Kaplan, M.; Klimek, K.; Anders, D.; **Dybek, B.**; Herkowiak, M.; Hołaj-Krzak, J.T.; Syrotyuk, S.; Korobka, S.; Syrotyuk, H.; Wałowski, G. Evaluation of Biohydrogen Production Depending on the Substrate Used—Examples for the Development of Green Energy. *Energies* **2024**, *17*, 2524. <https://doi.org/10.3390/en17112524> (140 pkt wg MNiSW^d; IF₂₀₂₃ = 3,000^a; IF_{5-year} = 3,0^b; Cite Score₂₀₂₃ (Scopus) = 6,2; SJR₂₀₂₃ = 0,65).

Mój wkład w opublikowanie tej pracy polegał na: - opracowaniu: metodologii badań, zbioru i archiwizacji danych; - analizie i zinterpretowaniu danych i wyników, - wykonaniu analizy badań; - napisaniu i zredagowaniu manuskryptu oraz udzielaniu odpowiedzi Recenzentom i Redakcji czasopisma. Dokonałam również korekty artykułu po jego recenzjach.

Oświadczam, że udział w publikację (osiągnięcie naukowe) jest w ujęciu ilościowym równy: 52,1%;

Model według, którego obliczono udział % to składowa ilości współautorów + składowa ilości działań merytorycznych, dwie wartości stanowią sumę

Przykład dla O7:

- 11 współautorów stanowi 100%, a dla 1 współautora składowa wynosi 9,1%;

- 14 działań merytorycznych stanowi 100%, a 1 działanie stanowi 7,1%, ponieważ Barbara Dybek zaangażowana została w 6 działań (Author Contributions) składowa wynosi 43,0%;

- suma składowych wynosi 52,1% w zaokrągleniu 52%.

O8. Hołaj-Krzak, J.T.; Konieczna, A.; Borek, K.; Gryszkiewicz-Zalega ,D.; Sitko, E.; Urbaniak, M.; **Dybek, B.**; Anders, D.; Szymenderski, J.; Koniuszy, A.; Wałowski, G. Goat manure potential as a substrate for biomethane production - an experiment for photofermentation. *Energies* **2024**, *17*, 3967. <https://doi.org/10.3390/en17163967> (140 pkt wg MNiSW^d; IF₂₀₂₃ = 3,000^a; IF_{5-year} = 3,0^b; Cite Score₂₀₂₃ (Scopus) = 6,2; SJR₂₀₂₃ = 0,65).

Mój wkład w opublikowanie tej pracy polegał na: - opracowaniu: zbioru i archiwizacji danych; - analizie i zinterpretowaniu danych i wyników, - zastosowaniu odpowiednich zasobów materiałowych; - użyciu odpowiedniego oprogramowania; - wizualizacji; - napisaniu i zredagowaniu manuskryptu.

Oświadczam, że udział w publikację (osiągnięcie naukowe) jest w ujęciu ilościowym równy: 52,1%;

Model według, którego obliczono udział % to składowa ilości współautorów + składowa ilości działań merytorycznych, dwie wartości stanowią sumę

Przykład dla O8:

- 11 współautorów stanowi 100%, a dla 1 współautora składowa wynosi 9,1%;
- 14 działań merytorycznych stanowi 100%, a 1 działanie stanowi 7,1%, ponieważ Barbara Dybek zaangażowana została w 6 działań (Author Contributions) składowa wynosi 43,0%;
- suma składowych wynosi 52,1% w zaokrągleniu 52%.

ŁĄCZNIE (OSIĄGNIĘCIE):

- Punkty MNiSW	1080^{c,d}
- Impact Factor (IF)	24,256^a; (5,7^b)
- Cite Score (Scopus)	45,1
- Scimago Journal & Country Rank (SJR)	1,16 (0,65 + 0,51)

Objaśnienia indeksów górnych:

^a IF w roku wydania publikacji.

^b IF_{5-year} – średni pięcioletni impact factor

^c Punktacja Ministerialna (MNiSW) określona według roku wydania publikacji.

^d Punktacja MNiSW określona według roku wydania publikacji, zgodnie z przyjętą aktualną punktacją z listy z miesiąca styczeń 2024 (obecnie obowiązującą).

Wkład wnioskodawcy w opracowanie ww. publikacji obejmował autorstwo hipotez, koncepcji badawczych, wykonanie doświadczeń, analizę, opracowanie wyników badań i ich dyskusję, jak również przygotowanie manuskryptów.

Oświadczam, że udział w każdą publikację (osiągnięcie naukowe) jest następujący w ujęciu ilościowym równy:

O1 - 26,7%; O2 - 22,5%; O3 - 22,5%; O4- 96%; O5 – 89,2%; O6 – 87,6%; O7 – 52%; O8 – 52%

Natomiast w ujęciu jakościowym opracowanie i opublikowanie każdej z ww. publikacji polegało na:

- opracowaniu:

-> koncepcji artykułu: O4, O5, O6,

- > koncepcji badań i ich wykonaniu: O1, O2, O3, O4, O5, O6,
- > metodologii badań: O1, O2, O3, O4, O5, O6, O7,
- > zbioru i archiwizacji danych: O4, O7, O8;
- administracja projektu artykułu: O5;
- analizie i zinterpretowaniu danych i wyników: O4, O5, O6, O7, O8;
- wykonaniu analizy badań: O4, O5, O6, O7;
- zastosowaniu odpowiednich zasobów materiałowych: O4, O5, O6, O8;
- użyciu odpowiedniego oprogramowania: O4, O5, O6, O8;
- walidacji: O4, O5, O6,;
- wizualizacji: O4, O5, O6, O8;
- napisaniu i zredagowaniu manuskryptu: O5, O6, O7, O8;
- udzielaniu odpowiedzi Recenzentom i Redakcji czasopisma: O7;
- dokonaniu również korekty artykułu po jego recenzjach.

Model według, którego obliczono udział % to składowa ilości współautorów + składowa ilości działań merytorycznych, dwie wartości stanowią sumę

Przykład dla O6:

- 6 współautorów stanowi 100%, a dla 1 współautora składowa wynosi 16,6%;
- 14 działań merytorycznych stanowi 100%, a 1 działanie stanowi 7,1%, ponieważ Barbara Dybek zaangażowana została w 10 działań (Author Contributions) składowa wynosi 71,0%;
- suma składowych wynosi 87,6% w zaokrągleniu 88%.

Poznań, 18 października 2024 r.

Barbara Dybek

4.1.1. Charakterystyka wkładu do nauki z odwołaniem się do najważniejszych publikacji (osiągnięć naukowych).

Wkładem do nauki jest rozpoznanie procesu produkcji i uzdatniania biogazu rolniczego w kogeneracji, oraz zastosowanie praktyczne rezultatów badań do:

- rozwiązań techniczno-technologicznych nowej generacji czystych źródeł energii,
- aplikowania substratów,
- rozwoju „zielonej energii”.

Rezultaty prowadzonych badań potwierdziły, że istnieje możliwość opracowania modelu określenia kryteriów produkcyjnych biogazu (biometanu, biowodoru) w reaktorach „ex situ”, przy wykorzystaniu zjawiska fermentacji mezofilnej oraz fotofermentacji. Opracowany model zweryfikowano w warunkach rzeczywistych dla:

- fermentacji substratu polidispersyjnego w cyklu hydrodynamicznym;
- fotofermentacji obornika koziego.

Przeprowadzone rozważania oraz badania naukowe przedstawiono w publikacjach:

W publikacji (O1) przedstawiono rodzaje oraz właściwości fizyczne i chemiczne gnojowicy świńskiej stosowanej w procesie fermentacji. Dokonano oceny pomiarów wskazujących praktyczne zastosowanie gnojowicy świńskiej – substratu w układzie polidispersyjnym do produkcji biogazu rolniczego w kontekście energii odnawialnej.

W publikacji (O2) wskazano na metody oceny ekonomicznej efektywność inwestycji w biogazownię rolniczą. Opracowano m.in. model finansowy, rozważając aspekty inwestycyjne analizując rynek biogazu w kontekście realizacji projektów biogazowych.

W publikacji (O3) dokonano przeglądu wybranych metod i technik odsiarczania biogazu rolniczego. Analizowano autorską metodą odsiarczanie biogazu pod względem parametrów procesu - ustalono, że ilość H_2S w biogazie oczyszczonym zależy od złoża węgla aktywnego i rudy darniowej.

W publikacji (O4) wskazano na aktualny stan technologii stosowanej w produkcji biogazu na wybranych przykładach europejskich pod względem efektywności fermentacji metanowej i rzeczywistą produkcję energii. Zaprezentowano modele oparte na różnych rodzajach surowców wykorzystywanych do produkcji biogazu oraz proporcję substratów stosowanych we współfermentatorach.

W publikacji (O5) dokonano oceny polskiego rolnictwa niespożywczego (biomasa) dla zastosowań energetycznych w kontekście perspektyw odnawialnych źródeł energii.

Ujawniono mechanizm wpływu parametrów produkcji upraw energetycznych w kontekście perspektyw polskiego rolnictwa energetycznego.

W publikacji (O6) przedstawiono rekomendacje dotyczące eksploatacji modeli mikrobiogazowni, które mają największy wpływ na celowość wykorzystania odpadów rolniczych na cele energetyczne. Przeanalizowano kogenerator, który stanowi potencjalne zapotrzebowanie na energię z punktu widzenia polskiego rolnictwa w kontekście produkcji energii odnawialnej. Określono warunki pracy kogeneracji w celu opracowania optymalizacji agregatu kogeneracyjnego biogazowego produkującego energię elektryczną i ciepło w mikroinstalacji na potrzeby indywidualnego gospodarstwa rolnego.

W publikacji (O7) przedstawiono obecny stan technologii produkcji biowodoru. Opracowano innowacyjne trendy w rozwoju przemysłu biowodoru w Europie. Wskazano na różne modele procesu biowodoru dla różnych surowców i substratów stosowanych w kofermentatorach.

W publikacji (O8) przedstawiono aktualny stan technologii produkcji biogazu (biometanu) z obornika koziego w aspekcie efektywności fotofermentacji. Oceniono jakość biogazu produkowanego w warunkach atmosferycznych z obornika koziego umieszczonego w reaktorze (fotofermentatorze). Zainicjowano trendy technologiczne i przyszłe perspektywy dla sektora biometanu.

Oświadczam również, że:

- informacja o jednym wiodącym dziele (cykl artykułów) znajduje się w Załączniku II (Autoreferat), natomiast tzw. poboczne dzieło stanowią wykazane: artykuły, rozdziały monografii i monografie w Załączniku III;

- informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej w szczególności zagranicznej;

- informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę;

- inne informacje, ważne z punktu widzenia Wnioskodawcy, dotyczące kariery zawodowej; umieszczono w „Wykazie osiągnięć naukowych ...” (Załącznik III).

Poznań, 18 października 2024 r.

Barbara Dybek

c) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania**4.2. WPROWADZENIE**

Powszechną technologią stosowaną do utylizacji gnojowicy jest fermentacja metanowa gnojowicy w biogazowniach rolniczych. Technologia ta generuje jednak wysokie koszty inwestycyjne [Smurzyńska i in., 2016a]. Ponadto duża objętość tego substratu i niska zawartość materii organicznej utrudniają wzrost temperatury tego procesu [Clemens i in., 2006; Fischer, 2005; Hill i Bolte, 2000]. Koszt energii grzewczej i niska wydajność biogazowa substratu sprawiają, że jest to ekonomicznie nieopłacalne [Smurzyńska i in., 2016b]. Utylizacja gnojowicy poprzez fermentację metanową jest opłacalna jedynie w przypadku systemów wielkoskalowych [Asam i in., 2011]. Badania przeprowadzone przez Deng i in. [Deng i in., 2014a] pokazują solidność separacji gnojowicy, która pozwala na obniżenie kosztów ogrzewania i uzyskanie większej wydajności biogazu poprzez szybsze tempo degradacji tego substratu. Badania wykazały również, że separacja zmniejsza objętość fermentatora o dwie trzecie [Deng i in., 2012]. Ze względu na wysokie uwodnienie gnojowicy, jej zastosowanie jako mono-substratu przynosi niewielką wydajność ekonomiczną temu procesowi [Gabryszewska i Rogulska, 2009]. Dlatego proces ten wymaga dodania innych substratów, które zwiększają zawartość suchej materii organicznej mieszanki fermentacyjnej [Bohodziejewicz i in., 2011].

Gnojowica świńska jest powszechnie stosowana jako nawóz ze względu na niskie nakłady inwestycyjne. Gnojowica świńska jest powszechnie stosowana jako nawóz ze względu na niskie koszty inwestycyjne, biorąc pod uwagę jej zagospodarowanie na cele rolnicze na terenie gospodarstwa. Jednak korzystniejsze jest wykorzystanie gnojowicy świńskiej do produkcji biogazu, a mianowicie do przekształcenia jej w produkt przefermentowany niezbędny do nawożenia gleby ze względu na brak zapachów. Badania [Smurzyńska i in., 2016a; Kwiecińska, 2016; Baltic Green Belt, 2012; Burton, 2006; Carpenter i in., 1998; Hao i in., 2005; Mantovi i in., 2006; Redding, 2001; Berenguer i in., 2008; Bicudo i in., 2002; Smurzyńska i in., 2016c; Correll, 1998; Martinez i in.; 2003] pokazują, że jej niewłaściwe zastosowanie zanieczyszcza glebę i wodę. Prowadzi to również do emisji gazów odorowych i cieplarnianych [Rodhe i in., 2015; Czekala i in., 2012]. W obliczu istniejących zagrożeń zaleca się zagospodarowanie gnojowicy świńskiej poprzez fermentację metanową. Liczne właściwości gnojowicy świńskiej ułatwiają fermentację metanową, np. zawartość

podstawowych makro- i mikroelementów sprzyjających rozwojowi mikroflory bakteryjnej lub obecność mikroorganizmów beztlenowych.

Intensywna produkcja zwierzęca jest źródłem trudnej do utylizacji gnojowicy, gnojowicy lub obornika, które zanieczyszczają środowisko [Kupryś-Caruk, 2017]. Technologia utylizacji odpadów poprzez fermentację metanową jest doskonałym sposobem na ich neutralizację przy równoczesnym wytwarzaniu energii [Marszałek i in., 2011]. Hodowla zwierząt gospodarskich od-powiada za prawie jedną piątą globalnej emisji gazów cieplarnianych. Emisja metanu z hodowli krów jest ponad 18 razy wyższa niż z tuczu świń [Dach i in., 2013]. Według Podkówki [Podkówka, 2016] monofermentacja obornika jest nadal mało efektywna, ponieważ surowiec ten zawiera tylko około 8% suchej masy i 75% suchej masy organicznej w suchej masie. Stosunek węgla do azotu (C:N) w gnojowicy bydlęcej jest zbyt niski i wynosi 6,8:1.

Problem ten podjął Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Państwowy Instytut Badawczy w Polsce, a konkretnie Zakład Energii Odnawialnej (obecnie Zakład Technologiczny) w Poznaniu, w tym celu opracowano reaktor monosubstratowy do fermentacji gnojowicy metanowej [Wałowski i in., 2019]. Projekt i budowę monosubstratowego modelu przepływowego reaktora biogazu wykonano na podstawie wynalazku [Myczko i in., 2012]. Biogazownia [Wdrożenie, 2019] została wdrożona w gospodarstwie w Ocieszynie w ramach projektu BIOGAS&EE finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju realizowanego w programie BIOSTRATEG 1.

4.3. PRZEGLĄD LITERATURY Z PODZIAŁEM TEMATYCZNYM

4.3.1. Właściwości gnojowicy świńskiej stosowanej w procesie fermentacji.

Gnojowica to naturalny płynny nawóz, mieszanina kału, moczu i wody, która może być z powodzeniem stosowana w procesie fermentacji metanowej w wielu rolniczych biogazowniach. Mocz składa się w 96% z wody i zawiera nieorganiczne i organiczne związki azotu, witaminy, hormony i enzymy. Kał składa się z resztek paszy (strawionych i niestrawionych), wydzielin ciała oraz bakterii i ich produktów metabolicznych [Kwiecińska, 2016; Kutera, 1994]. Jest to głównie wspierane przez obecność makro- i mikroelementów. Składniki te umożliwiają rozwój i funkcjonowanie beztlenowych mikroorganizmów odpowiedzialnych za proces. Zawartość metanu w biogazie jest wskazywana przez obecność białek, tłuszczów i węglowodanów. Ważne jest również utrzymanie stosunku węgla (C) do azotu (N), który umożliwia prawidłowy rozkład materiału organicznego. Nadmierna ilość azotu emituje amoniak, który jest inhibitorem procesu [Chen i in., 2008; Sung i Liu, 2002; Sung i Liu, 2003].

Rodzaje gnojowicy - w podręcznikach [Kwiecińska, 2016] można znaleźć różne definicje gnojowicy oraz liczne, często rozbieżne dane na temat jej ilości i składu. Generalnie przyjmuje się, że gnojowica to produkt płynny wytwarzany w hodowli zwierząt bez ściółki; jest to mieszanina odchodów zwierzęcych, zarówno stałych, jak i płynnych w naturalnych proporcjach, która dodatkowo zawiera wodę procesową wykorzystywaną do płukania gnojowicy i pochodzącą z nieszczelności urządzeń do pojenia zwierząt [Kutera, 1994; Hus, 1995]. W zależności od gatunku zwierząt wyróżnia się gnojowicę bydlęcą, świńską i drobiową, a ten ostatni typ od-prowadzany jest z gospodarstw suchych jako tzw. ściółka. Ze względu na ilość wody w gnojowicy gnojowica dzieli się na gęstą (ponad 8% suchej masy) i rzadką (mniej niż 8% suchej masy). Występuje również gnojowica rozcieńczona, w której woda procesowa przekracza 20% objętości gnojowicy, a zawartość suchej masy jest mniejsza niż 8%. Gnojowica jest również dzielona ze względu na zawartość domieszek (np. gnojowica, ścieki z gospodarstw lub z obiektów zewnętrznych). W tym przypadku rozróżnia się zawiesinę pełną (bez domieszek) i zawiesinę niepełną (zmieszaną z przynajmniej jedną z ww. domieszek) [Baltic Green Belt, 2012].

Aspekty fizyczne i chemiczne gnojowicy - ilość i skład gnojowicy w znacznym stopniu zależą od gatunku, wieku, wydajności, sposobu żywienia zwierząt, sposobu odwadniania i magazynowania gnojowicy, zużycia wody w gospodarstwach oraz warunków atmosferycznych. Z punktu widzenia dalszego wykorzystania, najważniejszymi

właściwościami gnojowicy są zawartość azotu i fosforu. Ponadto jej parametry są również determinowane przez zawartość substancji organicznych i nieorganicznych, wielkość cząstek i pH. Wszystkie te czynniki są istotne dla wyboru odpowiedniej metody przygotowania lub obróbki gnojowicy w zależności od jej dalszego wykorzystania. Najważniejszym kryterium, które decyduje o właściwościach gnojowicy, jest gatunek zwierzęcia ze względu na budowę i funkcjonowanie jego układu pokarmowego - świnie są zwierzętami monogastrycznymi [Smurzyńska i in., 2016a; Landry i in., 2004].

Mikroflora gnojowicy - przeżywalność badanych mikroorganizmów w gnojowicy zależy od ogromnej liczby czynników, często silnie ze sobą powiązanych. Do najważniejszych należą [Böhm, 2005]: temperatura, gatunek zwierząt, od których pochodzi gnojowica (typ gnojowicy), zawartość suchej masy i suchej masy organicznej, odczyn, obecność antagonistycznej mikroflory naturalnej, początkowa liczebność badanych mikroorganizmów, właściwości danego serotypu i szczepu, zasobność gnojowicy w składniki odżywcze, rozpuszczone substancje gazowe i potencjał REDOX.

Mikroflora gnojowicy obejmuje wirusy, bakterie, grzyby i pasożyty. Wirusy — składniki o szczególnym znaczeniu epidemiologicznym i epizootycznym — dostają się do gnojowicy głównie z odchodami zwierząt [Paluszak, 1998; Strauch, 1991]. Gnojowica zawiera również wirusy choroby Aujeszky'ego, które przeżywają (3÷15) tygodni, wirusy choroby Borna – około 22 dni, wirusy choroby Mareka – około 7 dni, wirusy choroby Cieszyna (3÷25) dni, wirusy afrykańskiego pomoru świń (6÷160) dni i wirusy pryszczycy (21÷103) dni [Strauch, 1991]. Bakterie stanowią dominujący składnik w zestawie organizmów żyjących w gnojowicy. Obecne są zarówno bakterie saprofityczne, jak i patogenne [Olszewska i in., 1997]. Całkowita liczba bakterii tlenowych i względnie beztlenowych wynosi (10^9 ÷ 10^{10}) jednostek tworzących kolonie (CFU) w 1 cm³ gnojowicy [Paluszak, 1998]. Gnojowica pochodząca ze zdrowego stada jest zdominowana przez naturalną mikroflorę jelitową, charakteryzującą się umiarkowaną lub nieznaczoną wirulencją [Pesaro i in., 1995]. Dominującą rolę odgrywają jednak mikroorganizmy wprowadzane do gnojowicy z kałem. Najczęściej izolowane z gnojowicy bakterie to Enterobacteriaceae i enterokoki [Paluszak, 1998]. Dominującą rolę odgrywają *Escherichia coli*, których liczba wynosi (10^5 ÷ 10^6) CFU × cm⁻³ oraz pałeczki *Salmonella* w liczbie 10^2 CFU × cm⁻³ [Paluszak, 1998; Olszewska i in., 1997]. W gnojowicy wydalanej z organizmu zwierzęcia wraz z obornikiem może znajdować się dowolny mikroorganizm. Dlatego w tym podłożu sporadycznie stwierdza się *Listeria monocytogenes*, *Yersinia enterocolitica* i *Campylobacter*. Czas przeżycia tych mikroorganizmów w gnojowicy jest podobny do czasu przeżycia w wodzie gnojowej

i nieznacznie zależy od temperatury. Bakterie *Yersinia enterocolitica* przeżywają w zawiesinie około 10 dni, a bakterie *Campylobacter* 3 dni [Guan i Holley, 2003]. Wśród grzybów koloni-zujących gnojowicę dominują grzyby drożdżopodobne, natomiast grzyby pleśniowe są mniej liczne i reprezentowane głównie przez następujące rodzaje grzybów [Skowron i in., 2015]: *Mucor*, *Penicillium*, *Aspergillus* i *Botryotrichum*. Grzyby patogenne występują w gnojowicy stosunkowo rzadko [Strauch, 1991]. Obecność pasożytów i ich jaj oraz oocyst w gnojowicy odgrywa również negatywną rolę [Paluszak, 1998]. Organizmy te wywołują choroby inwazyjne [Olszewska i in., 1997]. Gnojowica świńska zawiera pierwotniaki z rodzajów *Eimeria* i *Balantidium* oraz robaki z rodzaju *Ascaris* i ich jaja, a także robaki *Oesophagostomum* spp. Jaja glisty w gnojowicy przechowywanej w temperaturze 8 °C zachowują swoją inwazyjność przez (75÷85) dni, natomiast w temperaturze (18÷26) °C przeżywają około 28 dni. Z drugiej strony dojrzałe osobniki tasiemca uzbrojonego przeżywają w świńskim nawozie w temperaturze 8 °C przez 76 dni [Strauch, 1991; Maćkowiak, 1994; Maćkowiak, 1999]. Istotną rolę odgrywają również pierwotniaki z rodzajów *Giardia* i *Cryptosporidium*, wykazujące częściową odporność na proces fermentacji (higienizacji) gnojowicy [Olszewska i in., 1997].

Lista bakterii, których pojawienie się w gnojowicy może stanowić poważne zagrożenie dla ludzi i zwierząt w warunkach europejskich, obejmuje [Skowron i in., 2015]: *Brucella* spp., *Chlamydia* spp., *E. coli* (szczepy enteropatogenne odporne na antybiotyki), *Leptospira* spp., *Rickettsia* spp., *Salmonella* spp., *Treponema hyodysenteriae*, *Bacillus anthracis*, *Erysipelothrix rhusio pathiae* i *Mycobacterium* spp. (m.in. *M. tuberculosis*, *M. bovis* i *M. avium* complex). Ich obecność i liczba zależą od czynników środowiskowych, gatunku zwierząt, od których pochodzi gnojowica oraz jej właściwości fizycznych i chemicznych oraz składu [Strauch, 1991].

4.3.2. Produkcja biogazu

Biogaz to gaz powstający podczas przetwarzania biomasy, która jest jednym z podstawowych odnawialnych źródeł energii. Pod względem chemicznego składu się głównie z metanu (CH_4) i ditlenku węgla (CO_2). Biogaz [Werle, 2021] jest produktem biologicznego procesu przekształcania substancji organicznych bez dostępu tlenu (O_2) przy udziale mikroorganizmów o zawartości (50÷75)% CH_4 w biogazie, w zależności od substratów. Amoniak (NH_3) i siarkowodór (H_2S) są niekorzystne ze względu na ich destrukcyjny wpływ na bakterie biorące udział w procesie fermentacji. Mają również negatywny wpływ na infrastrukturę techniczną wykorzystywaną do procesu fermentacji. Jednak skład biogazu

zależy w dużej mierze od rodzaju surowca, z którego jest produkowany. Nawet jeśli surowiec jest ten sam, skład biogazu może być również różny. Dotyczy to w szczególności biogazu produkowanego z odchodów zwierzęcych. W obrębie tego samego gatunku zwierząt skład ich odchodów będzie się różnić w zależności od rodzaju podawanego zwierzętom pokarmu, a także ich wieku i stanu zdrowia. Oczywiście inne gatunki będą miały również inny skład odchodów, co przełoży się na skład produkowanego z nich biogazu.

Biogaz powstaje w procesie fermentacji metanowej [Arthur i in., 2011]. Proces ten przebiega w kilku podstawowych fazach [Paterson i in., 2016]. Proces fermentacji metanowej odbywa się w warunkach beztlenowych.

Pierwsza faza nazywana jest hydrolizą. Pod wpływem działania enzymów wytwarzanych przez mikroorganizmy związki organiczne występujące w materii organicznej, takie jak białka, tłuszcze i węglowodany, ulegają rozkładowi na prostsze związki organiczne. Należą do nich: aminokwasy, kwasy tłuszczowe i cukry. Wprowadzona do komory fermentacyjnej materia organiczna w tej fazie zmienia się w miazgę. Złożone związki organiczne, takie jak białka, tłuszcze i węglowodany, ulegają rozkładowi na związki proste, tj. cukry proste, aminokwasy i kwasy tłuszczowe. Czas rozkładu zależy od tego, jakie związki zostaną poddane procesowi rozkładu. Hydroliza węglowodanów zachodzi najszybciej, w ciągu kilku godzin, a hydroliza białek i tłuszczów trwa do kilku dni [Dublein i Steinhauser, 2008]. Biomasa zawierająca więcej hemicelulozy niż celulozy ma większą zdolność hydrolizy.

Drugą fazą powstawania biogazu jest faza kwasogenezy, w której wytwarzane są kwasy. Kwasogeneza to proces, w którym produkty hydrolizy są przekształcane w kwasy organiczne, np. kwas octowy, mrówkowy, masłowy i propionowy, alkohol etylowy i metylowy, aminy, aldehydy, CO_2 i H_2 . Przejściowe związki organiczne powstające w fazie hydrolizy są dalej rozkładane przez bakterie kwasotwórcze na prostsze kwasy organiczne. Należą do nich kwas octowy (CH_3COOH), kwas propionowy ($\text{C}_2\text{H}_5\text{COOH}$) i kwas masłowy ($\text{C}_3\text{H}_7\text{COOH}$). Wytwarzane są również niewielkie ilości CO_2 , kwasu mlekowego ($\text{CH}_3\text{CHOHCOOH}$) i alkoholi.

Trzecia faza jest określana jako faza acetanogenezy. Kwasy organiczne powstałe w poprzedniej fazie są przekształcane w CH_3COOH , CO_2 i H_2 . W oktanogenezie produkty acidogenezy, etanole i lotne kwasy tłuszczowe są przekształcane w octany, CO_2 i H_2 .

Czwartą i ostatnią fazą w procesie powstawania biogazu jest faza metanowa. Metanogeneza jest ostatnim etapem procesu fermentacji metanowej, w którym większość metanu powstaje w wyniku przemiany octanów i alkoholi [Czerwińska i Kalinowska, 2014]. W tym etapie bakterie metanogenne produkują CH_4 i CO_2 przy użyciu kwasu octowego i H_2 . Bakterie w tej

fazie są najbardziej wrażliwe na zmiany środowiskowe i zaburzenia w poprzednich fazach. Stąd efektywna produkcja biogazu wymaga zapewnienia odpowiednich warunków procesu [Wałowski, 2022].

Jednym z najważniejszych czynników jest aktywność mikroorganizmów produkujących biogaz. Aby uzyskać ich wysoką aktywność, należy spełnić wiele warunków. Należą do nich regularność załadunku, utrzymanie składu substratów, sposób podawania substratów (ciągły lub okresowy), odpowiednia temperatura - najczęściej fermentację mezofilową prowadzi się w temperaturze (32÷38) °C, zapewnienie odpowiedniego pH i właściwego stosunku C do N₂. Jeśli ten stosunek jest zbyt wysoki, nie może dojść do całkowitej konwersji węgla. Jeśli jest zbyt niski, może powstawać NH₃, który nawet w niskich stężeniach hamuje wzrost bakterii i może doprowadzić nawet do zniszczenia całej ich populacji, co spowoduje zatrzymanie procesu fermentacji [Mohrmann i Otter, 2023]. Czynnikiem wpływającymi na przebieg kolejnych etapów fermentacji metanowej, optymalne warunki i parametry procesu są:

(1) Temperatura; optymalna temperatura dla różnych typów bakterii: fermentacja psychrofilowa (20÷25) °C, mezofilowa (35÷37) °C i termofilowa (55÷60) °C [Kim i in., 2006]. Wzrost temperatury wpływa korzystnie na aktywność metaboliczną mikroorganizmów oraz stabilność i wydajność produkcji CH₄ [Mao i in., 2015, Kumaran i in., 2015]. Fermentacja termofilowa jest trudniejsza do kontrolowania pod względem warunków procesu i jest bardziej energochłonna. Większość instalacji biogazowych na świecie pracuje w oparciu o technologie mezofilowe [Ward i in., 2008], w tym w Polsce [Czekała i Kaniewski, 2015].

(2) pH; jest to jeden z najważniejszych czynników wpływających na proces fermentacji. Optymalny zakres pH jest inny dla każdego etapu fermentacji CH₄. Dla bakterii odpowiedzialnych za hydrolizę i bakterii kwasotwórczych optymalny zakres pH wynosi 4,5÷6,3 [Werle, 2021]. Według Kallistova i in. [Kallistova i in., 2014] są to wartości z zakresu (5,5÷6,5). Najbardziej korzystny zakres pH dla rozwoju bakterii odpowiedzialnych za acetogenezę i metanogenezę obejmuje wartości od 6,8 do 7,5 [Werle, 2021].

(3) Stosunek węgla (C) do azotu (N), jak pokazano w Tabeli 1 aby zapewnić prawidłowy wzrost i aktywność bakterii odpowiedzialnych za fermentację, konieczne jest dostarczenie im odpowiedniej ilości składników odżywczych, makro- i mikroelementów [De Vrieze i in., 2012]. Gdy wartość C do N jest zbyt wysoka, mikroorganizmy mogą nie przetworzyć całkowitej ilości węgla, natomiast wartość zbyt niska powoduje powstawanie NH₃ [Khalid i in., 2011]. Według Puñala i in. [Puñala i in., 2000] optymalna wartość C:N wynosi (10÷30), natomiast według Jadhava i in. [Jadhav i in., 2023] wynosi (20÷30).

Tabela 1. Wartości stosunku węgla (C) do azotu (N) dla wybranych substratów (opracowanie własne na podstawie [Werle, 2021]).

Substrats	C:N
Obornik krowi	16÷25
Obornik świński	6÷14
Odpady z rzeźni	22÷37
Opadłe liście	50÷53
Algi	75÷100
Obornik drobiowy	5÷15
Obornik owczy	30÷33
Obornik kozi	10÷17
Słoma pszenna	50÷150
Łodygi kukurydzy/słoma	50÷56
Burak cukrowy/liście cukrowe	35÷40
Odpady z owoców i warzyw	7÷35

Aby zapewnić optymalne warunki fermentacji, często stosuje się mieszaniny poszczególnych substratów, dobierane w celu zwiększenia wydajności procesu, tak aby uzyskać najkorzystniejszy stosunek C:N w danych warunkach [Siddique i Wahid, 2018; Kaur i Kommalapati, 2021].

Warunki, w jakich przebiega fermentacja oraz rodzaj substratu w istotny sposób wpływają na aktywność mikroorganizmów biorących udział w procesie fermentacji. Bilans składników odżywczych sprzyja występowaniu różnorodności mikroorganizmów, dzięki czemu zakłócenia procesu mogą być w większym stopniu tolerowane, a znajomość tych zależności umożliwia opracowanie narzędzi do projektowania, obsługi i sterowania procesem, aby przebiegał on jak najsprawniej [Tyagi i in., 2021, Mlaik i in., 2024].

W zależności od surowca użytego do produkcji biogazu, proces technologiczny produkcji biogazu można podzielić na fermentację suchą i moką. Fermentacja mokra ma miejsce, gdy zawartość suchej masy w substracie nie przekracza (12÷15) %, co pozwala na jego pompowanie. Jeśli zawartość suchej masy przekracza 16%, mówimy o fermentacji suchej. Produktem fermentacji odchodów zwierząt gospodarskich jest poferment, który jest tak samo dobrym naturalnym nawozem jak obornik lub gnojowica.

4.3.3. Odsiarczanie biogazu

W celu uzyskania jakości biogazu i jego przewidywanego wykorzystania, zestawiono metody odsiarczania biogazu w zależności od zakresu efektywności odsiarczania biogazu. Odsiarczanie biogazu może być prowadzone zarówno metodami fizycznymi, jak i biologicznymi [Pawłowska i Zdeb, 2015].

W metodzie fizycznej wykorzystującej technikę absorpcji najczęściej używanym przykładem jest woda płuczająca [Piskowska-Wasiak, 2014], a różnice w rozpuszczalności CO₂ i CH₄ w rozpuszczalnikach polarnych są stosowane [Mroczkowski i Seiffert, 2011]. Biogaz jest podawany do wody płuczającej pod wysokim ciśnieniem, około 10 barów, co zwiększa jego rozpuszczalność w wodzie, która jest rozpylana z góry kolumny płynącej w dół w przeciwnym kierunku do gazu. Zastosowano kolumnę z wypełnieniem, aby zapewnić dużą powierzchnię wymiany masy gaz-ciecz. Śladowe ilości CH₄ są odzyskiwane w zbiorniku odgazującym pod zmniejszonym ciśnieniem. W kolumnie odpędowej woda płuczająca jest regenerowana, a CO₂ i H₂S są usuwane z powietrzem. Po etapie suszenia zawartość CH₄ w powstałym strumieniu gazu może osiągnąć 98%, a odzysk metanu może wynieść do 94%. Proces ługowania w wodzie płuczającej jest zazwyczaj przeprowadzany z regeneracją wody płuczającej. Nawet to rozwiązanie wymaga dużej ilości wody; stąd pojedynczy proces mycia jest praktycznie niemożliwy. Główną zaletą procesu wysokociśnieniowego w porównaniu z procesem pod ciśnieniem atmosferycznym jest wzrost rozpuszczalności gazu w wodzie wraz ze wzrostem ciśnienia, co oznacza mniejsze zużycie wody płuczającej. Innym istotnym czynnikiem wpływającym na rozpuszczalność składników w wodzie jest wartość pH, która w tym przypadku zależy od ilości rozpuszczonych w wodzie H₂S i CO₂. Najlepsza wartość pH dla wydajnego procesu to 7. Wypłukiwanie w wodzie jest bardzo prostą technologią ze względu na tani absorbent i nieskomplikowaną aparaturę [Piskowska-Wasiak, 2014].

Techniki odsiarczania adsorpcyjnego skutkują wysokim wskaźnikiem odsiarczania wynoszącym 99% [Kwaśny i in., 2016]. Jednak w większości przypadków wykorzystanie adsorpcji jest opłacalne przy niższych stężeniach H₂S. Istotą tego procesu jest przepuszczenie biogazu przez kolumnę filtracyjną wypełnioną adsorbentem węglowym, mineralnym i mineralno-węglowym. Węgiel aktywny jest jednym z najbardziej znanych i wszechstronnych adsorbentów [De Arespachaga i in., 2014], który charakteryzuje się wysoką wydajnością adsorpcji zanieczyszczeń i niskimi kosztami aplikacji. Możliwość ponownego użycia i recyklingu produktu obniża koszty operacyjne [Pettersson, 2013; Hernández i in., 2011]. Dostępne dane literaturowe [Hernández i in., 2011; Micoli i in., 2014] wskazują na wyższą wydajność adsorpcji H₂S na węglu aktywnym w porównaniu z zeolitami, komercyjnymi adsorbentami tlenkowymi i sitami jonowymi, co potwierdzają wyniki uzyskane przez Sisani i współpracowników [Sisani i in., 2014].

Sisani i współpracownicy [Sisani i in., 2014] przeprowadzili adsorpcję w temperaturze 30°C i wykazali całkowitą nieprzydatność zeolitu i sepiolitu w tym procesie. Natomiast badania przeprowadzone przez Micoli i współpracowników [Micoli i in., 2014] wykazały, że

wydajność odsiarczania przy użyciu zeolitów można znacznie poprawić, modyfikując ich strukturę chemicznie. Odbywa się to poprzez wymianę jonową lub impregnację. W procesie usuwania H_2S autorzy zastosowali zeolity modyfikowane poprzez wymianę jonową i impregnowane jonami miedzi i cynku oraz węgle aktywne impregnowane roztworami Na_2CO_3 , KOH i $NaOH$. Najwyższą wydajność adsorpcji H_2S uzyskano dla węgla aktywnego impregnowanego roztworem Na_2CO_3 . Należy zauważyć, że niezależnie od impregnacji węgiel aktywny okazał się skuteczniejszy od testowanych adsorbentów zeolitowych. Warto zauważyć, że wydajność desulfuryzacji znacznie wzrosła po modyfikacji struktury zeolitu poprzez wymianę jonową jonami Cu^{2+} .

Wyniki uzyskane przez Micoli i współpracowników [Micoli i in., 2014] potwierdziły słuszność tezy, że modyfikacja struktury skutkowałą zwiększeniem wydajności desulfuryzacji biogazu.

Genosorb [Mroczkowski i Seiffert, 2011], podobnie jak woda płuczająca, opiera się na procesie adsorpcji fizycznej, ale rolę wody jako rozpuszczalnika przejmuje substancja Genosorb. Biogaz jest sprężany do ciśnienia około 7 bar, a następnie schładzany do temperatury (10÷20) °C, co oznacza, że część pary wodnej ulega skropleniu. Sprężony do ciśnienia 7 bar biogaz wchodzi w kontakt z przeciwprądem rozpuszczalnika organicznego. Na tym etapie CO_2 i H_2S są absorbowane przez rozpuszczalnik organiczny Genosorb. Produkt końcowy, biometan, o regulowanej zawartości metanu (93÷98)%, gromadzi się na szczycie kolumny. Następnie gaz procesowy jest oczyszczany węglem aktywnym w celu usunięcia między innymi związków siarki. Rozpuszczalnik organiczny jest regenerowany w kolumnie desorpcyjnej w temperaturze 50°C. Płyn ługujący może być używany przez 10 lat przed jego wymianą [Herr i in., 2021]. W praktyce udział metanu po oczyszczeniu przekracza 97%.

Metody mokre obejmują sorpcję H_2S w roztworach chemicznych wiążących H_2S . Zachodzą one poprzez ługowanie H_2S z biogazu w skrubberach wieżowych przy użyciu odpowiedniego płynu roboczego. Metody mokre obejmują te oparte na adsorpcji fizycznej, które obejmują rozpuszczanie H_2S w wodzie lub rozpuszczalnikach organicznych [Cebula i Sołtys, 2012]. Znaną metodą jest wykorzystanie CH_3OH jako czynnika roboczego w temperaturach od -20°C do -70°C, pod ciśnieniem (2÷5) MPa — proces Rectisol i Ifpex. Niestety, metody te charakteryzują się wysokimi kosztami regeneracji czynnika i dużym zużyciem czynnika, a co za tym idzie, są nieopłacalne [Kwaśny i in., 2016].

H_2S można również usunąć za pomocą chemicznego skrubera [Biernat i Samson-Bręk, 2011]. Proces chemicznej absorpcji siarkowodoru przy użyciu związków żelaza jest procesem o wysokiej wydajności usuwania H_2S i niskim zużyciu chemikaliów, między innymi dzięki

regeneracji ośrodka absorpcyjnego. Cały system składa się z kolumny absorbującej, separatora cząstek lub filtra oraz kolumny, w której regenerowane jest medium absorpcyjne. W kolumnie absorpcyjnej siarkowodor jest absorbowany i przekształcany w siarkę. Z kolei w separatorze cząstek utworzone cząstki siarki są oddzielane od strumienia produktu końcowego. Ostatnim etapem procesu jest regeneracja absorbentu w kolumnie regeneracyjnej [Biernat i Samson-Bręk, 2011].

Kriogeniczne oczyszczanie biogazu odbywa się w bardzo niskich temperaturach (do $-100\text{ }^{\circ}\text{C}$) i wysokich ciśnieniach (około 40 bar) [Biernat i Samson-Bręk, 2011]. Surowy biogaz jest schładzany do temperatury, w której jego CO_2 skrapla się lub sublimuje i może być oddzielony od biogazu w postaci ciekłej lub stałej, podczas gdy CH_4 pozostaje w fazie gazowej. Chłodzenie zwykle odbywa się w kilku etapach, aby dokładnie usunąć różne niepożądane substancje zawarte w biogazie, w tym parę wodną i siloksany, oraz zoptymalizować odzysk energii. Strumień surowego biogazu przechodzi przez pierwszy wymiennik ciepła, który schładza gaz do $-70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Następnym krokiem w procesie jest przepuszczenie schłodzonego biogazu przez szereg sprężarek i wymienników ciepła, które dodatkowo schładzają gaz i sprężają go do ciśnienia około 40 barów, zanim dotrze do kolumny destylacyjnej. Ostatnim etapem procesu separacji kriogenicznej jest oddzielenie CH_4 od innych zanieczyszczeń, głównie H_2S i CO_2 . Główną wadą separacji kriogenicznej jest stosowanie ogromnej ilości sprzętu procesowego, głównie sprężarek, turbin i wymienników ciepła — tak duże zapotrzebowanie na urządzenia sprawia, że separacja kriogeniczna jest niezwykle kosztowna [Biernat i Samson-Bręk, 2011]. Najpowszechniejszą metodą jest metoda chemiczna wykorzystująca technikę absorpcji związkami żelaza (Fe^{3+}), których tanim źródłem jest ruda darniowa, łatwo dostępna w Polsce. Warunkiem procesu jest obecność żelaza w postaci hydratu $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ lub wodorotlenku $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Warianty hydratu $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ i $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3\text{-H}_2\text{O}$ łatwo reagują z H_2S , a powstały siarczek żelaza(III) może zostać utleniony do reaktywnej formy tlenku żelaza(III) [Cybulska i in., 2021].

Techniki membranowe pozwalają na separację zanieczyszczeń, głównie CO_2 i H_2S — procesy te są wciąż nowe, ale rozwijają się bardzo szybko [Biernat i Samson-Bręk, 2011]. Postęp badań nad technologią membranową i ich wyniki wskazują na techniczne i ekonomiczne uzasadnienie jej stosowania jako jednej z najlepszych metod oczyszczania biogazu z zanieczyszczeń. Membrana jest filtrem, przez który co najmniej jeden ze składników rozdzielonej mieszaniny może swobodnie przechodzić, podczas gdy inne są przez niego zatrzymywane ze względu na ich wielkość lub zależność — wynika to z różnej przepuszczalności membrany. Transport odbywa się przez membranę dzięki zastosowaniu

odpowiedniej siły napędowej, czyli różnicy potencjałów chemicznych po obu stronach membrany. Potencjał ten może być wywołany m.in. ciśnieniem, stężeniem, temperaturą lub różnicą potencjałów elektrycznych po obu stronach membrany. Jest on również ściśle zależny od rodzaju membrany (membrany porowate lub dyfuzyjne). W technikach membranowych transport cząsteczek jest zatem indukowany różnicą potencjałów chemicznych po obu stronach membrany, a separacja jest spowodowana różnicą szybkości transportu różnych substancji, składników roztworów lub mieszanin. Membrana jest fazą ciągłą o symetrycznej lub asymetrycznej strukturze. W przypadku membrany asymetrycznej jest to albo drobno porowata warstwa pokrywająca makroporowate podłoże, albo mikroporowata lub gęsta (nieporowata) warstwa nałożona na oddzielnie uformowane porowate podłoże (w tzw. membranach kompozytowych). Membrany najczęściej występują w postaci tzw. włókien kapilarnych. Włókna te mają bardzo małą średnicę, więc do przepchnięcia roztworu przez membranę wymagane są wysokie ciśnienia. Z drugiej strony wysokie ciśnienia wymagają znacznej wytrzymałości mechanicznej membrany, ponieważ kanały kapilarne mogą bardzo łatwo zostać zablokowane. Powoduje to znaczny wzrost kosztów procesu. Związki takie jak H_2S i tlen przenikają przez membranę tylko w pewnym stopniu, podczas gdy przepuszczalność azotu i metanu jest pomijalna. Proces obróbki membranowej często odbywa się w dwóch etapach. Zanim gaz przejdzie przez przeponę, najpierw przechodzi przez filtr, który wychwytuje wodę, olej i krople aerozolu, które mają negatywny wpływ na działanie przepony i mogą ją uszkodzić. Separacja membranowa jest jedną z podstawowych metod oczyszczania gazów składowiskowych. Pierwsze zakłady powstały pod koniec lat 70. w USA, a następnie w Holandii [Biernat i Samson-Bręk, 2011].

Selektywność membrany związana jest z emitowanymi gazami, przepuszczalność, okres eksploatacji, zakres temperatur i wilgotności, koszty konserwacji i wymiany — czynniki te decydują o rentowności zakładu wzbogacania biogazu [Piskowska-Wasiak, 2014]. Trudno jest zatem ocenić zalety tej technologii, chociaż jest ona sprawdzona w przypadku separacji azotu atmosferycznego i jest stosowana zarówno eksperymentalnie, jak i na mniejszą skalę komercyjnie do wzbogacania biogazu. Główną wadą technologii membranowej jest niski odzysk metanu. Strumień odpadów zawiera dość duże ilości silnie zanieczyszczonego CH_4 . Część tego strumienia można odprowadzić i połączyć z gazem wlotowym lub, w przypadku wyższej zawartości CH_4 , gaz można spalić w silniku gazowym podłączonym do generatora [Piskowska-Wasiak, 2014].

Często stosuje się metody mokre oparte na adsorpcji chemicznej, np. w roztworze sody kaustycznej ($NaOH$), w wodnych roztworach alkanoloaminy i w roztworze chlorku żelaza

[Kwaśny i in., 2016]. Zastosowanie roztworów NaOH jest opłacalne, gdy stężenie H_2S mieści się w zakresie (0,05÷1,5)%, dla biogazu produkowanego w ilości (50÷1200) m^3/h . W wyniku odsiarczania ciecz robocza staje się ściekiem, który musi zostać odprowadzony do oczyszczalni. Zastosowanie alkanoloamin powoduje selektywne usuwanie H_2S , gdy stosowana jest trietanolamina (TEA), natomiast roztwory monoetanolaminy (MEA) i dietanolaminy (DEA) usuwają również CO_2 [Jędrzak, 2007; Więckol-Ryk i in., 2018; Krzemiń i in., 2016].

Jedną z najczęściej stosowanych metod biologicznego usuwania H_2S z biogazu jest utlenianie, które dostarcza powietrze do biogazu, a następnie przepuszcza mieszaninę przez aktywną warstwę biologiczną [Kwaśny i in., 2016].

Najczęściej stosowane w procesach biologicznego oczyszczania gazów szczepy bakterii to: *Acinetobacter*, *Chlorobiaceae*, *Xanthomonas*, *Pseudomonas*, *Thiobacilli*, w szczególności: *Thiobacillus denitrificans*, *Thiobacillus thioparus*, *Thiobacillus thiooxidans* i *Thiobacillus ferrooxidans*. Większość z nich to bakterie chemotroficzne, które pozyskują energię poprzez utlenianie zredukowanych nieorganicznych związków siarki, a jako źródło węgla wykorzystują CO_2 [Pawłowska i Zdeb, 2015]. W efekcie *Thiobacillus* wytwarza elementarną siarkę i siarczyny. Efektywność usuwania H_2S mieści się w zakresie (80÷99)% [Ramos i Fdz-Polanco, 2014], natomiast stężenie H_2S po odsiarczaniu mieści się w zakresie (30÷150) mg/m^3 . Metoda charakteryzuje się niskimi kosztami inwestycyjnymi i eksploatacyjnymi. Zaletą jest to, że nie trzeba wprowadzać do systemu żadnych dodatkowych chemikaliów, a proces można prowadzić bez nadzoru [De Arespachaga i in., 2014; Petersson, 2013; Jędrzak, 2007; Nemati i in., 1998]. Należy podkreślić, że rodzaj uzyskanej substancji ściśle zależy od stężenia rozpuszczonego tlenu — tworzeniu się pierwiastkowej siarki sprzyja ograniczenie tlenu, przy zwiększonym obciążeniu H_2S [Ramos i in., 2014].

Warto zauważyć, że Tabela 2 obejmuje metody odsiarczania biogazu, zakładając początkowe stężenie siarkowodoru do 3000 ppm.

Tabela 2. Metody odsiarczania biogazu [opracowanie własne].

Metoda	Proces lub technika	Zastosowanie	Zakres wydajności odsiarczania biogazu,
Fizyczna	Absorpcja (mokra)	- płuczka wodna, wykorzystuje się różnice rozpuszczalności CO ₂ i CH ₄ w rozpuszczalnikach polarnych; - absorbent: a) metanol (Rectisol), b) eter dimetylowy polietylenoglikolu (Selexol, Genosorb), c) węglan propylenowy (Fluor), d) sulfolan (Sulfinol).	do (94÷96) % [Piskowska-Wasiak, 2014; Pomykała i Łyko, 2013]
	Adsorpcja (sucha)	- adsorbent: a) węglowy (węgiel aktywny), b) mineralny, c) mineralno-węglowy.	do 95% [Cebula, 2012; Żarczyński i in., 2014]
	Adsorpcja (mokra)	- rozpuszczanie H ₂ S w wodzie lub rozpuszczalnikach organicznych: a) Genosorb, b) Rectisol, c) Ifpex.	> 96% [Piskowska-Wasiak, 2014; Pomykała and Łyko, 2013]
	Separacja kriogeniczna	- bardzo niskie temperatury do -100 °C i wysokie ciśnienie ok. 40 bar	do 99% [Biernat i Samson-Bręk, 2011]
Chemiczna	Absorpcja	- związki żelaza: a) ruda darniowa (porowata skała osadowa).	do 90% [Kociołek-Balawejder i Wilk, 2011; Cebula, 2012; Gaj i Cybulska-Szulc, 2014; Żarczyński i in., 2014; Gaj i in., 2008]
	Membranowe (porowate lub dyfuzyjne)	- potencjał chemiczny roztworów lub mieszanin.	do 99% [Żarczyński i in., 2014; Cosoli i in., 2008]
	Adsorpcja (mokra)	- roztwór sody kaustycznej; - wodny roztwór alkanoloamin; - roztwór chlorku żelaza.	(95÷99) % [Aleksandrow i Staniszevska, 2013; Barbusiński, 2006]

Biologiczna	Utlenianie	- dostarczanie powietrza do biogazu.	powyżej 95% [Kociółek-Balawejder i Wilk, 2011; Żarczyński i in., 2014]
	Reakcja mikrobiologiczna	- bakterie z rodziny <i>Thiobacillus</i> wytwarzające siarkę elementarną.	(80÷99) % [Cebula i Sołtys, 2012]

Dane przedstawione w Tabeli 2 pokazują, że większość technik fizycznej metody odsiarczania biogazu osiąga (95÷96)% wydajności procesu. Jednak w praktyce preferowane metody w większości zastosowań nie pozwalają na osiągnięcie takiej wydajności. Jednak metody te zwykle spełniają wymagania układów kogeneracyjnych w odniesieniu do siarkowodoru i dlatego są szeroko stosowane [Żarczyński i in., 2015]. Podczas wytwarzania energii elektrycznej z biogazu o zbyt wysokiej zawartości H₂S nie tylko dochodzi do korozji urządzeń, ale również do zwiększonej częstotliwości wymiany oleju, co skutkuje częstszymi przestojami i zwiększonymi kosztami eksploatacji.

Przyjmując początkowe stężenie H₂S do 3000 ppm (Tabela 2), wskazano negatywne skutki nieodpowiedniej jakości paliwa. H₂S można usunąć z biogazu przeznaczonego do spalania w układach kogeneracyjnych praktycznie wszystkimi opisanymi metodami, przy niezbędnym poziomie odsiarczania biogazu ze względów technologicznych do 1000 ppm, zwykle (200÷300) ppm [Rejman-Burzyńska i in., 2013; Dudek i in., 2021; Ryckeboesch, 2011; Allegue i Hinge, 2014].

Jako uzupełnienie warto wspomnieć o zastosowaniu odpowiednich metod odsiarczania, zwłaszcza w przypadku biogazu rolniczego ze względu na proces fermentacji dla infrastruktury generującej CH₄.

Różnorodność technik, które można stosować w celu usprawnienia instalacji biogazu rolniczego, sprawia, że ocena wpływu na środowisko naturalne jest bardzo trudna i niejednoznaczna [Wałowski, 2018]. Wielkość nakładów energetycznych niezbędnych do realizacji procesu, koszty inwestycyjne, koszty eksploatacyjne, sprawność elektryczna zastosowanych układów kogeneracyjnych, stopień i sposób wykorzystania ciepła z kogeneracji będą decydować o przyjazności dla środowiska instalacji budowanych i eksploatowanych w gospodarstwach rolnych [Romaniuk i in., 2012], w których już teraz przeprowadza się odsiarczanie surowego biogazu rolniczego z wykorzystaniem układów technologicznych i pomiarowych.

W układzie adsorpcji i desorpcji występuje układ regeneracji adsorbentu składający się ze sprężarki, nagrzewnicy, co najmniej dwóch kolumn adsorpcyjnych pracujących

naprzemiennie, chłodnicy wodnej i osuszacza gazu połączonych szeregowo. Charakteryzuje się on tym, że posiada pompę ciepła, której częścią jest podgrzewacz-skraplacz włączony w obwód układu szeregowo przed nagrzewnicą i kolumną adsorpcyjną; część skraplacza-parownika jest włączana za kolumną adsorpcyjną i chłodnicą i jest wyposażona w akumulator ciepła-chłodu umieszczony w jednej kolumnie z osuszaczem gazu umieszczonym między sprężarką a skraplaczem-parownikiem [Staszewski i Wagner-Staszewska, 1991].

Znana jest metoda i procedura instalacji do oczyszczania gazu ziemnego zawierającego azot, o zawartości azotu (20÷90)% molowych i zawierającego wyższe węglowodory. W tej metodzie gaz ziemny przepuszcza się przez jedno lub więcej urządzeń dekompresujących i stopień oczyszczania, a woda i węglowodory z co najmniej pięcioma atomami węgla i ditlenku węgla (CO_2) są oddzielane i chłodzone w co najmniej jednym wymienniku ciepła przed rozdzieleniem w separatorze kriogenicznym na azot i węglowodory, które pozostają po oczyszczeniu. Tymczasem węglowodory resztkowe są zawracane do wymiennika ciepła i podgrzewane, a gaz ziemny jest schładzany, ale całkowita ilość gazu ziemnego wraz z zawartą siarką jest dekompresowana w pierwszym urządzeniu rozprężnym z generatorem do ciśnienia od 6 do 10 MPa, najlepiej od 7 do 9 MPa, a następnie gaz jest przetwarzany w niskiej temperaturze [Hobler i in., 1996].

Znana jest metoda wykorzystania gnojowicy świńskiej, bydłowej lub drobiowej poprzez fermentację metanową z wytwarzaniem biogazu oraz system do wykorzystania gnojowicy poprzez fermentację metanową [Kumanowski i in., 2008]. Metoda wykorzystania gnojowicy poprzez fermentację metanową z wytwarzaniem biogazu charakteryzuje się tym, że gnojowica jest kierowana z fermentatora do urządzenia klasyfikującego, a oddzielona i gęsta zawiesina jest zawracana do fermentatora, a ciecz jest dostarczana do wymiennika ciepła (zasilanego gorącą wodą podgrzewaną w kotle biogazowym, która jest wytwarzana w fermentatorze), a następnie podgrzana ciecz jest zawracana. Układ do wykorzystania gnojowicy poprzez fermentację metanową obejmuje fermentator połączony z urządzeniem klasyfikującym, najlepiej hydrocyklonem. Dolna część urządzenia klasyfikującego jest połączona zwrotnie z fermentatorem, a jego górna część z wymiennikiem ciepła. Wylot biogazu znajduje się w górnej części fermentatora i jest połączony z kotłem, który jest połączony ze zbiornikiem ciepłej wody za pomocą pompy z wymiennikiem ciepła.

Znany jest układ do obróbki biogazu do parametrów gazu przesyłowego i układ oczyszczania biogazu [Filanowski i in., 2013.]. Metoda ta jest stosowana do obróbki gazu, w której CO_2 jest usuwany z nieprzetworzonego biogazu. Charakteryzuje się tym, że CO_2 jest usuwany poprzez chłodzenie ciekłego azotu w biogazie, co powoduje rozdzielenie faz w taki sposób, że

nieprzetworzony biogaz jest przesyłany rurociągiem do sprężarki w celu zwiększenia ciśnienia do ponad 1,5 MPa. Następnie przepływa przez wstępny wymiennik ciepła do fazy wstępnego przetwarzania w celu ułatwienia separacji wody, w wyniku czego biogaz jest chłodzony przez biogaz wyjściowy z instalacji. Po wstępnym schłodzeniu biogaz kierowany jest do kolumny wstępnego oczyszczania w celu oddzielenia wody i usunięcia siarkowodoru, po czym przygotowany biogaz kierowany jest do wymiennika ciepła, gdzie jest schładzany do temperatury w zakresie od -62 do -72 °C za pomocą ciekłego azotu. Po opuszczeniu wymiennika ciepła biogaz kierowany jest do separatora w celu oddzielenia CO₂ i innych zanieczyszczeń od CH₄.

Znane są metody i systemy termicznego i biologicznego przetwarzania odpadów, gdzie na początku procesu znajdują się miejsca odbioru odpadów stałych i ciekłych [Urych i Smoliński, 2021; Smoliński i in., 2018]. Odpady stałe w kolejnych miejscach są rozdrabniane i homogenizowane pod względem wielkości, po czym odpady są segregowane poprzez oddzielenie odpadów organicznych od nieorganicznych, takich jak metale, szkło, tworzywa sztuczne i tekstylia [Smoliński i Howaniec, 2016; Urych i Smoliński, 2016]. Oddzielone odpady nieorganiczne kierowane są do dalszego przetwarzania przez wyspecjalizowane firmy. W kolejnym miejscu stałe odpady organiczne są mieszane z wodą i odpadami ciekłymi, takimi jak ścieki, serwatka lub szlam. Z zawiesiny usuwa się piasek i inne wypłukane ciała stałe, a osad odwadnia się do zawartości (16÷17)% suchej masy i poddaje obróbce termicznej hydroliza w znanym reaktorze i za pomocą znanej metody. Po hydrolizie termicznej osad jest fermentowany beztlenowo w temperaturze 40°C w komorze fermentacyjnej, z której biogaz wytworzony w procesie jest pobierany z góry, a z dołu sfermentowany osad, który jest odwadniany na kolejnej stacji i przekazywany do zewnętrznego wykorzystania w uprawach rolnych, albo bezpośrednio do gleby, albo do wysuszenia i wykorzystania jako biopaliwo. Woda odzyskana podczas odwadniania jest zwracana do komory mieszania wraz z odpadami stałymi. Biogaz jest wykorzystywany do podgrzewania wody i wspomagania produkcji pary w procesie hydrolizy termicznej lub jest przekazywany do stacji paliw w celu napędzania pojazdów.

W znanych urządzeniach proces kompostowania jest poprzedzony fermentacją beztlenową w celu wytworzenia biogazu. Z reguły biogaz jest spalany na miejscu w elektrociepłowni podłączonej do zakładu. Uzyskana energia cieplna i elektryczna jest zazwyczaj wykorzystywana do celów wewnętrznych lub innych.

Na podstawie danych o ilości odchodów zwierzęcych wytwarzanych w produkcji trzody chlewnej [Marek, 2018] przedstawiono podział terytorialny Polski pod kątem produkcji

biogazu w 2018 r. Mając informacje o liczbie trzody chlewnej w Polsce, obliczono ilość odchodów zwierzęcych oraz potencjalną ilość biogazu, jaka mogłaby zostać wytworzona w danym powiecie. Dane uzyskano z Agencji Restrukturyzacji i Modernizacji Rolnictwa, na podstawie których obliczono średnią ilość odchodów zwierzęcych. Zgodnie z Powszechnym Spisem Rolnym Głównego Urzędu Statystycznego przedstawiono dane dotyczące wskaźników dla systemów utrzymania zwierząt.

Dotychczasowe doświadczenia światowe pokazują, że sektor biogazowni rolniczych rządzi się zasadami ekonomii skali, opartymi na jednostkowych nakładach inwestycyjnych, które rosną lub maleją wraz ze zmianą wydajności instalacji. Obecnie nie ma wykazanej większej próby statystycznej inwestycji realizowanych w Polsce w odniesieniu do kryteriów techniczno-ekonomicznych zależnych od wydajności biogazowni [Curkowski i in., 2011]. Elementy ryzyka w dużych i małych biogazowniach rozkładają się również inaczej, co wpływa na podstawową działalność inwestora [Wałowski, 2021]. Na dzień 5 sierpnia 2015 r. w „Rejestrze przedsiębiorstw energetycznych zajmujących się wytwarzaniem biogazu rolniczego” prowadzonym przez Agencję Rynku Rolnego zarejestrowanych było w Polsce 56 producentów biogazu rolniczego. Łącznie obecnie funkcjonują 62 instalacje do produkcji biogazu rolniczego. Zgodnie z „Kierunkami rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce w latach 2010–2020” z 3 lipca 2010 r. przewiduje się, że w każdej gminie posiadającej ku temu warunki powstanie średnio jedna biogazownia wykorzystująca biomasę pochodzenia rolniczego. W praktyce daje to ok. 2000 takich instalacji. Standardowe wskaźniki rentowności dla większych biogazowni, nawet 1 lub 2 MW, w tym substratów odpadowych (w całości lub w części) w obecnych warunkach makroekonomicznych (cena energii elektrycznej/cena zielonych certyfikatów) nie powinny przekraczać 18%. Ponadto rentowność inwestycji znacząco zwiększa prosumencki charakter instalacji, możliwość zastąpienia energii pobieranej z sieci energią produkowaną z własnych odpadów, brak kosztów gospodarowania odpadami, możliwość zmniejszenia formalnej uciążliwości inwestycji w trybie pół-sieciowym oraz możliwość wykorzystania pofermentu. Aby zapewnić odpowiednią jakość biogazu, konieczne jest udoskonalenie i wdrożenie prostych i skutecznych metod jego odsiarczania, co jest realizowane w Instytucie Technologii-Przyrodniczych – Państwowym Instytucie Badawczym.

4.3.4. System kogeneracji dla biogazowni rolniczej

Ciepło uzyskane z instalacji kogeneracyjnej biogazowni jest wykorzystywane do utrzymania temperatury procesowej fermentatora, ale jego nadmiar może być wykorzystany

do innych procesów, takich jak ogrzewanie budynków. Inną metodą jest przesyłanie lub magazynowanie ciepła i wytwarzanie chłodu. Nowa inicjatywa dotycząca przestrzeni chłodniczej dla użytecznej energii wytwarzanej przez połączone systemy energetyczne nosi nazwę Buildings Cooling, Heating and Power (BCHP) [ASC, 2000]. Ze względu na wysoką sprawność, układy kogeneracyjne odgrywają ważną rolę w redukcji emisji gazów cieplarnianych, obniżaniu kosztów i ograniczaniu zanieczyszczenia środowiska, zwiększając jednocześnie niezawodność systemu i jakość energii, zmniejszając przeciążenie sieci i unikając strat dystrybucyjnych [Çakir i in., 2012].

Układ kogeneracyjny składa się głównie z silnika spalinowego podłączonego do generatora i układu do odbioru ciepła z układu chłodzenia. Coraz częściej układy kogeneracyjne mają również wymienniki ciepła służące do odzyskiwania ciepła z układu wydechowego i chłodnicy oleju. W takim przypadku maksymalna strata ciepła może wynosić 20% [Kolanowski, 2022].

Abbas i in. [Abbas i in., 2020] przeprowadzili symulacje i badania nad wykorzystaniem biomasy w różnych typach rozwiązań kogeneracyjnych. Rozważyli następujące przypadki: cykl parowy, cykl organiczny Rankine'a (ORC) i wykorzystanie silników cieplnych, takich jak silniki Stirlinga i Ericssona.

Cykl parowy obejmuje wytwarzanie pary poprzez spalanie biomasy w kotle, a następnie wykorzystanie pary do napędzania turbiny parowej. Para używana do napędzania turbiny skrapla się i jest kierowana z powrotem do wymiennika ciepła znajdującego się w kotle. ORC ma dwa cykle: jeden dla oleju termicznego i drugi dla płynu organicznego. Ciepło uwalniane podczas spalania biomasy jest przenoszone przez obieg oleju za pośrednictwem wymiennika do płynu organicznego, który odparowuje w wysokich temperaturach i ciśnieniach. System ORC składa się z czterech głównych komponentów, a mianowicie pompy, parownika, turbiny i skraplacza. Przegrzana para organiczna jest rozprężana w turbinie, a następnie skraplana w skraplaczu i zwracana do pompy obiegowej, aby rozpocząć nowy cykl. Skraplacz może działać jako wymiennik ciepła lub do zdalnego transferu ciepła w niskich temperaturach. Skroplona ciecz organiczna jest pompowana przez regeneratory do parownika. Ciepło w takich instalacjach jest zwykle dostarczane w temperaturze około 300 °C, a kondensacja następuje w temperaturze około 90 °C.

Silniki Stirlinga i Ericssona są silnikami cieplnymi. Różnią się przede wszystkim czynnikami roboczymi. W silniku Stirlinga jest to ciecz, a w silniku Ericssona powietrze.

W toku analiz przeprowadzonych przez Abbasa i in. [Abbas i in., 2020] uzyskano informacje, że spośród wymienionych rozwiązań technicznych obieg parowy wykorzystujący turbinę

parową jest szczególnie odpowiedni do stosowania w instalacjach dużej mocy, najlepiej powyżej 2000 kW. Z kolei układy ORC są najbardziej polecane, według autorów, do układów o średniej mocy, tj. od 200 do 2000 kW. Powodem jest znaczny koszt tego typu instalacji oraz stopień rozbudowy i aktualna dojrzałość technologiczna tych układów, które zazwyczaj nie były projektowane powyżej mocy 2000 kW. Z kolei rozwiązania oparte na silnikach cieplnych (Stirling, Ericsson) są przez autorów rekomendowane do mikrokogeneracji. Powodem jest prostota i znajomość tych układów. W przypadku mikrokogeneracji kluczowe znaczenie ma łatwość serwisowania i niskie koszty instalacji [Abbas i in., 2020].

Zainteresowanie przemysłu rolnego produkcją biogazu na małą skalę pozwoliło firmom projektowym na opracowanie koncepcji mobilnych instalacji, często o prostej konstrukcji kontenerowej, gotowych do wykorzystania w infrastrukturze gospodarczej. Mikrobiogazownie najczęściej zawierają następujące elementy [Kowalczyk-Juśko, 2013]:

- (a) Punkt odbioru substratów stałych i płynnych;
- (b) Zestaw pomp mieszających i dozujących substraty;
- (c) Komory fermentacyjne wyposażone w system grzewczy, mieszający i usuwający odpady pofermentacyjne;
- (d) Zbiornik biogazu;
- (e) Odsiarczanie;
- (f) Aparatura kontrolująca proces i układ sterowania;
- (g) Instalacje rurowe i kablowe;
- (h) Silnik kogeneracyjny;
- (i) Pochodnia spalająca nadmiar biogazu;
- (j) Budynek techniczny.

Projektowanie konkretnej mikrobiogazowni jest zasadniczo przeprowadzane indywidualnie dla każdego gospodarstwa. Według jednego z wariantów, zaspokojenie zapotrzebowania na substraty dla mikrobiogazowni o mocy 50 kW wymaga obsiania ok. 30 ha ziemi roślinami przeznaczonymi do produkcji biogazu. Wykorzystanie substratów odpadowych odpowiednio zmniejsza wymaganą powierzchnię. Pozostałość pofermentacyjną wykorzystuje się do nawożenia gruntów we własnym gospodarstwie. Dotychczas zrealizowane biogazownie charakteryzują się dużą różnorodnością, zarówno pod względem zainstalowanych urządzeń, ilości produkowanego biogazu, jak i pozyskiwanej z niego energii. Sama zasada i sposób pozyskiwania biogazu rolniczego pozwalają na takie zróżnicowanie.

Głównym zamysłem twórców kontenerowej mikrobiogazowni rolniczej, wersji nr 7 KMR 7 (Rys. 1a), było dostosowanie jej konstrukcji do realiów polskiego rolnictwa [Association,

2021]. Mikrobiogazownia została dostosowana do przetwarzania pozostałości z produkcji rolnej i zwierzęcej, a także kiszzonek z roślin energetycznych uprawianych na cele specjalistyczne.



Rys. 1. Mobilne instalacje do produkcji biogazu rolniczego: **a)** Kontenerowa Mikrobiogazownia Rolnicza KMR7 [Association, 2021], **b)** mikro-biogazownia kontenerowa [Mega, 2021], **c)** Micro-Biogas-Plant [Reiter i Kaufmann, 2019], **d)** mikrobiogazownia rolnicza MB-30 [Egie, 2021], **e)** mikrobiogazownia rolnicza MB-50 [Egie, 2021].

Przewidywana objętość produkcji biogazu o zawartości metanu (CH_4) w fermentatorze około 55% wynosi od $0,97 \cdot 10^{-3}$ do $13,8 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Odpowiadająca tej ilości biogazu moc elektryczna mikrobiogazowni wynosi około (7÷10) kW_{el} (wartość referencyjna). Zaprojektowana komora fermentacyjna z izolacją i zewnętrznym pokryciem w postaci blach trapezowych nie przekracza z reguły wymiarów 40-stopowego kontenera transportowego.

Całkowita pojemność wynosi około 70 m^3 , a pojemność wypełnienia substratami wynosi około 60 m^3 . Na szczycie kontenera planuje się umieścić bufor biogazu o pojemności około 15 m^3 , przykryty dachem z blachy trapezowej. Komora jest zasilana substratami poprzez kryty kanał wtryskowy w górnej części kontenera. Substraty dostarczane kanałem wtryskowym opadają po pochylonej płycie do wnętrza komory. Komora nie posiada mieszadła, a stosowany jest okresowy oprysk perkolatem (przefermentowaną zawiesiną). Wytworzony biogaz, gromadzony w buforowym zbiorniku biogazu, kierowany jest do silnika agregatu kogeneracyjnego, gdzie energia biogazu jest przetwarzana na energię elektryczną i ciepłą. Układ kogeneracyjny znajduje się na pomoście obsługowym KMR7, w oddzielnym, dźwiękoszczelnym kontenerze lub w wyznaczonych pomieszczeniach fermy. KMR7 wyposażony jest w standardowy układ przyłączeniowy do sieci niskiego napięcia, obejmujący przełącznik, szafę przyłączeniową z urządzeniami sterowniczymi i zabezpieczającymi oraz wymaganą instalację telemechaniki (telesygnalizacji i telepomiarów). Jedną z głównych zalet konstrukcji jest możliwość jej transportu bez konieczności uzyskiwania specjalnych pozwoleń, w tym budowlanych [Association, 2021].

Założono, że w celu zaspokojenia zapotrzebowania inwestorów pikoinstalacji i mikroinstalacji biogazowych podstawowym elementem powinna być kontenerowa mikrobiogazownia rolnicza firmy Mega Sp. z o. o. [Mega, 2021] (Rys. 1b), doposażona w urządzenia do wstępnej hydrolizy surowca oraz w urządzenia służące do poprawy sprawności elektrycznej agregatu prądotwórczego.

Przeznaczeniem mikrobiogazowni AB Biogas System (Rys. 1c) jest podawanie odpadów organicznych do biologicznej fermentacji i udostępnianie powstałego biogazu do dalszego wykorzystania [Reiter i Kaufmann, 2019]. Powstały osad pofermentacyjny może być wykorzystany jako płynny polepszacz gleby (np. nawóz). W tym przypadku odpady organiczne w ilości $(1,15 \cdot 10^{-3} \div 11,57 \cdot 10^{-3}) \text{ kg} \cdot \text{s}^{-1}$ mogą zostać poddane recyklingowi i uzyskać biogaz $1,38 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Ze względów logistycznych cała mikrobiogazownia jest zamontowana w 20-stopowym kontenerze ładunkowym. Po dostarczeniu magazyn gazu jest montowany na dachu kontenera. Możliwa jest dowolna liczba mikrobiogazowni, które mogą działać równolegle. Wprowadzenie odpadów organicznych odbywa się za pomocą jednostki rozdrabniającej. Rozdrabniacz jest zamontowany z przodu i (podobnie jak wszystkie inne elementy sterujące) jest dostępny po otwarciu drzwi kontenera. Dalsze podawanie rozdrobnionych odpadów do przestrzeni fermentacyjnej odbywa się automatycznie za pomocą systemu pompującego. Fermentator jest wyposażony w grzałkę i mieszadło łopatkowe. Ogrzewanie musi być zasilane zewnątrz, aby utrzymać stałą temperaturę w fermentatorze,

szczególnie w chłodniejszych miesiącach. Zapotrzebowanie na energię ciepłą zależy od temperatury otoczenia. Mieszalnik łopatkowy jest napędzany silnikiem elektrycznym za pośrednictwem przekładni kołnierzej i pracuje ze stałą prędkością. Silnik jest sterowany za pomocą zintegrowanego sterowania. Rzeczywista fermentacja jest w pełni automatyczna. Wytworzony biogaz jest zbierany w zbiorniku gazu (zamontowanym na górze kontenera i chronionym przed wiatrem). Cały system gazowy pracuje pod maksymalnym ciśnieniem 5 mbar i jest wyposażony w mechaniczne zabezpieczenie nadciśnieniowe. W przypadku nadciśnienia biogaz jest uwalniany do atmosfery. Ilość i jakość wytwarzanego biogazu zależą bezpośrednio od rodzaju i świeżości wprowadzanych odpadów organicznych. Pozostałość pofermentacyjna jest odsączana i może być stosowana jako płynny polepszacz gleby (np. nawóz). Skład pofermentu zależy bezpośrednio od wprowadzanych materiałów. Opcjonalnie można zastosować jednostkę separacyjną, która oddzieli składniki stałe i płynne pofermentu bezpośrednio po utylizacji [Reiter i Kaufmann, 2019].

Najpopularniejszym modelem mikrobiogazowni eGmina, Infrastruktura, En-ergetyka Sp. z o. o. jest MB-30 (Rys. 1d). Mikrobiogazownia idealnie nadaje się do mniejszych gospodarstw hodowlanych lub rolniczych [Egie, 2021]. Biorąc pod uwagę specyfikację mikrobiogazowni, można osiągnąć:

- Całoroczną produkcję energii elektrycznej, tj. 30 kW;
- Całoroczną produkcję ciepła, tj. 40 kW;
- Produkcja wysokiej jakości i naturalnego nawozu przy dowolnym wkładzie kilku ton dziennie (kał, kiszonka itp.);
- Prosty i bezobsługowy system, z nadzorem przez Internet.

Jednak rolnicza mikrobiogazownia MB-50 (Rys. 1e) jest większym modelem dla średnich gospodarstw, które są w stanie dostarczyć kilka ton wkładu dziennie, osiągając 50 kW energii elektrycznej i 70 kW ciepła rocznie [Egie, 2021].

System kogeneracji (CHP) jest jedną z metod pozyskiwania ciepła i energii elektrycznej o szerokim zakresie zastosowań w zakresie paliw, które można wykorzystać. System kogeneracji może wykorzystywać paliwo gazowe, ciekłe, a nawet stałe w systemach opartych na przykład na produkcji pary. W porównaniu z oddzielną produkcją ciepła i energii elektrycznej, kogeneracja oszczędza energię. W zaawansowanych systemach ilość ciepła odpadowego może wynosić maksymalnie 20%. Jeśli chodzi o zrównoważony rozwój, jedną z podstawowych kwestii jest efektywność energetyczna.

Fermentacja beztlenowa (AD) składa się z wielu reakcji biochemicznych, podczas których bakterie rozkładają materię organiczną dowolnego substratu na gazy, takie jak metan

(CH₄), ditlenek węgla (CO₂), wodór (H₂), siarkowodór (H₂S) itp. Proces ten zachodzi w nieobecności wolnego tlenu. Surowce, które można przetworzyć w AD, obejmują szeroki zakres pozostałości organicznych, ale istnieją pewne wymagania, które czynią go użytecznym lub nie. Współfermentacja różnych surowców lub ich wstępna obróbka może poprawić produkcję biogazu poprzez zrównoważenie stężenia różnych składników odżywczych obecnych w różnych surowcach, które są kluczowe dla wydajnej AD.

Interakcja między różnymi typami mikroorganizmów zaangażowanych w proces AD umożliwia degradację złożonych polimerów biomasy reagujących na różnych etapach procesu. Różne grupy bakterii prowadzą na różnych etapach, a produkty jednej reakcji są wykorzystywane jako substrat dla kolejnych etapów.

Podczas hydrolizy woda i enzymy pozakomórkowe rozbijają strukturę związków, takich jak białka, celuloza czy skrobia, przekształcając na monomery i oligomery, takie jak glukoza, kwasy tłuszczowe i aminokwasy. Bakterie hydrolityczne rozmnażają się bardzo szybko, a ten etap zachodzi z dużą prędkością. Jednak w przypadku surowców bogatych w ligninę degradacja polimerów na bazie ligniny staje się etapem ograniczającym szybkość. Na tym etapie procesu AD niektóre związki nadają się już do przekształcenia w biogaz, ale większość składników nadal wymaga dalszych etapów konwersji. Następnym etapem jest kwasogeneza, w której wiodące bakterie są kwasotwórcze. Produkty hydrolizy są głównie przekształcane w krótkołańcuchowe lotne kwasy tłuszczowe (VFA), alkohol (etanol lub metanol), glicerol i aceton. Podczas tego procesu powstają produkty uboczne, takie jak CO₂, H₂, NH₃, alkohole i śladowe ilości innych związków. Szybka produkcja VFA, jeśli nie jest odpowiednio zarządzana, może prowadzić do akumulacji w reaktorze AD i toksyczności digestatu. Bakterie acetogenne są odpowiedzialne za następny etap, zwany acetogenezą. W tym etapie octan, CO₂ i H₂ są generowane z produktów z poprzedniego etapu i niektórych długołańcuchowych kwasów tłuszczowych z pierwszego etapu. W tym procesie nadmierne stężenie H₂ może spowolnić proces AD, ale bakterie metanogenne zużywają wytworzony wodór. Jest to przykład potrzeby współpracy między różnymi typami mikroorganizmów niezbędnych do skuteczności procesu AD, aktywujących się na różnych etapach operacyjnych. Ostatni etap nazywa się metanogenezą, w którym CH₄ jest wytwarzany ze wszystkich produktów pośrednich obecnych w fermentatorze. Octan i wodór są przekształcane w CO₂ i CH₄. Proces ten jest ściśle beztlenowy, ponieważ bakterie acetofilowe i hydrogenofilowe odpowiedzialne za tę reakcję nie mogą przetrwać w obecności tlenu.

Bez wątplenia wybitnym liderem pod względem produkcji biogazu i liczby biogazowni w Europie są Niemcy, które w 2020 r. miały już ponad 10.000 funkcjonujących

biogazowni. W Niemczech rocznie produkowano 52.158 GWh energii, a w 2018 r. prawie 13% odnawialnej energii elektrycznej wytwarzano z biogazu i wykorzystywano głównie do produkcji energii elektrycznej i ciepła. Niemiecki model opiera się na kiszonce kukurydzianej jako głównym substracie do produkcji biogazu. Istnieje znaczny potencjał wykorzystania małych instalacji AD zasilanych głównie gnojowicą; jednak instalacje wykorzystujące rośliny energetyczne jako substrat mają wyższy potencjał elektryczny [Liebetau i in., 2021].

W Wielkiej Brytanii, Szwajcarii i Francji działa ponad 600 biogazowni [Théobald, 2019; Lukehurst i Banks, 2021; Baier, 2019]. W Wielkiej Brytanii większość substratów wykorzystywanych w biogazowniach to ścieki ze względu na przepisy, zgodnie z którymi nie więcej niż 50% surowców może pochodzić z roślin energetycznych. Istnieją również znaczne ograniczenia dotyczące rodzaju instalacji, która może być wykorzystywana do produkcji biogazu i miejsca, w którym jest on wytwarzany [Lukehurst i Banks, 2021]. W Szwajcarii substraty są podobne i chociaż liczba działających elektrowni jest podobna, odnotowana produkcja energii była prawie 3 razy niższa [Baier, 2019] w porównaniu z energią wytwarzaną we Francji. We Francji od kilku lat obserwuje się silny rozwój biogazowni w gospodarstwach rolnych i scentralizowanych, których celem jest odzyskiwanie biogazu w celu produkcji energii elektrycznej do samoobsługi. Na przykład w 2017 r. 113 z 240 wysypisk śmieci wykorzystywało biogaz. Stwierdzono, że około 47% odzyskanej energii jest przekształcane w energię elektryczną, 43% w ciepło, a prawie 10% w biometan. Surowiec

W surowym materiale wykorzystywane do produkcji biogazu we Francji to pozostałości z oczyszczalni ścieków, bioodpady, odpady rolnicze i przemysłowe oraz składowiska odpadów [Théobald, 2019].

W Austrii i Szwecji w 2020 r. działało prawie 300 biogazowni [Bochmann, 2021; Ammenberg i in., 2021]. Podczas gdy w Austrii większość wykorzystywanych surowców stanowią obornik i odpady organiczne, w Szwecji nacisk kładzie się na wykorzystanie osadów ściekowych, które stanowią prawie 50% wykorzystywanego substratu. Ponadto wykorzystuje się bioodpady, odpady rolnicze i przemysłowe oraz składowiska odpadów [Ammenberg i in., 2021]. Porównując ilość energii produkowanej rocznie, w Szwecji wydajność produkcji była 3,4 razy wyższa niż w Austrii. Austriackie przepisy wymagają, aby co najmniej 30% substratu wykorzystywanego do produkcji biogazu stanowił obornik, aby uzyskać taryfę gwarantowaną. W przypadku wykorzystania odpadów organicznych taryfa ta może zostać obniżona o 20% [Bochmann, 2021].

W 2018 r. w Holandii odnotowano 250 biogazowni. Chociaż liczba ta pozostała niemal taka sama (252) do 2019 r., efektywność energetyczna tej instalacji była naprawdę imponująca.

W raporcie z 2018 r. zarejestrowano tylko 95 instalacji współsubstratowych, podczas gdy roczna produkcja energii wyniosła 3.720,83 GWh/rok [Dumont i Siemers, 2021], co jest liczbą podobną do wyniku osiągniętego przez ponad 600 francuskich biogazowni. Większość holenderskich fermentatorów wykorzystuje lokalne odpady rolnicze i zwierzęce jako surowiec do produkcji biogazu. Wiele obiektów jest technologicznie przystosowanych do rafinacji biogazu do biometanu, który może być stosowany jako substytut gazu ziemnego i może być bezpośrednio wtryskiwany do sieci gazu ziemnego. W Danii liczba biogazowni (która w 2020 r. wynosiła 166) jest o ponad 100 mniejsza niż w Szwecji i Austrii, a ilość wytwarzanej energii jest bardzo porównywalna z tą osiąganą przez jej skandynawskiego sąsiada i znacznie wyższa niż w Austrii. Istnieje silna inicjatywa pełnego wykorzystania pofermentu z roślin rolniczych, który jest następnie wykorzystywany jako nawóz do upraw. W Danii do 2020 r. ograniczono również wykorzystanie nie więcej niż 12% upraw energetycznych do produkcji biogazu jako surowca AD. Nowe rozporządzenie miało na celu dalsze obniżenie tego limitu [Al Saedi i Lorenzen, 2021].

W Polsce w 2020 r. działało 116 biogazowni [Banasik i in., 2022], co stanowi znaczny wzrost od 2014 r., kiedy to działało 45 instalacji [O&G, 2021]. Surowcami wykorzystywanymi do produkcji są głównie odpady rolnicze, obornik i rośliny energetyczne. W ostatnich latach obserwuje się systematyczny wzrost zużycia surowców odpadowych wykorzystywanych do produkcji biogazu rolniczego. Udział substratów takich jak kiszonka z kukurydzy, zboża czy owoce i warzywa wykorzystywanych w polskich biogazowniach w 2019 r. wyniósł zaledwie 10,6%, co jest najniższym wynikiem od początku rozwoju biogazowni w tym kraju. Energia wytworzona w tym roku z biogazowni wyniosła 306.396 mln m³.

Najmniej biogazowni znajduje się w Norwegii. W tym skandynawskim kraju w 2020 roku działało 46 biogazowni, z czego 6 to instalacje rolnicze, 13 zmodernizowanych do produkcji gazu transportowego, a 2 podłączone do lokalnej sieci gazowej. Około 40% wydobywanego gazu jest wykorzystywane do celów transportowych, a całkowita produkcja w 2019 roku wyniosła 922 GWh. Dominującym substratem wykorzystywanym do eksploatacji biogazowni w Norwegii są osady ściekowe i odpady żywnościowe [Lying, 2021].

Rozwój przemysłu biogazowego w Europie jest widoczny, chociaż dynamika różni się w zależności od kraju. Przedstawiono różne modele, które opierają się na różnych rodzajach surowców wykorzystywanych do produkcji biogazu i proporcjach substratów wykorzystywanych w kofermentatorach. Niekwestionowanym pionierem w dziedzinie tego odnawialnego źródła energii są oczywiście Niemcy. Jednakże wysiłek włożony w poprawę niezależności energetycznej i wpływu na środowisko znajduje odzwierciedlenie w rosnącej

liczbie działających biogazowni w innych krajach europejskich, co daje nadzieję na szybki postęp w kierunku całkowitego zniesienia konwencjonalnej eksploatacji paliw kopalnych. Wybrano charakterystyczne gospodarstwo, w którym występuje substrat niezbędny w procesie fermentacji metanowej gnojowicy z chowu trzody chlewnej. Analizie poddano kogenerator, który stanowi potencjalne zapotrzebowanie na energię z punktu widzenia polskiej energetyki i rolnictwa w kontekście produkcji energii odnawialnej. Nowością jest zastosowanie jednostki kogeneracyjnej, która została dostosowana do jej funkcjonalności, z uwzględnieniem oceny perspektyw optymalizacji układu kogeneracyjnego w kontekście wykorzystania odnawialnych źródeł energii w postaci biogazu rolniczego. Najlepszą metodą była próba określenia warunków pracy kogeneratora w celu opracowania optymalizacji biogazowej jednostki kogeneracyjnej produkującej energię elektryczną i ciepło w mikroinstalacji na potrzeby indywidualnego gospodarstwa rolnego. Problem ten został podjęty przez Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, Państwowy Instytut Badawczy w Falentach oraz Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie w ramach projektu (okres trwałości projektu) BIOGAS & EE finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju i realizowanego w ramach programu BIOSTRATEG 1.

4.3.5. Inwestycja w biogazownię rolniczą

Biogazownie rolnicze są obecnie stabilnym źródłem energii elektrycznej i w coraz większym stopniu produkcji ciepła [Shah i in., 2015]. Stanowią one jedną z rozwojowych technologii konwersji biomasy z odnawialnych źródeł energii, stąd konieczne jest prowadzenie pogłębionych analiz na poziomie decyzji inwestycyjnych [Przesmycka i Podstawka, 2016].

Od 15 lat w Niemczech i Danii budowane są najbardziej zaawansowane technicznie biogazownie na świecie. W Niemczech ustawa o energii odnawialnej po raz pierwszy weszła w życie w 2000 r. [Theuerl i in., 2019] i zobowiązała przedsiębiorstwa dostarczające energię do wprowadzania do sieci energii elektrycznej wytworzonej ze źródeł odnawialnych po gwarantowanych taryfach przez okres 20 lat [Kemausour i in., 2018]. Zmiany w ustawie o odnawialnych źródłach energii z 2004 i 2009 r. ustanawiają silne zachęty do uprawy roślin energetycznych przeznaczonych do fermentacji beztlenowej [Wałowski, 2019]. W latach 2000-2012 liczba biogazowni wzrosła z 1050 do 8292 [GBA, 2021]. Niemiecka produkcja biogazu stanowi obecnie około 50% produkcji w Unii Europejskiej (UE) [Scarlat i in., 2018]. W krajach takich jak Austria, Szwajcaria, Szwecja rozwój biogazowni utrzymuje się na nieco niższym poziomie [Kosewska i Kamiński, 2008]. W innych krajach, takich jak Hiszpania,

Włochy, Belgia i Holandia pierwsze nowoczesne biogazownie działają już od kilku lat, podczas gdy inne są w trakcie budowy. W Europie wiele innych krajów jest bardzo zainteresowanych rozwojem biogazowni, zwłaszcza: Polska, Węgry, Litwa, Anglia, Irlandia [Oniszk-Popławska i in., 2003]. Obecnie UE ma do czynienia z ogromnymi i rosnącymi ilościami odpadów organicznych [Cucui i in., 2018] (odpady organiczne z przemysłu spożywczego, organiczne odpady komunalne, pozostałości po rolnictwie, oborniku i uprawach itp.), które wymagają unieszkodliwiania i specjalnego przetwarzania [Cherubini i Strømman, 2011]. W UE liczba biogazowni stale rosła, z 6.227 do 17.662 w latach 2009÷2016 [Deremince i Königsberger, 2018]. Od 2020 r. Europa dominuje na rynku biogazu i jest największym producentem biogazu, z około 18.943 biogazowniami. Według Europejskiego Stowarzyszenia Biogazu (EBA) produkcja biogazu w Europie ma osiągnąć do 2050 roku 98 miliardów metrów sześciennych biometanu, co stanowi wzrost o 4.800% obecnego poziomu produkcji. Oczekuje się, że plan zwiększenia produkcji biogazu przyciągnie inwestycje w budowę biogazowni, co ma wspierać rozwój biogazowni w najbliższej przyszłości [BPM, 2021].

W USA w latach 2002÷2016 zrealizowano 23 kompletne projekty biogazowe przy wsparciu Narodowego Instytutu Żywności i Rolnictwa - obecnie 2 projekty są realizowane od 2017 roku. Celem jest zastosowanie wysokowydajnych systemów inżynierskich zdolnych do skonwersji skoncentrowane strumienie odpadów w nawozy, energię i czystą wodę [Project Title, 2021].

Biogazownie to obecnie rozwój technologiczny na dwóch kontynentach: Azji i Europy. W Chinach, przy gospodarstwach rolnych funkcjonuje kilka milionów małych, bardzo prostych instalacji biogazowych zasilanych odpadami rolno-spożywczymi, wykonanych we własnym zakresie prostymi metodami, które są tanie w budowie i efektywne. Produkowany w ten sposób biogaz chińscy rolnicy wykorzystują do gotowania i oświetlania domów na własne potrzeby. W Indiach podobnych biogazowni jest około miliona. Również produkcja biogazu w Japonii i Korei Południowej. Jest realizowana ale w nowoczesny sposób, oparty o europejskie technologie biogazowe.

Unia Europejska bardzo szeroko definiuje biomasę, za którą przyjmuje podatne na rozkład biologiczny frakcje produktów, odpady i pozostałości przemysłu rolnego (w tym substancjami roślinnymi i zwierzęcymi), leśnictwa i związanych z nim gałęzi gospodarki, jak również podatne na rozkład biologiczny frakcje odpadów przemysłowych i miejskich. Ponadto w ostatnich kilku dziesięcioleciach w krajach uprzemysłowionych szczególnego znaczenia nabrał problem zanieczyszczenia środowiska. Wiąże się to z intensyfikacją

produkcji rolniczej i hodowlanej oraz ze stopniem przetwarzania produktów rolno-spożywczych. Obserwuje się znaczny wzrost ilości odpadów i zanieczyszczeń organicznych, które powstają w rolnictwie i przemyśle z nim związanym.

W krajowym planie działania dla Polski obejmującym energię ze źródeł odnawialnych zakładano, że do 2020 r. w Polsce będzie 980 MW zainstalowanej mocy elektrycznej w biogazowniach. Plany zakładały także, że do 2023 r. powstanie 2 tys. takich instalacji, co w obecnych warunkach gospodarczych nie jest możliwe do realizacji. W ciągu niespełna 3 lat musiałyby powstać instalacje o mocy 750 MW, czyli łącznie od 750 do 800 biogazowni rolniczych. Te liczby są nieosiągalne w tak krótkim czasie. W końcu roku 2019 w Polsce funkcjonowało 310 biogazowni, w tym tylko 120 biogazowni rolniczych o łącznej mocy elektrycznej 101,3 MW.

Obecnie 80% działających na świecie biogazowni funkcjonuje w Niemczech, w tym dwie największe - o mocy 20 MW każda, które w obu przypadkach generują zapotrzebowanie na substrat zbierany z powierzchni 12 tysięcy hektarów.

Z analizy literatury wynika, że wysokie tempo wzrostu do końca 2012 r. spowodowane jest szczodrymi dotacjami rządowymi, natomiast po redukcji dopłat następuje ciągłe wyczerpywanie się instalacji biogazowych. W miarę wzrostu stałe podpory również nie uwzględniają wielkości roślin, a także kosztów. W rzeczywistości najbardziej rozpowszechniona moc elektryczna na tabliczce znamionowej elektrowni to 1 MW, a koszt jej budowy waha się w granicach (4,2÷4,8) mln EUR, 65% dla urządzeń biologicznych, a reszta dla bloku energetycznego. Różne rodzaje roślin energetycznych (np. kiszonka z kukurydzy lub pszenicy), obornik i ścieki (np. bydło, mieszanka obornika wieprzowego lub kurzego) jest wykorzystywana jako surowiec, podczas gdy obornik powoduje problemy operacyjne dla zakładu [Benato i Macor, 2019].

Należy pamiętać, że te ORC muszą być zaprojektowane z wykorzystaniem danych pomiarowych, a nie tabliczek znamionowych, ponieważ każdy silnik jest kalibrowany na podstawie składu biogazu, na który z kolei wpływają surowce biomasy. Ponadto istnieje pilna potrzeba opracowania nowej polityki w zakresie energii odnawialnej, która wprowadza dodatkowe taryfy gwarantowane dla energii elektrycznej wytwarzanej z tych jednostek odzysku ciepła odpadowego w celu poprawy zrównoważenia sektora biogazu [Benato i Macor, 2017].

Nakłady inwestycyjne - budowa instalacji uszlachetniania biogazu do parametrów gazu ziemnego wiąże się ze znacznymi nakładami. Całkowita kwota nakładów inwestycyjnych i rocznych kosztów operacyjnych zależy przede wszystkim od wielkości

instalacji i rodzaju zastosowanej technologii. Na podstawie analizy aktualnie funkcjonujących instalacji tego typu w Europie można oszacować, że średnie koszty inwestycji wahają się w granicach (0,5÷0,8) mln EUR w przypadku instalacji biogazowej produkującej 250 Nm³ biogazu/h – ekwiwalent 500 kW_{el}; do (1,2÷1,5) mln EUR dla instalacji wytwarzającej 1.000 Nm³/h – ekwiwalent 2 MW_{el}) [Wałowski, 2021]. Grupa docelowa, czyli grupa mająca dostęp do substratu (gnojowicy świńskiej) i ewentualnie problemy z jego utylizacją dla optymalnego inwentarza żywego (1.200÷2.400) prosiąt lub tuczników na 1 gospodarstwo. Wszelkie dotychczasowe doświadczenia zagraniczne i krajowe wskazują, że sektor biogazu rolniczego elektrownie rządzą się zasadami ekonomii skali, tj. jednostkowe nakłady inwestycyjne rosną lub maleją wraz ze zmianą wydajności elektrowni. Trudno obecnie wskazać kryteria techniczno-ekonomiczne [Curkowski i in., 2011] podziału na mikrogazownie o mocy elektrycznej poniżej 100 kW_{el}, małe biogazownie (100÷500) kW_{el}, średnie (500÷1.000) kW_{el} i duże powyżej 1.000 kW_{el}, ponieważ nie ma większej próby statystycznej inwestycji realizowanych w Polsce. Niejasne jest również, w jakim stopniu pojedyncza biogazownia ma efekt skali determinowany przez elementy indywidualnej oceny inwestycji, takie jak konieczność rozbudowy niezbędnej infrastruktury itp. Różny jest również rozkład elementów ryzyka w dużych i małych obiektach, wpływających na podstawową działalność inwestora. Ogólny podział poszczególnych kategorii wydatków na podkomponenty zależy od wyposażenia ciągu technologicznego biogazowni, ale można zauważyć pewne istotne i powtarzające się kategorie wydatków. W każdej z analizowanych biogazowni największy udział mają dwa podstawowe elementy: budowa komór fermentacyjnych oraz zakup jednostek kogeneracyjnych. Każdy z tych elementów stanowi około 20% nakładów inwestycyjnych [Curkowski i in., 2011].

Z kolei procentowy udział każdej kategorii zależy od wyboru opcji technologicznych. Przykłady wyboru opcji technologicznych, które mogą znacząco przesunąć procentowy udział poszczególnych nakładów w nakładach inwestycyjnych, są następujące [Curkowski i in., 2011]:

- ze względu na brak wystarczającej powierzchni terenu (dodatkowe kilka hektarów) zamiast lagun inwestor decyduje się na budowę zbiornika żelbetowego do przechowywania przefermentowanej pulpy (rozwiązanie to jest kilkakrotnie droższe);
- biogazownia będzie przetwarzać odpady niebezpieczne wymagające obróbki termicznej i ciśnieniowej w temperaturze 133⁰C, co zwiększy nakłady inwestycyjne;

- budowa obiektu i urządzeń do sterylizacji może zwiększyć koszty budowy biogazowni nawet o 20%, a odpady takie jak odpady z rzeźni mają duży potencjał do produkcji biogazu, stąd jego zastosowanie znacznie zwiększy opłacalność projektu;
- inwestor sprzeda ciepło odbiorcy końcowemu zlokalizowanemu kilka kilometrów od biogazowni, co spowoduje znaczny wzrost nakładów inwestycyjnych na rozbudowę rurociągów ciepłowniczych.

Opłacalność inwestycji - informacje o sporządzeniu analizy opłacalności inwestycji pozwolą na opracowanie modelu wspomagającego proces decyzyjny dotyczący budowy biogazowni [Przesmycka i Podstawka, 2016]. Inwestorzy mają największe zaufanie do metod oceny efektywności ekonomicznej inwestycji, takich jak: NPV, IRR, SPBT, DPP i PI.

Wartość bieżąca netto (NPV - Net Present Value) to różnica między bieżącą wartością wpływów pieniężnych a bieżącą wartością wypływów pieniężnych w danym okresie. NPV jest wykorzystywane w budżetowaniu kapitałowym i planowaniu inwestycji w celu analizy opłacalności planowanej inwestycji lub projektu. NPV jest wynikiem obliczeń służących do znalezienia dzisiejszej wartości przyszłego strumienia płatności [Machała, 2001].

Wewnętrzna stopa zwrotu (IRR - Internal Rate of Return) to miernik wykorzystywany w analizie finansowej do oszacowania opłacalności potencjalnych inwestycji. IRR to stopa dyskontowa, która sprawia, że wartość bieżąca netto (NPV) wszystkich przepływów pieniężnych jest równa zero w analizie zdyskontowanych przepływów pieniężnych. Ogólnie rzecz biorąc, im wyższa wewnętrzna stopa zwrotu, tym bardziej pożądana jest inwestycja. IRR jest jednolita dla inwestycji różnego rodzaju i jako taka może być wykorzystywana do oceniania wielu potencjalnych inwestycji lub projektów na stosunkowo równych zasadach. Ogólnie rzecz biorąc, porównując opcje inwestycyjne o innych podobnych cechach, inwestycja o najwyższej wewnętrznej stopie zwrotu prawdopodobnie zostałaby uznana za najlepszą [Rogowski, 2013].

NPV oraz IRR pozwalają na ocenę poszczególnych projektów inwestycyjnych na podstawie analizy zdyskontowanych przepływów pieniężnych. Są one stosowane przy stałej stopie dyskontowej w okresie badanym [Szlachta, 2005].

Stopa NPV to różnica między zdyskontowanymi przepływami pieniężnymi a początkowymi wydatkami, wyrażona wzorem (1):

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (1)$$

gdzie: NPV – wartość bieżąca netto, CF_t – przepływy pieniężne w okresie t, r – stopa dyskontowa, I₀ – nakład początkowy, t – kolejne okresy (lata) eksploatacji biogazowni.

IRR - wewnętrzna stopa zwrotu oznacza średni zwrot w całym okresie życia inwestycji przynoszący 1 EUR to przeliczenie 4,53 zł (2021 maja 14, 05:51 UTC), kapitału zaangażowanego w inwestycję. Innymi słowy, jeśli 1 EUR całkowitego kapitału zaangażowanego w daną inwestycję daje zysk netto w wysokości 0,04 EUR (IRR wynosi 20%), aby inwestycja była opłacalna, koszt, po jakim można pozyskać kapitał na sfinansowanie inwestycji nie może przekroczyć 20% [Curkowski i in., 2011].

SPBT (Simply Pay Back Time) oznacza czas potrzebny na odzyskanie nakładów inwestycyjnych poniesionych na projekt. Określa moment, w którym świadczenie brutto zrekompensuje poniesione nakłady [Kuczowic i Kuczowic, 2006]. Najczęstszym statycznym kryterium oceny efektywności ekonomicznej jest prosty czas zwrotu SPBT. Definiowany jest jako czas potrzebny na odzyskanie nakładów inwestycyjnych poniesionych na realizację danego projektu. Liczona jest od momentu rozpoczęcia inwestycji do momentu, w którym suma korzyści brutto uzyskanych w wyniku realizacji inwestycji zrównoważy poniesione nakłady [EKONOM, 2021].

Zdyskontowany okres zwrotu (DPP) to zmodyfikowana wersja okresu zwrotu, który uwzględnia wartość pieniądza w czasie. Obie metryki są używane do obliczania czasu potrzebnego na osiągnięcie przez projekt „osiągnięcia progu rentowności” lub uzyskania punktu, w którym wygenerowane przepływy pieniężne netto pokrywają początkowy koszt projektu. Zarówno okres zwrotu, jak i zdyskontowany okres zwrotu można wykorzystać do oceny rentowności i wykonalności konkretnego projektu [Finance, 2021].

Wskaźnik opłacalności (PI), alternatywnie określane jako wskaźnik inwestycji wartości (VIR) lub wskaźnik inwestycji zysku (PIR), opisuje wskaźnik, który reprezentuje relację między kosztami i korzyściami proponowanego projektu. Jest obliczany jako stosunek między bieżącą wartością przyszłych oczekiwanych przepływów pieniężnych a początkową kwotą zainwestowaną w projekt. Wyższy PI oznacza, że projekt zostanie uznany za bardziej atrakcyjny [Terms, 2021].

Kolejnym narzędziem inwestycyjnym jest Analiza Opcji Rzeczywistych (ROA) [Kozlova, 2017], która została wykorzystana do wyceny energii odnawialnej przez Angelikę Menegaki i in. 2008 [Menegaki, 2008], obejmujący szeroki zakres technik analizy kosztów i korzyści. Następnie ROA zaczęto dopracowywać i wykorzystywać m.in. w energetyce do oceny inwestycji [Fernandes i in., 2011]. Obecnie ROA jest uważana za najbardziej odpowiednie

narzędzie do wyceny inwestycji, ze względu na charakter badań [Chang, 2013], które doprowadziły do wszechstronności zastosowania. Powszechną praktyką jest rozróżnianie ROA na różnych etapach projektu inwestycyjnego. Jednak w przeciwieństwie do złożonych projektów, takich jak górnictwo, gdzie ROA można określić na podstawie wieku czterech różnych etapów, a mianowicie poszukiwań, rozwoju, wydobywania i rekultywacji [Savolainen i in., 2016], projekty energii odnawialnej charakteryzują się ograniczoną elastycznością. Cesena i in. [Ceseña i in., 2013] zidentyfikowali tylko dwa etapy inwestycji w energię odnawialną, na których można było znaleźć elastyczność: etap planowania, kiedy inwestycja nie została jeszcze dokonana, oraz etap operacyjny, kiedy projekt jest już wybudowany [Kozlova, 2017]. Najczęściej identyfikowaną opcją realną jest opcja odroczenia inwestycji lub opcja czasowa. W wielu przypadkach, w obliczu różnych niepewności, często rozsądne jest poczekanie, aż część tej niepewności zostanie rozwiązana. Opcja odroczenia jest modelowana za pomocą technik, które umożliwiają porównanie różnych alternatyw czasowych, w większości przypadków za pomocą drzew dwumianowych [Santos i in., 2014] lub poprzez włączenie programowania dynamicznego do modeli sformułowanych przez równania różniczkowe cząstkowe [Boomsma i Linnerud, 2015]. Połączenie programowania dynamicznego z innymi metodami jest również wykorzystywane do włączenia wyboru technologii [Kumbaroğlu i in., 2008] lub wyboru wydajności [Martínez-Ceseña i Mutale, 2011] do optymalnego projektu inwestycji. Drugą najczęściej badaną opcją, opcją inwestowania, odzwierciedla pojęcie całego projektu inwestycyjnego jako opcji rzeczywistej [Kim i in., 2012]. Dla tego wariantu proponuje się rozwiązania z wykorzystaniem drzew dwumianowych, drzew scenariuszowych lub drzew decyzyjnych jako najwygodniejszej metody modelowania, różnych scenariuszy rozwoju B+R [Schmitz i Madlener, 2015]. Możliwość przełączania wejść lub wyjść jest charakterystyczna dla projektów bioenergetycznych, których działania można dostosować do zmieniających się cen paliw, surowców lub produktów wyjściowych. W badaniach takich obiektów często wykorzystuje się symulację Monte Carlo [Bastian-Pinto i in., 2009]. Pojawiającym się trendem jest włączanie teorii zbiorów rozmytych do wyceny ROA, która pozwala na uchwycenie nie tylko niepewności, ale również niedokładności. Sheen [Sheen, 2014] łączy metodę Blacka-Scholesa [Kozlova, 2017] z danymi wejściowymi sformułowanymi rozmyto, a Kozlova i in. [Kozlova i in., 2016] wykazują zastosowanie samodzielnej metody rozmytej spłaty do wyceny ROA projektu energii odnawialnej. Rozważając projektowanie badań ROA z szerszej perspektywy, należy zwrócić uwagę na rzadkie próby poparcia wyceny ROA dowodami empirycznymi. Heggedal i in. [Heggedal i in., 2011], na przykład, wykonaj analizę regresji danych z licencji

budowlanych i wykaz, że inwestorzy posiadający portfel licencji działają zgodnie z teorią ROA, podczas gdy zachowanie jednego właściciela zakładu odzwierciedla reguły inwestycyjne podyktowane tradycyjną analizą NPV. Więcej dowodów potwierdzających zachowanie inwestorów zgodnie z teorią ROA pochodzi z tego samego zbioru danych w późniejszych pracach [Fleten, 2016].

4.3.6. Aspekty produkcji biogazu w zależności od rodzaju substratu

Na przestrzeni 15 lat funkcjonowania biogazowni rolniczych w Polsce można zaobserwować wyraźne zmiany w strukturze wykorzystania substratów. Pierwsze biogazownie, wzorowane na technologiach stosowanych w Niemczech, bazowały na kiszonkach z kukurydzy oraz płynnych kosubstratach z rolnictwa (obornik) i przetwórstwa (wywary, serwatka) [Żyłka i in., 2020; Banasik i in., 2022; PIBNASC, 2022]. Stopniowo kiszonki z upraw docelowych zastępowano produktami ubocznymi przemysłu rolno-spożywczego. Rolnictwo i przemysł bazujące na komponentach rolniczych produkują wiele surowców, które można wykorzystać do produkcji biogazu. Odpowiednimi substratami dla biogazowni są zarówno produkty roślinne, jak i zwierzęce, które zawierają związki organiczne i mogą być fermentowane [Ignatowicz i in., 2021; Kogut i in., 2014]. Surowce do produkcji biogazu dzielą się na monosubstraty i kosubstraty. Monosubstrat to substancja, która ma zdolność fermentacji dzięki obecności w niej bakterii metanowych, np. gnojowica, obornik, zawartość żołądków zwierząt, zwłaszcza przeżuwaczy, i która ma szeroki skład makro- i mikroelementów niezbędnych do wzrostu mikroorganizmów. Współsubstrat to materiał, który jest dodawany do fermentatora w celu zwiększenia wydajności procesu, uzyskania odpowiedniego nawodnienia lub zapobiegania zahamowaniu [Ignatowicz i in., 2021] Należą do nich produkty uboczne i odpady rolnicze, ukierunkowana biomasa z upraw energetycznych, odpady szklarniowe itp. Wykorzystane surowce wpływają zarówno na koszty inwestycyjne, jak i operacyjne. Szczególną grupę substratów stanowi re-food (w 2021 r. stanowił on 2,97%), czyli żywność pochodząca ze sklepów, magazynów, transportu, która nie może być wprowadzona do obrotu i która została wycofana z rynku z różnych przyczyn. Duży udział tego substratu może stwarzać problemy dla tych biogazowni, które zostały zaprojektowane zgodnie ze standardami typowymi dla tzw. technologii NaWaRo (Nachwachsende Rohstoffe), powszechnej w Niemczech, która wykorzystuje głównie kiszonki roślinne i płynne substraty z rolnictwa i przetwórstwa [Banasik i in., 2022].

Surowce gorzelniane 18,98%, obornik 16,41%, odpady z przemysłu rolno-spożywczego 16,61% i pozostałości z przetwórstwa owoców i warzyw 16,20% (pozostałości

owoców i warzyw, odpady poprodukcyjne) stanowiły największą część wykorzystania substratu do produkcji biogazu rolniczego w 2021 r. [Banasik i in., 2022; PIBNASC, 2022]. Popularność tych surowców wynika głównie z ich wysokiej dostępności, łatwego transportu i niskich kosztów pozyskania. Słoma, trawy z nieuprawianych trwałych użytków zielonych lub biomasa możliwa do uzyskania z gruntów marginalnych nienadających się do produkcji żywności pozostają znaczącym i niewykorzystanym zasobem. Te surowce są trudne do fermentacji bez zastosowania odpowiednich procesów wstępnej obróbki. Agroenergetyka jest coraz częściej obwiniana za rosnące ceny żywności na świecie, a ten aspekt wymusza wprowadzanie biopaliw drugiej i trzeciej generacji, czyli tych wytwarzanych z odpadów, surowców lignocelulozowych i alg. Wzrost wykorzystania produktów ubocznych i odpadów z rolnictwa i przetwórstwa w polskich biogazowniach zwiększy produkcję biogazu, nie zmniejszając zasobów ziemi niezbędnych do utrzymania bezpieczeństwa żywnościowego kraju. Jednocześnie nastąpi rozwój produkcji biopaliw drugiej generacji, racjonalne gospodarowanie produktami ubocznymi i odpadami, harmonizacja przemysłu biogazowego z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym. Wymaga to jednak wsparcia nowoczesnych technologii fermentacji metanowej i metod wstępnego kondycjonowania nowego asortymentu substratów.

W celu wydajnego procesu fermentacji beztlenowej (AD), oprócz rodzaju substratu, kluczowa jest optymalizacja kilku warunków procesu. Krytycznymi parametrami są temperatura, pH, szybkość ładowania organicznego (OLR), czas retencji hydraulicznej (HRT) lub stosunek węgla (C) do azotu (N).

Stwierdzono, że proces AD może przebiegać wydajnie w zakresie temperatur (55÷60) °C, nazywamy go fermentacją termofilową. Proces ten wymaga znacznej energii grzewczej, ale skutkuje wysoką produkcją biogazu. Fermentacja mezofilowa zachodzi w temperaturze (35÷40) °C, co zapewnia bardziej ekonomiczne warunki pracy, ale skutkuje niższą produkcją biogazu [Kougias i Angelidaki, 2018; Borja, 2011; Sawyerr i in., 2019; Weiland, 2010].

OLR to parametr odnoszący się do szybkości wprowadzania surowca organicznego na jednostkę objętości fermentatora. Zmienia się on w zależności od rodzaju substratu używanego do produkcji biogazu i jest określany eksperymentalnie.

HRT odnosi się do średniego czasu, w którym surowiec pozostaje w fermentatorze. Według Nsair [Nsair i in., 2020] optymalną produkcję biogazu można uzyskać przy różnych HRT, w zależności od używanego substratu. W literaturze oceniono różne HRT, aby znaleźć optymalne wartości dla różnych substratów. Przyjęty HRT wahał się od 0,75 do 60 dni. Optymalny HRT sugerowano w zakresie od 16 do 60 dni [Nsair i in., 2020; Dareioti

i Kornaros, 2015; Schmidt i in., 2014]. Według Schmidta, aby zapobiec wypłukiwaniu mikroorganizmów wymaganych do procesu, HRT nie powinien być krótszy niż 10 do 25 dni. Innym parametrem, który silnie wpływa na proces AD, jest stosunek C do N w podłożu. Mikroorganizmy wykorzystują C, jako źródło energii, podczas gdy N jest niezbędny do ich wzrostu i metabolizmu. Niski stosunek C/N może prowadzić do nadprodukcji amoniaku, co hamuje proces, a tym samym obniża wydajność produkcji biogazu. Z drugiej strony zbyt wysoki stosunek C/N może skutkować niewystarczającym stężeniem N dla metabolizmu i wzrostu bakterii.

Bardzo trudnym parametrem do zdefiniowania jest pH, ponieważ różne rodzaje bakterii obecnych w browarniku wymagają lub preferują różne pH dla optymalnej wydajności. Utrzymanie optymalnego pH dla wszystkich mikroorganizmów obecnych w tym samym reaktorze jest trudnym zadaniem, a jeszcze bardziej skomplikowanym, jeśli podłoże ma różny skład składników odżywczych [Guide, 2022].

Obornik i gnojowica zwierzęca.

Polskie rolnictwo jest na swój sposób wyjątkowe w porównaniu z Europą. Według najnowszych danych, w Polsce produkuje się rocznie 99 milionów ton samych oborników bydlęcych i świńskich, z czego aż 78 milionów ton to obornik. Do tego należy dodać (nieuwzględnioną w obliczeniach) produkcję obornika drobiowego, którego jesteśmy największym producentem w Europie, oraz innych zwierząt - łącznie ponad 20 milionów ton. W Europie Zachodniej, ze względu na niewielką ilość produkowanego obornika, badania naukowe nad emisją gazów cieplarnianych skupiały się przede wszystkim na oborniku, który jest powszechny w tych krajach: podczas jego przechowywania, w trakcie i po zastosowaniu na polu. Tymczasem emisje CH_4 z gnojowicy są wielokrotnie mniejsze niż te występujące z obornika składowanego w przyzmacach. Dlatego też należy przeprowadzić badania nad procesami fermentacji i współfermentacji opartymi na substratach gnojowicowych i obornikowych.

Morken i in. [Morken i in., 2017] wykorzystali płynny nawóz krowi i mieszaninę odpadów spożywczych do zbadania stałych kinetycznych reaktorów CSTR podczas procesu przebiegającego ze wzrastającymi wskaźnikami obciążenia organicznego. Dopływ płynnego nawozu krowiego utrzymywano na stałym poziomie, ilość odpadów spożywczych wzrosła. Oceniono wydajność produkcji biogazu, osiągając maksymalną ilość uzyskaną z 1 m^3 objętości czynnej fermentatora równą $818,18 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{rok}$. Ilość energii uzyskanej z 1 m^3 biogazu (przy średniej zawartości CH_4) wyniosła $0,02166 \text{ MWh}$.

Rusanowska i in. [Rusanowska i in., 2018] badali wykorzystanie nawozu krowiego wraz z rośliną powszechnie stosowaną jako pasza dla zwierząt gospodarskich, *Sida hermaphrodita*, która ostatnio została zbadana jako potencjalna uprawa wysokoenergetyczna. Celem tego badania było zbadanie wpływu wstępnej obróbki biomasy lignocelulozowej na wydajność produkcji CH_4 . Przy stosunkowo dobrej jakości produktu (około 54% zawartości CH_4) ilość wyprodukowanego biogazu osiągnęła $9345,80 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{miesiąc}$, co przełożyło się na produkcję $0,06495 \text{ kWh}$ energii.

Tišma i in. [Tišma i in., 2018] badali proces beztlenowej współfermentacji obornika krowiego z dodatkiem kiszonki z całych roślin kukurydzy wstępnie przetworzonej biologicznie przez gatunek *T. versicolor*. Ten proces grzybowy, w którym substrat składa się z obornika krowiego, przefermentowanego produktu przemysłowego, grysu kukurydzianego i kiszonki kukurydzianej, skutkowało wydajnością biogazu wynoszącą $0,381 \text{ kgVS}^{-1}$ biogazu przy stosunkowo dobrej jakości biogazu, osiągając 62% zawartości CH_4 .

Comino i in. [Comino i in., 2009] zaprojektowali mobilny, pilotażowy reaktor beztlenowy i przeprowadzili próby przetwarzania mieszanki obornika krowiego i serwatki. Zaletą możliwości transportu tego typu mobilnego sprzętu jest to, że może on produkować biogaz i zarządzać odpadami rolniczymi. Autorzy [Comino i in., 2009] udowodnili, że poprzez przeniesienie wyników z instalacji pilotażowej do zastosowania w skali rzeczywistej można osiągnąć produkcję energii elektrycznej na poziomie $0,00886 \text{ MWh}$ na 1 t/d .

Herwintono i in. [Herwintono i in., 2020] zbadali jakość biogazu produkowanego w skali pilotażowej przy użyciu adsorberów NaOH i Ca(OH)_2 i wdrożyli system filtracji w celu wzbogacenia produkowanego gazu metanem. Używając mleka krowiego jako surowca, produkcja biogazu osiągnęła $0,00072750 \text{ m}^3/\text{h}$ przy użyciu NaOH jako adsorbera CO_2 , a zawartość CH_4 wzrosła o 14% w porównaniu z produkcją bez filtracji.

Cavinato i in. [Cavinato i in., 2009] porównali wydajność produkcji biogazu w instalacji w skali rzeczywistej i instalacji pilotażowej podczas termofilowej fermentacji beztlenowej obornika krowiego z innymi substratami. Udowodnili znaczenie stosowania odpowiednich warunków eksperymentalnych i zwiększania produkcji biogazu z $0,45$ do $0,62 \text{ m}^3/\text{kg VS}$ i zawartości CH_4 z 52% do 61%. Średnia dzienna produkcja biogazu wynosiła $10\,200 \text{ m}^3/\text{d}$. Analiza ekonomiczna wykazała, że produkcja energii elektrycznej ze średniej wielkości zakładu wyniosła 8.789 MWh/rok .

Kaparaju i in. [Kaparaju i in., 2002] badali wpływ dodawania czarnego cukru i surowca cukierniczego do upraw energetycznych i strawionego obornika krowiego w porównaniu z produkcją biogazu na skalę rolniczą. Odkryli, że gdy przemysłowe odpady cukiernicze były

współfermentowane z obornikiem krowim, zaobserwowano wzrost wydajności CH_4 o około 60%.

Ormaechea i in. [Ormaechea i in., 2018] dokonano oceny poprawy produkcji biogazu z obornika bydlęcego (CM) w skali instalacji pilotażowej, stosując:

- (a) wstępną obróbkę ultradźwiękową ($0,14456 \text{ kW}_h/\text{kg}$ całkowitej zawartości substancji stałych (TS), $0,11386 \text{ kW}_h$);
- (b) współfermentację z surową gliceryną (Gly) z przemysłu biodiesla (6%);
- (c) wstępną obróbkę w ($0,14456 \text{ kW}_h/\text{kg}$ TS; $0,09452 \text{ kW}_h$), zastosowaną do obu substratów przed beztlenową współfermentacją.

Reaktorem użytym w tym celu był reaktor ze złożem indukcyjnym o użytecznej objętości $1,25 \text{ m}^3$. Produkcja CH_4 z CM została zwiększona dzięki wstępnej obróbce ultradźwiękowej o niskiej energii ($0,14456 \text{ kW}_h/\text{kg}$ TS) ($0,29$ do $0,46 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg}$ lotnych substancji stałych (dodano VS)) i współfermentacji z Gly ($0,29$ do $0,44 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg}$ VS). Najlepsze wyniki osiągnięto, gdy mieszaninę CM + Gly poddano wstępnej obróbce (do $0,59 \text{ m}^3 \text{ CH}_4/\text{kg}$ VS) [Ormaechea i in., 2018].

Ferrer i in. [Ferrer i in., 2009] zwrócili uwagę na problem niedoboru wody w podmiejskim regionie Limy w Peru. Zaprojektowali niedrogi fermentator beztlenowy, aby zbadać wydajność produkcji biogazu z obornika i moczu świń, skupiając się na efektach wysokiej zawartości ciał stałych. Uzyskali wyższą produkcję biogazu z substratu składającego się z obornika świńskiego rozcieńczonego moczem w porównaniu z tym rozcieńczonym wodą. W pierwszym przypadku zawartość CH_4 w ekstrahowanym gazie była również wyższa. Zastosowanie moczu zamiast wody skutkowało produkcją biogazu ($0,0077 \text{ m}^3$ biogazu dziennie) i wydajnością $0,0766 \text{ m}^3$ biogazu kg VS^{-1} w temperaturze otoczenia. Zawartość suchej masy w oborniku wynosiła 8% TS/6% VS.

Asam i in. [Asam i in., 2011] zbadali, że dodanie kosubstratów, takich jak kiszonka z kukurydzy lub trawy, znacząco zwiększa wydajność produkcji biogazu nawet o 124%. Jeszcze bardziej spektakularny wynik uzyskali De Vries i in. [De Vries i in., 2010], wykazali również, że dodanie innych dodatków (kiszonki kukurydzianej, kiszonki kukurydzianej i gliceryny) zwiększyło wydajność produkcji biogazu o 568% w porównaniu z procesem z samym obornikiem świńskim. Natomiast współfermentacja obornika świńskiego z kiszonką z trawy zwiększyła całkowitą wydajność energetyczną o 226% w badaniu przeprowadzonym przez Zhang [Zhang i in., 2020a].

Xie i in. [Xie i in., 2017] zbadali, że beztlenowa współfermentacja kiszonki z trawy i obornika świńskiego w stosunku VS 1:1 była skuteczna w tym badaniu pilotażowym. Badanie

wykazało, że współfermentacja obornika świńskiego z kiszonką z trawy miała kilka zalet w porównaniu z monofermentacją PM, w tym wyższą zawartość CH_4 w biogazie, wyższe jednostkowe wydajności CH_4 z obornika świńskiego oraz wyższe usuwanie VS i rozpuszczalnego ChZT.

Kapłan i in. [Kapłan i in., 2021] opracowali nową strategię opartą na technice adsorpcyjno-absorpcyjnej polegającej na łączeniu mieszaniny węgla (węgiel aktywowany) i rudy darniowej (związki żelaza) w celu usunięcia siarkowodoru z biogazu uzyskanego z obornika świńskiego.

Wałowski [Wałowski, 2021] przeprowadził eksperymenty pilotażowe w celu zbadania składu jakościowego biogazu rolniczego produkowanego z gnojowicy świńskiej. Stwierdził silny związek pomiędzy systemem mieszania hydrodynamicznego substratu a objętościowym natężeniem przepływu biogazu dla średniej dobowej produkcji. Podstawą oceny produkcji biogazu jest tzw. przebieg zmian średniego dobowego przepływu gazu - należy zaznaczyć, że po 10 dniu produkcja biogazu ustabilizowała się i trwała 4 dni. Innowacyjnym rozwiązaniem do hydrodynamicznego żywienia było zastosowanie substratu polidispersyjnego. Doprowadziło to do stabilnej produkcji biogazu od 39 dnia. Substrat polidispersyjny, z którego powstaje biogaz rolniczy, zależy od paszy tuczniaka – przekłada się to na jakość biogazu rolniczego, w którym CH_4 sięga nawet 80% przy bardzo niskim uwalnianiu H_2S . W ciągu 24 godzin, przy minimalnej wymianie $1,5 \text{ m}^3$ substratu polidispersyjnego na 15 m^3 objętości fermentatora – w celu utrzymania procesu produkcji biogazu – wzrasta kwasowość, tzn. zaczyna uwalniać się H_2S . Zaobserwowano, że dla optymalnej produkcji biogazu należy zmieszać $(1,5-2,0) \text{ m}^3$ substratu polidispersyjnego.

Liberti i in. [Liberti i in., 2019] wszystkie próbki kiszonki kukurydzianej, wyłoków oliwnych i gnojowicy świńskiej podawano do instalacji fermentacji beztlenowej pracującej w warunkach mezofilowych. Reaktor składał się z trzech komponentów: dwóch reaktorów pierwotnych i jednego reaktora wtórnego o objętościach roboczych 2000 m^3 i 5000 m^3 , charakteryzujących się mocą elektryczną netto $0,999 \text{ MW}_e$. Wyniki pokazują, że maksymalna wydajność CH_4 wynosi 67,84%, gdy wsad reaktora jest wzbogacony mieszanką składników odżywczych.

Nsair i in. [Nsair i in., 2019] ocenili różne scenariusze mieszania w okresie 6 lat, wykorzystując odpady rolnicze składające się z obornika i innych składników, takich jak obornik, kiszonka kukurydziana, kukurydza, żyto i buraki cukrowe. Najwyższa uzyskana produkcja energii elektrycznej wyniosła średnio $0,550 \pm 0,00446 \text{ GWh}$ miesięcznie. Wynik uzyskany przez tego badacza wskazuje na duże znaczenie procesu mieszania w produkcji

biogazu, ponieważ wewnętrzne zużycie energii obliczono na poziomie (5,8÷7,2)%, co jest dobrym wynikiem, porównując między innymi z Mönch-Tegeder i in. [Mönch-Tegeder i in., 2014] zakłady wykorzystujące obornik koński.

Piekutin i in. [Piekutin i in., 2021] dokonali przeglądu efektywności produkcji biogazu w rzeczywistych biogazowniach w Polsce. W tym badaniu, oprócz zakładów wykorzystujących mieszaninę odpadów rolniczych, oceniono również oczyszczalnię ścieków. Wyższą produkcję energii odnotowano w zakładzie współfermentacji, wykorzystującym substrat składający się z kiszonki kukurydzianej, obornika, gnojowicy, wytlóków owocowych, ściółki, treści żołądkowej i pulpy ziemniaczanej, i wyniosła ona 117 m³ biogazu na 1 tonę substratu. W tej pracy innym substratem, który dawał stosunkowo dobrą produkcję biogazu, był obornik kurzy, co skutkowało średnią produkcją ~83 m³ biogazu na tonę substratu.

Stan i in. [Stan i in., 2018] zbadali współfermentację frakcji organicznej odpadów komunalnych stałych oraz odpadów owocowo-warzywnych w warunkach mezofilowych, aby określić wydajność 2-metrowej instalacji pilotażowej pod względem wydajności biogazu i CH₄ oraz stabilności procesu. Wyniki wykazały, że obecność inokulum, kontrola temperatury i pH były niezbędne do poprawy produkcji i składu biogazu. przy zastosowaniu ciekłego inokulum zawartość CH₄ w biogazie oscylowała w granicach (44÷51)%, a produkcja biogazu mieściła się w granicach (0,504÷0,6) m³/dobę. W porównaniu do ścieków bytowych, gnojowica świńska i krowia zwiększała stężenie CH₄ w biogazie (do 63%), podczas gdy dobową produkcję biogazu wzrastała o 26% i wahała się w granicach (0,693÷0,786) m³ [Stan i in., 2018].

Aby zidentyfikować stan wiedzy w zakresie wyników badań dotyczących najpopularniejszych substratów stosowanych do produkcji biogazu, przeprowadzono analizę literatury skupiając się na eksperymentach przeprowadzonych w dużej, pilotażowej instalacji w produkcji biogazu pod względem wydajności fermentacji metanowej i rzeczywistej produkcji energii.

4.3.7. Aspekty produkcji „kolorowego” wodoru i biowodoru

W związku z trwającym kryzysem klimatycznym spowodowanym emisją gazów cieplarnianych, w artykule zwrócono szczególną uwagę na tzw. zielone, bezemisyjne metody produkcji H₂, które są najmniej szkodliwe dla środowiska i mają najbardziej obiecujący potencjał w obecnej transformacji energetycznej. „Zielony” H₂ powstaje w procesach takich jak elektroliza wody (H₂O), wykorzystujących odnawialne źródła energii. Nazywa się go

zielonym, ponieważ w trakcie procesu produkcyjnego nie występuje emisja CO₂. Wśród bezemisyjnych metod produkcji H₂ można wymienić [Acar i Dincer, 2022]:

- 1) Elektrolizę H₂O na dużą skalę zasilaną energią elektryczną z różnych odnawialnych źródeł.
- 2) Elektrolizę fotowoltaiczną [Acar i Dincer, 2022; Jia i in., 2016], w której światło słoneczne oddziałuje na układ membranowy (np. polimer), a przepływ elektronów przez zestaw modułów powoduje rozpad H₂O.
- 3) Ogniwa fotoelektrochemiczne (PEC) [Wang i in., 2021] oparte na łańcuchu przemian inicjowanych przez światło słoneczne w środowisku wodnym. PEC wykorzystuje fotoaktywne półprzewodniki, które tworzą elektrodę i pochłaniają światło (energię), aby umożliwić katalizę H₂O przy użyciu światła słonecznego i produkcję gazowego H₂ i tlenu (O₂).
- 4) Fotofermentacja [Putatunda i in., 2023], która wykorzystuje bakterie do fermentacji beztlenowej w celu produkcji H₂ z kwasów organicznych pod wpływem światła (naturalnego lub sztucznego).
- 5) Sztuczna fotosynteza, proces imitujący fotosyntezę rodzimych roślin, obejmuje oświetlenie nanocząsteczek ditlenku tytanu [Zhang i in., 2020b; Abas i in., 2020].
- 6) Fotokataliza oparta na wykorzystaniu aktywowanego i zasilanego światłem katalizatora, który tworzy pary elektron-dziura, umożliwiając rozpoczęcie elektrolizy H₂O, podobnie jak PEC. Proces ten podlega licznym ograniczeniom (np. wydajności lub szybkości), a badania nad jego lepszym zrozumieniem są w toku [Acar i Dincer, 2022].

Pomimo faktu, że produkt końcowy, H₂, jest paliwem bezemisyjnym, które nie generuje gazów cieplarnianych ani zanieczyszczeń dla środowiska podczas spalania, jego produkcja może być procesem mniej lub bardziej zanieczyszczającym w zależności od materiałów wejściowych i źródeł energii użytych w procesie produkcyjnym. Dlatego też, pomimo bezemisyjnych zalet stosowania paliwa H₂, konieczne jest jego klasyfikowanie na podstawie metody pozyskiwania surowca. Obecnie rozróżniamy rodzaje H₂, takie jak szary, niebieski, brązowy, czarny i turkusowy — uzyskiwane ze źródeł kopalnych oraz zielony H₂, pochodzący ze źródeł odnawialnych. Inne metody produkcji H₂ mają mniejsze znaczenie, w tym żółty H₂ — uzyskiwany przez elektrolizę zasilaną energią słoneczną; czerwony, fioletowy i różowy — produkowany przez elektrolizę opartą na energii jądrowej; oraz biały H₂ — pochodzący z geologicznych źródeł naturalnych [Acar i Dincer, 2022; KTW, 2024; Dawood i in., 2020].

Wspomniany model podziału H₂ według źródeł produkcji nie bierze jednak pod uwagę ogólnego obciążenia środowiska związanego z kosztami środowiskowymi produkcji paliwa.

Dawood i in. [Dawood i in., 2020] wprowadzają bardziej holistyczny indeks zwany HCI (Hydrogen Cleanness Index), oparty na wielopoziomowej analizie czterech podstawowych testów, które skalują rzeczywistą „czystość” uzyskanego H₂.

Model HCI przewiduje cztery obszary (zwane „zakresami”) rozpatrywane pod względem intensywności emisji produkcji H₂:

- zakres 1, który bada, ile CO₂ jest generowane bezpośrednio podczas produkcji H₂;
- zakres 2, który koncentruje się na CO₂ generowanym z procesów pomocniczych i wspomagających;
- zakres 3, który bierze pod uwagę cykl życia produktów ubocznych;
- zakres 4, który analizuje skuteczność wychwytywania wytworzonego CO₂.

Każdy z tych czterech obszarów jest podzielony na trzy uzupełniające się klastry, które określają udział określonego rodzaju energii w procesie: szary (produkcja z paliw kopalnych z niekontrolowaną emisją CO₂ do środowiska), niebieski (wykorzystujący energię z paliw kopalnych, ale z wychwytywaniem i składowaniem CO₂ — CCS) i zielony (ze źródeł odnawialnych). Klastry są skalowalne od 0% do 100%, co pozwala na jasne określenie, czy ostatecznie uzyskany H₂ jest „szary”, „niebieski” czy „zielony”. Dlatego model HCI opisuje H₂ według dotychczas stosowanych oznaczeń kolorystycznych, takich jak szary lub zielony, ale z rozszerzeniem poziomu procentowego udziału określonego rodzaju energii zasilającej proces produkcji oraz wskazaniem etapu, na którym wystąpiły czynniki wpływające na niezerową emisję gazów cieplarnianych w procesie otrzymywania H₂.

Rozpatrując kwestie emisji i wpływu ekologicznego produkcji H₂, istotnym czynnikiem jest również dobór surowców i źródeł energii, z których jest on wytwarzany. Przewagę mają te, które są łatwo i powszechnie dostępne (takie jak H₂O, światło słoneczne) lub te, które wymagają wykorzystania produktów ubocznych z innych procesów produkcyjnych, które w przeciwnym razie stałyby się niebezpiecznymi odpadami — takimi jak biomasa (w tym obornik, słoma i inne odpady rolnicze) z powszechnej, masowej produkcji mięsa [Jia i in., 2016].

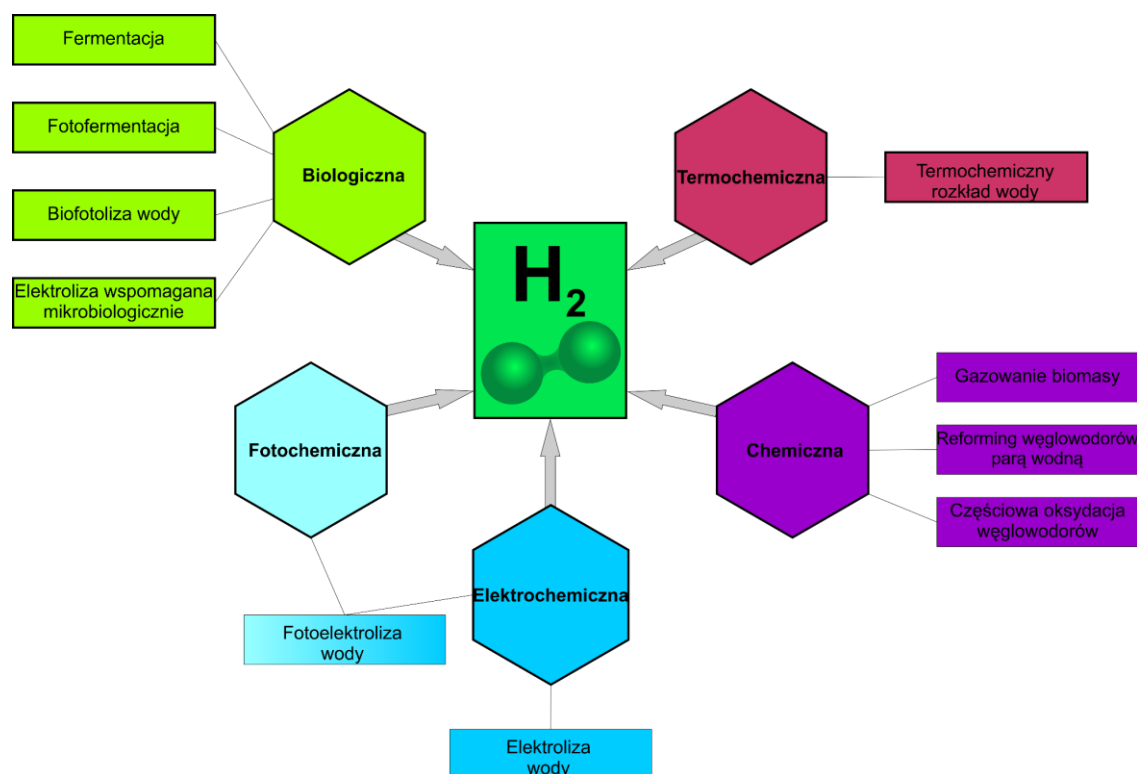
Jednym z rozwijających się obszarów zainteresowania w kwestiach energetycznych jest powrót do technologii związanych ze źródłami rolniczymi. Wiąże się to z wykorzystaniem roślinnych źródeł energii. Jedną ze znaczących zalet roślin jako źródła energii jest ich wzrost, związany z wykorzystaniem CO₂ do wzrostu i uwalnianiem O₂. Oznacza to, że rośliny mogą być nie tylko źródłem materiałów energetycznych, ale także absorbować CO₂ emitowany podczas produkcji energii. Problemem do rozwiązania jest identyfikacja roślin

charakteryzujących się szybką produkcją biomasy, która w kolejnych etapach przetwarzania jest wykorzystywana do produkcji energii.

Biomasa jest obecnie najstarszym i najszerzej stosowanym odnawialnym źródłem energii, które obejmuje całą materię organiczną na Ziemi, wszystkie substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego, które są biodegradowalne. Biomasa obejmuje również pozostałości rolnicze, pozostałości leśne oraz odpady przemysłowe i komunalne.

W porównaniu do konwencjonalnej uprawy roślin na inne cele, rośliny przeznaczone do produkcji biomasy mają większe możliwości lokalizacji pól. Istnieją dwa główne powody, dla których można je uprawiać na obszarach, na których gleba jest poważnie zdegradowana. Po pierwsze, ponieważ nie są uprawiane w celu spożycia, więc jakiegokolwiek gromadzenie się szkodliwych substancji w ich tkankach nie stanowi zagrożenia dla ludzi i zwierząt (potencjalnych konsumentów), a po drugie, wykazują szybszy wzrost biomasy i mają niskie wymagania glebowe.

Połączenie użytego surowca i zastosowanej technologii wpływa również na czystość uzyskanego paliwa H_2 , co może wymagać dodatkowych procesów oczyszczania, generując dodatkowe emisje, koszty i zapotrzebowanie na energię lub ograniczając możliwe zastosowania uzyskanego H_2 . Innym aspektem jest dystrybucja wytworzonego H_2 , gdzie nawet tańsza, masowo produkowana, ale mniej rozproszona logistycznie metoda (i lokalizacja) produkcji przekłada się na wyższe (również pod względem emisji) koszty dostarczenia paliwa H_2 do końcowego konsumenta. Tutaj „zieloną” przewagę uzyska się dzięki metodom produkcji H_2 , które umożliwią jego lokalną, zdecentralizowaną produkcję, czyli zlokalizowaną jak najbliżej konsumenta. Systemy rozproszone mają wiele zalet, takich jak krótszy łańcuch dystrybucji i niższe koszty transportu. Biomasa, związana z lokalną produkcją rolną, jest często fizycznie oddalona od dużych fabryk i ma znaczny potencjał pod względem bliskości logistycznej do końcowego konsumenta. Zgazowanie biomasy skutecznie przekształca ją w paliwo odpowiednie dla rozproszonych (zdecentralizowanych) systemów energetycznych. Dlatego zgazowanie biomasy może odegrać kluczową rolę w przyszłych systemach energetycznych H_2 . Rys. 2 ilustruje strukturę syntezy H_2 w przemyśle, podczas gdy biologiczne metody jego uzyskiwania przedstawiono na Rys. 3.

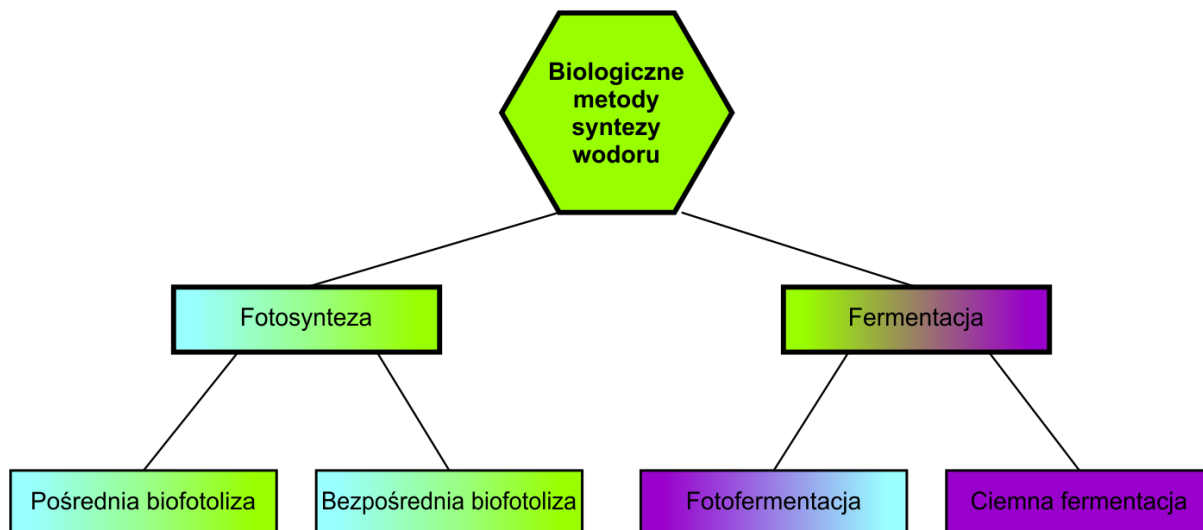


Rys. 2. Metody komercyjnej produkcji wodoru - zaadaptowane z [Kisiel, 2024].

Rys. 2 pokazuje, jak obecnie wygląda produkcja i ścieżki pozyskiwania H₂ w zależności od przyjętej strategii technologii produkcji. Kolor zielony oznacza ścieżki oparte na metodach biologicznych, które polegają na selekcji, modyfikacji i badaniu mikroorganizmów i organizmów prostych, które produkują H₂ jako produkt uboczny swojego metabolizmu. Kolor czerwony oznacza ścieżkę opartą na poddaniu H₂O działaniu katalizatora wysokotemperaturowego w obecności ciśnienia równego lub większego od ciśnienia atmosferycznego. Niebieskie ścieżki są związane z interakcją prądu elektrycznego lub światła słonecznego z H₂O w komórce, prowadzącą do rozpadu cząsteczki i uwolnienia H₂. Ścieżki oznaczone na fioletowo to tradycyjne metody ekstrakcji oparte na rozbijaniu cząsteczek łańcucha węglowodorowego.

Rys. 3 przedstawia szczegółowo gałąź syntezy biologicznej. Dzieli ona metody biologiczne na proces oparty na fotosyntezie — działaniu światła słonecznego na podłoże pokryte warstwą biologiczną. Pod wpływem światła słonecznego warstwa ta inicjuje procesy oparte na fotosyntezie z produkcją H₂, jako mikrobiologicznego produktu odpadowego. Druga gałąź

opiera się na procesach fermentacji. W warunkach beztlenowych mikroorganizmy przetwarzają materię z dostępem do światła lub bez niego, produkując H_2 .



Rys. 3. Produkcja wodoru biologicznego - opracowanie własne na podstawie [Kisiel, 2024].

Przegląd produkcji „kolorowego” wodoru i biowodoru ma na celu opisanie różnych metod produkcji biowodoru. Koncentruje się na porównaniu ich wydajności pod względem produkcji H_2 oraz podkreśla ich główne zalety i wady. Omówiono też aktualny stan wiedzy na temat technologii produkcji biowodoru i wskazano na obiecujące przyszłe ścieżki rozwoju.

4.3.8. Efektywność produkcji biometanu przy udziale obornika koziego.

Substratami dla biogazowni rolniczych są przede wszystkim:

Biomasa w postaci odchodów zwierzęcych, słomy, substancji naturalnych z produkcji rolniczej lub leśnej oraz innych substratów, które nie stanowią zagrożenia dla zdrowia ludzi, zwierząt lub środowiska, wyłącznie pochodzenia biologicznego, np. biomasa roślinna z utrzymania terenów zielonych, pozyskiwana wyłącznie bezpośrednio od producenta biomasy, a następnie bezpośrednio przekazywana producentowi biogazu, odpady inne niż komunalne, produkty uboczne pochodzenia zwierzęcego, pulpa, wyciąki, osady pofermentacyjne, żywność, która nie nadaje się do spożycia lub dalszego przetworzenia.

Odpady, w tym odpadowa masa roślinna, odchody zwierzęce, odpadowe tkanki zwierzęce, odpady z przemysłu cukrowniczego, odpady z przemysłu mleczarskiego, odpady z przemysłu piekarniczego i cukierniczego oraz odpady z produkcji napojów alkoholowych i bezalkoholowych [RMA, 2023]. Dostępne technologie są udoskonalane i poszukiwane są

nowe rozwiązania [Wałowski, 2021; Rabii i in., 2024]. Prowadzone są badania mające na celu zwiększenie udziału produktów ubocznych i odpadów wśród tych materiałów, które stanowią surowiec do produkcji biogazu i energii w procesie. Działania te są zgodne z celami gospodarki o obiegu zamkniętym i przyczyniają się do zmniejszenia udziału paliw kopalnych w produkcji energii oraz zmniejszenia negatywnego wpływu ich stosowania na środowisko [Kaur i Kommalapati, 2021; Otoberise i in., 2022].

Jednym z substratów dla biogazowni może być obornik kozi, Rys. 4, a jego charakterystykę przedstawiono w Tabeli 3.



Rys. 4. Produkcja obornika koziego: [fot. G. Wałowski].

Tabela 3. Charakterystyka obornika koziego [Kaur i Kommalapati, 2021]; wszystkie wartości z wyjątkiem azotu (N), węgla (C), wodoru (H) i siarki (S) są procentami całkowitej świeżej masy próbek; wartość średnia dla 3 próbek.

Parametr	Obornik kozi	Inoculum
Analiza bezpośrednia		
Wilgoć [%]	37,7 ± 0,3	97,2 ± 0,3
TS [%]	62,3 ± 0,3	2,8 ± 0,3
VS [%]	52,8 ± 0,4	1,5 ± 0
VS [%-TS]	84,7 ± 0,2	
Popiół [%]	10,0 ± 0	1,5 ± 0,4
Ostateczna analiza		
N [%-TS]	2,8 ± 0,1	
C [%-TS]	43,9 ± 0,3	
H [%-TS]	1,5 ± 0,2	
O [%-TS]	51,3 ± 0,2	
S [%-TS]	0,6 ± 0	
C:N	15,7 ± 0,7	
Wzór pierwiastkowy	C _{365,9} H _{123,0} O _{320,4} N _{20,2} S _{1,9}	

Analiza kompozycyjna		
Celuloza + Hemiceluloza [%-TS]	72,4	
Lignina [%-TS]	17,6	
Właściwości chemiczne		
pH	7,9 ± 0,1	7,5 ± 0,2
VFA [mg/L]	539,5 ± 75,7	
Alkalinity [CaCO ₃ mg/L]	3965,0 ± 120,2	
NO ₃ ⁻ -N [mg/L]	12,7 ± 1,1	
NH ₄ ⁺ -N [mg/L]	398,0 ± 9,9	
PO ₄ ⁻ [mg/L]	1230 ± 0,4	
Całkowity N [mg/L]	429,5 ± 78,5	
NO ₃ ⁻ + NO ₂ ⁻ [mg/L]	14,2 ± 0,1	
TKN [mg/L]	415 ± 77,8	

Teoretyczny i eksperymentalny potencjał biometanu, biodegradowalność (BD) beztlenowego rozkładu obornika koziego (GM) przedstawiono w Tabeli 4.

Tabela 4. Teoretyczny i eksperymentalny potencjał biometanu, biodegradowalność (BD) beztlenowego rozkładu obornika koziego (GM). (własne badania na podstawie [Kaur i Kommalapati, 2021]).

Wzór pierwiastkowy	C _{365,9} H _{123,0} O _{320,4} N _{20,2} S _{1,9}
C:N	15,7 ± 0,7
Teoretyczny potencjał biometanu [mL/gvs] *	290,0
Eksperymentalny potencjał biometanu	274,1 ± 7,8 *
Biodegradowalność	94,5 ± 2,7 *

* wartość skorygowano zgodnie z VS% po wstępnym obliczeniu ze wzoru (Tabela 3).

Przedstawiono aktualny stan zastosowania obornika koziego pod względem efektywności technologii produkcji biogazu (biometanu).

Haque i in. [Haque i in., 2021] z Uniwersytetu Rolniczego w Bangladeszu zbadali wydajność produkcji biogazu z trzech rodzajów obornika: bydłowego, koziego i drobiowego. Badania przeprowadzono w trzech reaktorach dla każdego rodzaju obornika, co dało łącznie dziewięć reaktorów. Autorzy stwierdzili, że najwięcej biogazu wyprodukowano z obornika koziego. Procent CH₄ w biogazie z obornika koziego był również najwyższy. We wszystkich przypadkach proces produkcji biogazu prowadzono w warunkach beztlenowych w temperaturze 37 °C przez 60 dni; użyto 65 g każdego rodzaju obornika. Określone parametry badanego obornika koziego były następujące: zawartość suchej masy: 22,79%; zawartość suchej masy organicznej: 19,82%; zawartość popiołu: 2,81%; zawartość

organicznego C: 13,25%; ogólny N₂: 1,18%; stosunek C/N: 18,33; pH = 8,45. Stwierdzono, że produkcja biogazu z koziego obornika wyniosła 0,3011 m³/kg lotnej substancji stałej. W wyniku badań autorzy stwierdzili, że ilość biogazu produkowanego z koziego obornika była znacznie wyższa niż z dwóch pozostałych rodzajów obornika: bydłowego i drobiowego. Hanafiah i in. [Hanafiah i in., 2016] badali produkcję biogazu z koziego obornika i kurzego obornika w Malezji. W pierwszym etapie przetestowano parametry obu rodzajów obornika. Następnie przetestowano wydajność produkcji biogazu w warunkach mezofilowych (37 °C) i beztlenowych. Wykazało to, że z koziego obornika uzyskano więcej biogazu. Badanie przeprowadzono w reaktorach 1 l, użyto około 4 g każdego rodzaju obornika. Objętość biogazu wynosząca 2.141 ml uzyskano z koziego obornika, a 1.855,7 ml z kurzego obornika. Każda badana próbka obu rodzajów obornika została zmieszana z 500 ml przemysłowego inokulum jako katalizatorem. Proces prowadzono przez 20 dni i uzyskano pomiary. Obornik kozi miał następujące parametry: zawartość suchej masy: 63,85%; zawartość suchej masy organicznej: 87,07%; chemiczne zapotrzebowanie na tlen (ChZT): 1,93 g/l; zawartość NH₃: 1,3 g/l; stosunek C/N = 12:1.

Oporum i in. [Oporum i in., 2019] z Nigerii przeprowadzili badanie kinetyczne produkcji biogazu przy użyciu mieszanki obornika koziego, obornika drobiowego i skórek bananów w różnych proporcjach. Przebadano również proces produkcji biogazu z samego obornika koziego. Proces fermentacji beztlenowej prowadzono przez 47 dni w siedmiu reaktorach o pojemności 10 l każdy. Źródłem inokulum był płyn żwaczowy krowy. Proces prowadzono w temperaturze (25÷36) °C; do każdego reaktora wprowadzano 520 g obornika koziego lub 520 g obornika koziego zmieszanego w różnych proporcjach masowych z odchodami drobiu i skórkami bananów. W każdym przypadku pH regulowano do 7,8 za pomocą roztworów NaOH lub HCl w zależności od początkowego pH. Największą skumulowaną objętość biogazu stwierdzono w przypadku samego obornika koziego. Wynosiła ona 23,36 dm³. W przypadku mieszanek obornika koziego z ww. składnikami, niezależnie od proporcji, stwierdzono działanie antagonistyczne, co skutkowało niższą produkcją biogazu niż w przypadku stosowania samego obornika koziego jako substratu. Parametry badanego obornika koziego były następujące: wilgotność: 8,96%; zawartość popiołu: 28,61%; zawartość włókna: 12,65%; N₂: 1,7%; zawartość tłuszczu: 2%; organiczny C: 24,94%; całkowita zawartość substancji stałych: 91,04%; zawartość lotnych substancji stałych: 62,43%; stosunek C/N = 15:1; CHO: 37,18%.

Grimsby i in. [Grimsby i in., 2016] badali produkcję biogazu z obornika kóz mlecznych w Tanzanii. Obornik uzyskano z małych gospodarstw w górach Uluguru. Substrat i inokulum

rozcieńczono, aby uzyskać 1% lotnych substancji stałych o łącznej masie 700 g, które wprowadzono do reaktorów o pojemności 1 l. Inokulum stanowił świeży obornik krowi. Ilość obornika koziego i krowiego odpowiadała 3,5 g lotnych substancji stałych w każdym. Reaktory inkubowano w temperaturze 35 °C i mieszano z prędkością 60 obr./min. Proces fermentacji beztlenowej prowadzono przez 50 dni. W podobny sposób badano również produkcję biogazu z obornika świńskiego, obornika krowiego, trawy gwatemalskiej i celulozy. Najlepsze wyniki pod względem ilości CH₄ w biogazie uzyskano dla obornika świńskiego. Wynosił on 220 l/kg lotnej materii organicznej. Najgorszy wynik uzyskano dla obornika koziego i wyniósł 167 l/kg. Na podstawie zaobserwowanej rocznej ilości obornika produkowanego przez 1 kozę na analizowanym obszarze (61 kg), autorzy oszacowali potencjał produkcji biogazu odpowiadający jednej kozie na 8,5 m³ rocznie. Autorzy tłumaczą wynik uzyskany dla obornika koziego tym, że obornik ten zawiera, w porównaniu do innych testowanych substratów, znacznie więcej ligniny (21% w porównaniu do (8–10)% dla innych testowanych substratów), która jest trudna do rozkładu przez mikroorganizmy. Ponadto zawartość substancji stałych w testowanym oborniku wynosiła średnio tylko około 23%. ChZT stanowił 40% całkowitej substancji stałej.

Otohrise i in. [Otohrise i in., 2022] z Nigerii badali kinetykę produkcji biogazu z koziego obornika i nasion *Asimina triloba*. Fermentacja beztlenowa koziego obornika i nasion rośliny *Asimina triloba*, a także jako szybkość i ilość produkowanego biogazu, zostały zbadane. Świeży obornik krowi został użyty jako inokulum. Oba substraty zostały najpierw wysuszone na słońcu w celu zmniejszenia zawartości wilgoci. Następnie oba substraty zostały zmielone na proszek w celu zwiększenia ich powierzchni i zapewnienia małego rozmiaru cząstek. Osady każdego substratu uzyskano przez zmieszanie 1.000 g proszku danego rodzaju substratu z 3.500 ml wody, co stanowiło 22% całkowitej masy stałej. Mieszaninę obornika koziego i nasion *Asimina triloba* przygotowano w ten sam sposób, z tym wyjątkiem, że mieszanka substratu była w stosunku molowym 1:1 (obornik kozi i nasiona *Asimina triloba*). W każdym przypadku dodano również 100 g świeżego obornika krowiego jako inokulum w celu przyspieszenia rozwoju mikroorganizmów. Eksperyment przeprowadzono w 5-litrowych szklanych reaktorach przez 24 dni. Temperatura, w której przeprowadzono proces, wynosiła 35 °C. Zawartość reaktorów mieszano codziennie, co zapobiegało zbrylaniu się osadu, a także ujedynolicało temperaturę i rozkład bakterii w całej objętości osadu w reaktorze. Objętość biogazu wytwarzanego w każdym z trzech testowanych wariantów mierzono co 24 godziny. Wyniki eksperymentów wskazują, że z obornika koziego (4.943 ml) uzyskano większą objętość biogazu niż z nasion *Asimina triloba* (4.329 ml). Jednak najlepszy wynik

uzyskano dla mieszaniny obornika koziego i nasion *Asimina triloba* (5.871 ml). Parametry testowanego obornika koziego przed eksperymentem były następujące: pH: 7,21; BZT5: 160 mg/l; ChZT: 490 mg/l; sucha masa: 15,1%; lotna substancja stała: 84%; całkowity N₂: 3,2 mg/l; całkowity C: 28,3 mg/l, a po eksperymencie: pH: 7,18; BZT5: 146 mg/l; ChZT: 312 mg/l; sucha masa: 11,7%; substancje lotne: 66%; całkowity N₂: 2,7 mg/l; całkowity C: 22 mg/l.

Osman i in. [Osman i in., 2015] z Sudanu zbadali wpływ stężenia świeżego płynu z żwacza krowy, dodanego jako zaczyn, na wydajność produkcji biogazu z obornika koziego. Proces produkcji biogazu przeprowadzono w warunkach beztlenowych, stosując różne ilości płynu z żwacza krowy, tj. 0, 1, 2 i 3 g na 2,5 l pojemności fermentatora. Czas trwania eksperymentu wynosił we wszystkich przypadkach 45 dni. Ilość biogazu mierzono codziennie. Użyto stałego obornika koziego, który poddano wstępnej obróbce. Obejmowała ona mielenie i mieszanie. Próbki obornika dla każdego wariantu testowego przygotowano w taki sposób, że 200 g stałego, wstępnie przetworzonego obornika koziego wymieszano z jedną z czterech ilości płynu z żwacza krowiego podanych powyżej oraz z wodą wodociągową, uzyskując objętość roboczą 2,5 l. Codzienne mieszanie wykonywano ręcznie przez 30 s, aby zapewnić jednorodność próbki. Każdy wariant eksperymentu przeprowadzono w trzech powtórzeniach. W wyniku eksperymentu stwierdzono, że po 45 dniach nie było znaczącej różnicy w objętości wytwarzanego biogazu między samym obornikiem a obornikiem z trzema różnymi ilościami płynu z żwacza krowiego. Istotną różnicę w objętości biogazu w wariancie z 2 g płynu z żwacza krowiego zaobserwowano dopiero po pierwszych 15 dniach eksperymentu. Do 18 dnia procesu fermentacji w wariancie wyłącznie z obornika koziego w ogóle nie wytwarzano biogazu. Zaczął on powstawać dopiero po 18 dniach, a jego wzrost był stały do 45 dnia, kiedy proces został zakończony. Na podstawie eksperymentu autorzy wnioskuje, że obornik kozi jest tak dobrym surowcem, że można z niego produkować biogaz bez dodatku inokulum. Jednak dodanie płynu z żwacza krowiego skraca czas produkcji biogazu i przyspiesza reakcję. Całkowita objętość biogazu uzyskana po 45 dniach procesu z samego obornika koziego była najniższa. Jednak różnica objętości nie była statystycznie istotna. Parametry badanego obornika koziego były następujące: całkowita ilość substancji stałych: 97,1%; zawartość wilgoci: 2,9%; zawartość lotnych substancji stałych: 63,8%; zawartość N₂: 2,5%; zawartość organicznego C: 40,1%, stosunek C/N: 16:1. Użyty płyn z żwacza krowiego miał następujące właściwości: substancja stała: 36%; zawartość wilgoci: 64,6%; lotne substancje stałe: 73,2%; zawartość N₂: 1,6%; zawartość organicznego C: 54,3%; Stosunek C/N = 33:1.

Harjinder i Kommalapati [Harjinder i Kommalapati, 2021] badali potencjał biochemiczny produkcji CH_4 i parametry kinetyczne fermentacji i tworzenia biogazu dla różnych ilości dodanego inokulum. Przetestowano następujące stosunki inokulum do substratu (I/S): 0,0; 0,3; 0,5; 0,8; 1,1; 1,3 i 2,6; skumulowana objętość utworzonego CH_4 wynosiła odpowiednio 191,7; 214,3; 214,9; 225,9; 222,1; 222,8 i 229,9 ml na 1 g lotnej substancji stałej. Znacznie mniej CH_4 powstało, gdy proces przeprowadzono tylko z obornikiem. Inokulum pochodziło z miejskiej oczyszczalni ścieków. Proces przeprowadzono w warunkach mezofilowych w reaktorze o pojemności 250 ml. W każdym przypadku użyto 1,98 g obornika koziego i dodano odpowiednią objętość inokulum, a następnie dodano 100 ml wody dejonizowanej i wymieszano. W celu zapewnienia powtarzalności wyników dla każdego wariantu eksperymentu zastosowano trzy powtórzenia. Szklane butelki służące jako reaktory inkubowano w temperaturze 36 °C. Badanie w każdym wariantcie prowadzono przez 50 dni. Objętość produkowanego biogazu mierzono codziennie. Stwierdzono, że (80–90)% objętości utworzonego CH_4 uzyskano między 24 a 26 dniem oraz między 31 a 32 dniem eksperymentu. Wyniki eksperymentu wskazują, że produkcja biogazu z koziego obornika jest możliwa bez dodatku inokulum, chociaż jest wolniejsza i wytwarza się mniej biogazu niż z dodatkiem inokulum. Autorzy tłumaczą fakt, że biogaz jest wytwarzany z samego koziego obornika tym, że jelita kozie najprawdopodobniej zawierają bakterie, które rozkładają materię organiczną i wytwarzają biogaz. Autorzy zauważyli, że różnica w całkowitej objętości biogazu wytwarzanego w wariantcie z samym kozim obornikiem i z różnymi ilościami dodanego inokulum nie była znacząca. Parametry badanego obornika koziego były następujące: wilgotność: 35,9%; lotne substancje stałe: 52,8%, popiół: 11,3%; zawartość N_2 : 1,7%; zawartość C: 35,5%; zawartość H_2 : 6%; zawartość O_2 : 56,2%; zawartość S: 0,5%, stosunek C/N = 20,9; zawartość celulozy i hemicelulozy: 72,4%; zawartość ligniny: 17,6%; pH: 7,8; zasadowość: 5.265 mg CaCO_3 /l; zawartość lotnych kwasów tłuszczowych: 2.795 mg CH_3COOH /l; azot azotanowy: 9 mg/l; ortofosforany: 992 mg/l; azot amonowy: 715,5 mg/l.

Zhang i in. [Zhang i in., 2013] z Chin badali produkcję biogazu w procesie współfermentacji obornika koziego z trzema różnymi materiałami roślinnymi w warunkach beztlenowych. Obejmowały one pozostałości z trzech upraw: słomę pszenną, łodygi kukurydzy i słomę ryżową. Podłoża mieszano razem (obornik kozi z jednym z substratów roślinnych) w różnych proporcjach procentowych. Testy efektywności produkcji biogazu w każdym wariantcie przeprowadzono w 1-litrowych kolbach Erlenmayera przez 55 dni. Temperatura procesu wynosiła 35 °C. Jako inokulum zastosowano obornik od zwierząt mlecznych. Całkowita objętość mieszanki poddanej fermentacji w każdym przypadku wynosiła 700 ml — w tym

140 g inokulum i odpowiednią ilość substratów. Następnie do mieszanki dodano wodę dejonizowaną, tak aby zawartość ciał stałych wynosiła 8%. Wszystkie reaktory delikatnie mieszano ręcznie przez 1 minutę dziennie przed zmierzeniem objętości wytworzonego biogazu. W celach porównawczych badano również produkcję biogazu z samego obornika koziego i samych pozostałości z trzech upraw. Wyniki eksperymentu wskazują, że połączenie obornika koziego z łodygami kukurydzy lub słomą ryżową znacząco poprawia wydajność produkcji biogazu niezależnie od stosunku C/N w porównaniu z samym obornikiem kozim. W przypadku mieszanki obornika koziego z łodygami kukurydzy w proporcjach 30/70 i 70/30 oraz mieszanki obornika koziego ze słomą ryżową w proporcjach 30/70 i 50/50, po 55 dniach procesu uzyskano następujące całkowite objętości biogazu [ml]: 14 840, 16 023, 15 608 i 15 698. Gdy obornik kozi był używany jako jedyny substrat, całkowita objętość biogazu wynosiła tylko 10 375 ml po 55 dniach. Objętość biogazu uzyskana dla mieszanek obornika koziego ze słomą ryżową 30/70 (stosunek C/N = 35,61), obornika koziego ze łodygami kukurydzy 70/30 (stosunek C/N = 21,19) i obornika koziego ze słomą ryżową 50/50 (stosunek C/N = 26,23) była odpowiednio 1,62; 2,11 i 1,83 razy większa niż w przypadku, gdy jako substrat wykorzystano wyłącznie resztki poźniwne. Zaobserwowano również, że objętość biogazu wytworzonego w przypadku zastosowania mieszaniny obornika koziego i słomy pszenicznej była tylko nieznacznie większa niż w przypadku, gdy do fermentacji wykorzystano wyłącznie obornik kozi. Autorzy tłumaczą to wysoką całkowitą zawartością węgla (35,63%) i ligniny (24,34%) w słomie pszenicznej, co hamuje biologiczny rozkład tego substratu. Właściwości obornika koziego użytego w testach były następujące: pH: $7,94 \pm 0,15$; zawartość substancji stałych: $33,65\% \pm 3,23\%$; substancje lotne: $82,21 \pm 8,93$; zawartość całkowitego C: $18,22\% \pm 1,4\%$; całkowity N₂: $1,014\% \pm 0,11\%$; stosunek C/N = $17,97 \pm 0,84$; nie wykryto lignin.

Nikosi i in. [Nikosi i in., 2021] z RPA badali potencjał produkcji energii odnawialnej z beztlenowej fermentacji indywidualnej i współfermentacji obornika kurzego, obornika koziego, obierków ziemniaczanych i pulpy kukurydzianej. Ilość wytworzonego CH₄ badano w różnych wariantach mieszanek substratów i oddzielnie. W każdym przypadku proces prowadzono w warunkach mezofilowych. Jako inokulum zastosowano obornik krowi. Przed rozpoczęciem testu produkcji CH₄ surowiec został wysuszony w temperaturze 60 °C, wielkość cząstek została zmniejszona do 2 mm i przechowywana w lodówce w temperaturze 4 °C do momentu użycia. Inokulum przygotowano poprzez fermentację obornika krowiego przez okres, w którym nie wytwarzano biogazu. Przeprowadzono to w celu upewnienia się, że mikroorganizmy strawiły cały substrat z obornika krowiego przed dodaniem nowego

substratu. W ten sposób zapewniono, że wytwarzany biogaz pochodził z nowego substratu, a nie z substratu zawartego w oborniku krowim. Czas retencji preparatu inokulum wynosił 14 dni. Jako monosubstrat do monodigestii zastosowano inokulum z kurzego obornika, koziego obornika, obierków ziemniaczanych, papki kukurydzianej i obornika krowiego. Mieszana fermentację w następujących wariantach: obornik kurzy i obierki ziemniaczane, obornik kurzy i pulpa kukurydziana, obornik kozi i obierki ziemniaczane, obornik kozi i pulpa kukurydziana, pulpa kukurydziana i obierki ziemniaczane przeprowadzono w stosunku ilościowym 1:1 w każdym przypadku. Temperatura, w której prowadzono proces fermentacji, wynosiła 37 °C, a pH (6,7–7,5) — do korekcji użyto roztworów wodorotlenku sodu i kwasu siarkowego. Bioreaktory miały pojemność 500 ml, z czego 100 ml górnej przestrzeni pozostawiono wolne. Czas retencji wynosił 21 dni. W przypadku stosowania pojedynczych substratów najwięcej CH₄ uzyskano z gnojowicy kukurydzianej: 1.650,8 ml CH₄/g substancji lotnych. W przypadku samego obornika koziego wynik wyniósł 726,9 ml CH₄/g. Najgorszy wynik uzyskano dla obornika kurzego: 120,7 ml/g. W przypadku różnych mieszanek substratów w stosunku 1:1 najlepszy wynik uzyskano dla mieszanki obornika koziego i obierków ziemniaczanych. Wyniósł on 1.332,2 ml/g substancji lotnych. Jak piszą autorzy, taka mieszanka zapewniała optymalny poziom składników odżywczych i zapewniała równowagę mikroorganizmów produkujących biogaz. Charakterystyka badanego obornika koziego była następująca: wilgotność: 18%, substancje lotne: 43,46%, stosunek substancji lotnych do całkowitej suchej masy: 63,52%, stosunek C/N = 20,47.

Alham i in. [Alham i in., 2021] z Indonezji badali w prosty sposób wykorzystanie koziego obornika do prototypowej instalacji do produkcji biogazu. Autorzy uzyskali około 0,49 m³ CH₄ z 5 kg koziego obornika w wyniku procesu fermentacji beztlenowej i około 0,767 m³ biogazu, co odpowiada 0,037 kg LPG. Taka ilość wytworzonego biogazu może zapewnić energię elektryczną na 10 min do oświetlenia LED. Średnia generowana moc wyniosła 0,033 W, a średnie napięcie i natężenie prądu odpowiednio 1,65 V i 0,033 A. Łącznie 5 kg obornika zmieszano z 5 l wody, 300 ml soku z trzciny cukrowej i 40 ml preparatu EM4, zawierającego mikroorganizmy przeprowadzające proces fermentacji beztlenowej. Wszystkie składniki wymieszano i umieszczono w reaktorze. Pojemność zbiornika, w którym przeprowadzono fermentację, wyniosła 19 l. Na podstawie zawartości suchej masy poddano fermentacji 1,3 kg suchej masy obornika. Skład procentowy uzyskanego biogazu przedstawiał się następująco: CH₄: 64,3%, CO₂: 12,5%, O₂: 6,2%, BAL: 17,0%. Czas trwania procesu wynosił 20 dni.

Mohammed i Morsy [Mohamed i Morsy, 2018] z Egiptu badali suchą fermentację obornika koziego pod kątem optymalizacji produkcji biogazu i minimalizacji kosztów. Zbadano wpływ

temperatury, rodzaju fermentacji (sucha, mokra) i czasu retencji hydraulicznej na optymalizację procesu produkcji biogazu i minimalizację kosztów w skali laboratoryjnej. Warunki fermentacji były beztlenowe. Fermentację obornika koziego testowano w temperaturach 40 °C, 60 °C i temperaturze otoczenia. Reaktory składały się z sześciu szklanych butelek o pojemności 5 l każda. Umieszczono w nich próbki o łącznej masie 4 kg. Czas retencji wynosił 80 dni. W przypadku fermentacji suchej zawartość suchej masy wynosiła 30%, a w przypadku fermentacji mokrej 10%. Wszystkie eksperymenty przeprowadzono przy pH (6÷8). Skumulowana objętość biogazu dla fermentacji suchej w temperaturach 40 °C, 60 °C i pokojowej wynosiła odpowiednio 58,95 l, 128,74 l i 82,07 l. Dla fermentacji mokrej w tych samych temperaturach skumulowana objętość biogazu wynosiła 92, 25 l, 61,72 l i 82,56 l. Największą skumulowaną objętość biogazu, wynoszącą 128,74 l, odnotowano dla fermentacji suchej w temperaturze 60 °C, a najniższą, wynoszącą 58,95 l, odnotowano dla fermentacji suchej w temperaturze 40 °C. Temperatura procesu fermentacji jest ważnym czynnikiem wpływającym na aktywność mikroorganizmów. Autorzy stwierdzili, że ilość i szybkość produkcji biogazu w przypadku fermentacji suchej była wyższa niż w przypadku fermentacji mokrej ze względu na wyższą zawartość suchej masy i materii organicznej rozkładanej przez mikroorganizmy. W temperaturze 40 °C w przypadku fermentacji mokrej wytworzono więcej biogazu. Bardzo podobne wyniki odnotowano dla temperatury otoczenia dla obu rodzajów fermentacji. Średnia zawartość CH₄ w biogazie we wszystkich przypadkach wynosiła (61,89÷69,35)%. Charakterystyka badanego obornika koziego była następująca: wilgotność: 66,39%, zawartość suchej masy: 33,61%, zawartość substancji lotnych: 82,21%, całkowity węgiel organiczny: 18,22%, całkowity azot: 1,014%, stosunek C/N = 17,92, pH: 7,92; zawartość potasu (K₂O): 3,2%, zawartość fosforu (P₂O₅): 0,53%.

Produkcja biogazu jest najważniejszą i najbardziej obiecującą alternatywą zastępowania paliw kopalnych w sposób przyjazny dla środowiska. Obok wielu dostępnych odnawialnych źródeł energii, wytwarzanie biogazu zajmuje niezastąpioną pozycję ze względu na niepodważalną dostępność biomasy oraz potrzebę gospodarowania odpadami zwierzęcymi (obornik kozi). Dlatego naukowcy na całym świecie prowadzą szeroko zakrojone badania w celu opracowania taniej i zrównoważonej produkcji biogazu, który można wykorzystać w transporcie, wytwarzaniu energii elektrycznej i ciepła. Sukces tego przedsięwzięcia byłby korzystny dla środowiska, gospodarki i zrównoważonego rozwoju krajów na całym świecie.

4.3.9. Podsumowanie przeglądu literatury

W wyniku analizy przeglądu literatury dotyczącej warunków produkcji biogazu rolniczego:

- przy zastosowaniu substratu polidispersyjnego (gnojowicy świńskiej) stwierdzono, że:
 - 1) rozpoznanie warunków procesowych dla fermentacji niesie za sobą istotne problemy mikroflory substratu, związane z mechanizmem przepływu surowego gazu w strukturze porowatego złoża szkieletowego umieszczonego w fermentatorze;
 - 2) w oparciu o przeprowadzone rozpoznanie literaturowe stwierdzono, że występuje duża luka wiedzy w zakresie oceny cech jakościowo-ilościowych dla odsiarczania surowego biogazu;
 - zwłaszcza biogazu wyprodukowanego w warunkach mezofilnych - przez złożo szkieletowe materiału porowatego stwierdzono, że:
 - 1) w zależności od rodzaju złoża porowatego, zastosowanego do oczyszczania biogazu pod względem kontrolno-pomiarowym wykorzystywane są bardzo zróżnicowane techniki i metody, co przyczynia się do niejednoznaczności struktur porowatych materiałów - nieliczne natomiast prace odnoszą się do zastosowania węgla aktywnego i rudy darniowej;
 - 2) wynikające z rolniczego punktu widzenia biogazownie są szczególnie ważne ponieważ umożliwiają zagospodarowanie całej biomasy odpadowej i jej przekształcanie w użyteczną energię (kogeneracja) oraz nawóz (poferment);
 - 3) metody i techniki stosowane w konwersji biomasy, nie wskazują jednoznacznie, że jest rozpoznane zagadnienie zaadoptowania mikroorganizmów do produkcji biogazu przy użyciu materiałów stanowiących uprawy energetyczne;
 - 4) wskazano charakterystyczne aspekty opracowania koncepcji instalacji mobilnych (o prostej konstrukcji kontenerowej) gotowych do umieszczenia w infrastrukturze gospodarstw rolnych z uwzględnieniem oceny ekonomicznej;
 - 5) wskazano na techniczno-procesowe aspekty technologii biowodorowych, analizując kryteria techniczno-technologiczne procesu biofotolizy;
 - 6) kluczowym zagadnieniem związanym z rozwojem sektora biogazowego staje się poszukiwanie nowych i doskonalszych technologii umożliwiających zagospodarowanie odpadów zwierzęcych, w tym obornika koziego, przy uwzględnieniu fotofermentacji do produkcji biometanu.

Podsumowanie wyżej wymienionego przeglądu literatury i badania własne w przedmiotowej sprawie wskazują na konieczność rozwiązania problemu, który to można sformułować w postaci pytań:

1. Czy w odniesieniu do problematyki produkcji biogazu rolniczego, zagadnienia procesowe można rozpatrywać w kategorii rozwoju:
 - bezpieczeństwa energetycznego oraz rozwoju gospodarczego - stanowiących nieszkodliwą dla środowiska i ekonomicznie uzasadnioną utylizację odpadów zwierzęcych?
 - nowej generacji energii odnawialnych (w kontekście produkcji biogazu, biowodoru, biometanu)?
2. Czy przedstawione aspekty techniczno-procesowe, jakie wynikają z technologii fermentacji mezofilnej, wskazują na liczne korzyści w zakresie praktycznego wykorzystania tej technologii w procesach konwersji substratu polidispersyjnego?
3. Czy opisane zagadnienia mechanizmu przepływu surowego biogazu przez złożę węgla aktywnego i rudy darniowej można zastosować dla intensyfikacji produkcji biogazu oczyszczonego?
4. Czy zastosowanie odpowiednio dostosowanego układu kogeneracji stwarza warunki ekonomiczno-społeczne dla funkcjonowania mobilnych mikrobiogazowni?
5. Czy cechy użytkowe biomasy, a zwłaszcza nieżywnościowej, stwarzają warunki do pozyskania dużej ilości biogazu możliwego do wykorzystania w licznych technologiach energetyczno-przemysłowych?
6. Czy sektor biogazowy staje się wyznacznikiem trendów do zagospodarowania odpadów zwierzęcych dla produkcji energii odnawialnej w postaci biowodoru lub biometanu?

We wszystkich praktycznie przypadkach brak jest w literaturze jednolitego poglądu o możliwości wykorzystania w opisie produkcji biogazu rolniczego kryteriów charakterystycznych dla odpadów zwierzęcych, rolno-spożywczych, zwłaszcza w kontekście mobilnych biogazowni. Ponadto w literaturze przedmiotu występują duże rozbieżności w podejściu do doświadczalnej oceny parametrów produkcji biogazu, biowodoru i biometanu.

4.4. CEL I ZAKRES OSIĄGNIĘCIA

Celem pracy było rozpoznanie procesu produkcji biogazu w aspekcie oceny technologii oraz zastosowanych substratów w ramach eksperymentalnego i praktycznego wykorzystania tych badań do:

- intensyfikacji hydrodynamiki substratu,
- poprawy efektywności energetycznej i ekonomicznej,
- rozwiązań techniczno-technologicznych dla energii odnawialnych,
- sprawności ekologicznej i ochrony środowiska.

Badania podjęte w niniejszej pracy mają wskazać, że istnieje możliwość opracowania modelu określenia kryteriów produkcyjnych biogazu (biometanu) przy zastosowaniu substratów (polidispersyjny, obornik), wraz z jego weryfikacją w warunkach rzeczywistych oraz oceny w aspekcie techniczno-technologicznym.

Realizację sformułowanego celu pracy dokonano w zaprezentowanych publikacjach (opracowaniach) nr **O1-O8**, zgodnie z niżej wymienionym zakresem:

1. Rozpoznanie, uzupełnienie i rozszerzenie obecnego stanu wiedzy w obszarze:
 - a) warunków procesowych produkcji biogazu przy zastosowaniu substratu polidispersyjnego (**O1**);
 - b) metody oceny ekonomicznej efektywności inwestycji w biogazownię rolniczą prosumencką (**O2**);
 - c) sposobu pomiaru i metod oceny uzdatniania biogazu (**O3**);
 - d) efektywności fermentacji metanowej i rzeczywista produkcja energii dla modeli opartych na różnych rodzajach substratów (**O4**);
 - e) mechanizmu wpływu parametrów produkcji upraw energetycznych (**O5**);
 - f) energetyki prosumenckiej wskazując na pracę jednostki kogeneracyjnej zasilanej biogazem, umożliwiając efektywny tryb pracy mikroinstalacji (**O6**);
 - g) modeli procesu produkcji biowodoru dla różnych surowców i proporcji substratów stosowanych w kofermentatorach (**O7**);
 - h) procesu fotofermentacji obejmującego produkcję biometanu (**O8**).
2. Wykonanie badań doświadczalnych na stanowisku badawczym przy użyciu:
 - substratu polidispersyjnego (**O1**);
 - pilotażowej instalacji do produkcji biogazu (**O1**) i jego uzdatnieniu (**O3**);oraz przeprowadzenie analizy uzyskanych wyników pod względem:
 - a) oceny parametrów ilościowych i jakościowych biogazu (**O1, O3**);

- b) analitycznego opracowania wyników badań doświadczalnych w odniesieniu do modelu energetyczno-ekonomicznego (**O2, O6**);
3. Weryfikacja wyników badań eksperymentalnych w aspekcie zastosowanych metod i modeli (**O4, O5, O7, O8**).

W autoreferacie zawarto również aspekty koncepcyjne, obejmujące zarówno zagadnienia doświadczalne (stanowiska badawcze, metodykę pomiarów), jak i metodologiczne odniesione do procesowej interpretacji uzyskiwanych wyników pomiarów.

Połączenie poszczególnych opracowań (**O1-O8**) wskazuje na aspekt użyteczny - w oparciu o wdrożenie pilotażowej instalacji wraz z jej okresem trwałości, również przyznanie nagrody przez Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi - charakteryzując w ten sposób opracowanie głównego celu osiągnięcia naukowego.

4.5. METODYKA BADAŃ

4.5.1. Produkcja i uzdatnianie biogazu rolniczego w kogeneracji.

Ocena biogazu rolniczego (**O1**) wytwarzanego w procesie mezofilowej fermentacji metanowej z polidispersyjnego substratu, przy wykorzystaniu złoża adhezyjnego umieszczonego w fermentatorze, dotyczyła określenia warunków hydrodynamicznych dla:

- immobilizacji, która pozwala na zwiększenie powierzchni czynnej dla flory bakterii fermentujących;

- układu mieszania polidispersyjnego substratu;

wpływając tym samym na osiągnięcie wysokiej zawartości CH₄ w biogazie i stabilną produkcję ilości biogazu.

Do oceny biogazu rolniczego przyjęto następujące kryteria:

- skład biogazu;

- przebieg zmian średniego dobowego strumienia gazu.

Badania eksperymentalne wdrożonej instalacji dotyczyły oceny jakości produkcji odsiarczonego biogazu (**O3**). Prowadzono badania w zakresie odsiarczania surowego biogazu rolniczego z wykorzystaniem techniki adsorpcyjno-absorpcyjnej na złożu granulowanym. Oszacowano jakość odsiarczonego biogazu oraz spadek ciśnienia podczas odsiarczania.

Podstawę oceny produkcji surowego biogazu z fermentatora przez „ścieżkę gazową” do odsiarczalników w instalacji pilotażowej stanowiły charakterystyki przepływu biogazu wynikające z ciśnienia wymuszającego ten przepływ. W każdym przypadku określenie tej charakterystyki polegało na określeniu wpływu strumienia biogazu na wartość nadciśnienia odpowiadającego spadkowi ciśnienia, który odpowiadał całkowitemu oporowi przepływu surowego biogazu przez złożo adhezyjne w fermentatorze. W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych zastosowano następujący algorytm:

- surowy biogaz wytwarzano z wykorzystaniem złoża adhezyjnego w warunkach procesu mezofilowego;

Opracowano kryteria oceny produkcji biogazu w zależności od:

- składu gazu surowego i odsiarczonego w przepływie w czasie;

- temperatury gazu w czasie w fermentatorze, przed odsiarczalnikiem, za odsiarczalnikiem;

- przepuszczalności gazu w czasie w fermentatorze (złożo adhezyjne), przed odsiarczalnikiem, za odsiarczalnikiem (złożo sypkie).

Dostosowanie kogeneratora (**O6**) do warunków występujących w gospodarstwie rolnym, obejmowało podjęcie próby określenia warunków pracy kogeneratora i opracowanie

optymalizacji biogazowej jednostki kogeneracyjnej produkującej energię elektryczną i ciepło w mikroinstalacji na potrzeby indywidualnego gospodarstwa rolnego. Analizie poddano kogenerator, który stanowi potencjalne zapotrzebowanie na energię z punktu widzenia polskiej energetyki i rolnictwa w kontekście produkcji energii odnawialnej. Najlepszą metodą była próba określenia warunków pracy kogeneratora w celu opracowania optymalizacji biogazowej jednostki kogeneracyjnej produkującej energię elektryczną i ciepło w mikroinstalacji na potrzeby indywidualnego gospodarstwa rolnego.

4.5.1.1. Gnojowica świńska

Materiał badawczy stanowił substrat w postaci gnojowicy świńskiej (**O1, O3, O6**) pochodzącej z fermy tuczników rasy Dan Bred 1100 [Dan Bred, 2021] utrzymywanych w systemie rusztowym. Sposób żywienia trzody chlewnej w oparciu o bilans składników i program żywienia zasadniczo determinuje produkcję substratu (obornika świńskiego). Zastosowane żywienie w postaci Superkoncentratu 600 plus jest mieszanką paszową składającą się ze śruty poekstrakcyjnej: śruty sojowej, śruty rzepakowej, węgla wapnia, fosforanu, mieszanki ziołowej, suplementu dla tuczników powyżej 30 kg z dodatkiem fitobiotyków i zakwaszaczy - zawartość składników analitycznych w 1 kg [Tuczniaki, 2021].

Gnojowica, w porównaniu z obornikiem (powstającym podczas ściółki) i gnojowicą (odciek z obornika), generuje szereg problemów związanych przede wszystkim z jego przechowywaniem, transportem i dalszym użytkowaniem. Podstawowymi zagrożeniami dla środowiska wynikającymi z przemysłowego chowu zwierząt i związanej z nim produkcji gnojowicy są [Kwiecińska, 2013]:

- zanieczyszczenie wód, przenawożenie gleby oraz spływ z pól do wód gruntowych i powierzchniowych;
- eutrofizacja, nawożenie wód śródlądowych i morskich (zakwity glonów, zmniejszenie bioróżnorodności i modyfikacja ekosystemów wodnych, utrata fauny bentosowej i spadochronu);
- zanieczyszczenia mikrobiologiczne, drobnoustroje chorobotwórcze zawarte w gnojowicy stanowią poważne zagrożenie dla zdrowia (najważniejsze to: Staphylococcus sp., paciorkowce kałowe, Escherichia coli, róża, prątki gruźlicy, paciorkowce chorobotwórcze, wirus pryszczycy, grzyby, pasożyty i jaja robaków, tj. tasiemców);
- pośrednie i wtórne oddziaływanie na powstawanie kwaśnych deszczy (emisja tlenków azotu i tlenków siarki) oraz nasilanie efektu cieplarnianego (emisja gazów cieplarnianych niszczących warstwę ozonową) [Baltic Green Belt, 2012].

Generalnie przyjmuje się, że gnojowica jest produktem płynopodobnym powstającym podczas bezściołowej hodowli zwierząt, czyli mieszaniną odchodów zwierzęcych, zarówno stałych, jak i płynnych w naturalnej proporcji, z dodatkiem wody procesowej stosowanej do jej splukiwania oraz z wycieki z urządzeń do pojenia zwierząt [Kutera, 1994]. W zależności od gatunku zwierząt wyróżnia się gnojowicę bydłą, wieprzową i drobiową, przy czym ostatni rodzaj wyprowadzany jest z gospodarstw w stanie suchym w postaci tzw. ściółki. Gnojowicę podzielono również ze względu na zawartość domieszek (np. gnojowica, ścieki wytwarzane w gospodarstwie lub pochodzące z zewnątrz). W tym przypadku rozróżnia się pełne (bez jakichkolwiek domieszek) lub niepełne (zmieszane z co najmniej jedną z ww. domieszek) [Baltic Green Belt, 2012]. Zdaniem Zbytki i Talarczyka [Zbytek i Talarczyk, 2008] gnojowica jest produktem płynnym, powstającym podczas bezściołowego chowu zwierząt. Jest to mieszanina odchodów zwierzęcych zarówno stałych jak i płynnych w naturalnej proporcji z dodatkiem wody technologicznej służącej do jej płukania oraz pochodzącej z nieszczelności urządzeń pojenia i resztek paszowych. Głównymi składnikami gnojowicy są kał i mocz. Odchody, które są odpadem trawienia, obejmują: - pozostałości paszowe: części niestrawione i strawione lub niewchłonięte, włókno surowe, części zdrewniałe, celulozę, sierść, części roślin o różnym stopniu rozkładu oraz materiały mineralne i wodę, - wydzieliny organizmu z przewodu żołądkowo-jelitowego; wydzieliny, minerały i nabłonki jelit, - bakterie i ich produkty przemiany materii. Mocz jest wodnym roztworem nieorganicznych i organicznych związków azotowych pochodzących z metabolizmu substancji białkowych i niebiałkowych oraz witamin, hormonów i enzymów [Kutera, 1994]. Na ilość i skład gnojowicy istotny wpływ mają: gatunek, wiek, wydajność i sposób żywienia zwierząt, sposób odprowadzania i przechowywania gnojowicy, zużycie wody w gospodarstwie oraz warunki klimatyczne [Kwiecińska, 2013]. Dlatego w ciągu roku jedno stanowisko w hodowli bydła produkuje w przedziale $(7,5 \div 21) \text{ m}^3$, a trzody chlewnej w przedziale $(1,2 \div 6,0) \text{ m}^3$ gnojowicy [Jochimsen, 2006]. Szacunkowa ilość wydalanego kału i moczu z jednego dużego współczynnika konwersji (EAD) wynosi 45 kg dziennie [Podkówka, 2016]. Standardowe zużycie wody do utrzymania higieny pomieszczeń inwentarskich nie powinno przekraczać 10 dm^3 na dobę. Łącznie dziennie uzyskuje się około 55 kg gnojowicy, co w ciągu 1 roku daje 20 m^3 gnojowicy na jedną dużą sztukę [Marszałek i in., 2011]. W praktyce przyjmuje się, że 1 tona gnojowicy ma kubaturę 1 m^3 [Jochimsen, 2006]. Zawartość suchej masy w gnojowicy bydłowej waha się w granicach $(6,5 \div 10,5)\%$, a gnojowicy świńskiej w granicach $(3,8 \div 7,5)\%$. Ilość suchej masy w gnojowicy zależy od ilości użytej wody. Ze względu na ilość wody w oborniku gnojowicę dzieli się na gęstą

(ponad 8% suchej masy) i rzadką (poniżej 8% suchej masy). Ponadto wyróżnia się gnojowicę rozcieńczoną, w której dodatek wody technologicznej przekracza 20% objętości gnojowicy, a zawartość suchej masy jest mniejsza niż 8% [Kwiecińska, 2013]. Około (70÷80)% suchej masy stanowią związki organiczne, m.in. celuloza, lignina, hemicelulozy, pentozy, skrobia. Głównym źródłem azotu w gnojowicy jest mocznik [Dębska, 2004]. Azot w gnojowicy występuje w kombinacjach organicznych i mineralnych. Do związków organicznych należą: białka, aminokwasy, mocznik, kwas hipurowy i inne. Średnio 50% azotu występuje w postaci rozpuszczalnej w wodzie, a 40% to azot amonowy, łatwo dostępny dla roślin. Stosunek C:N w gnojowicy bydlęcej wynosi średnio 6,8 [Flizikowski i Bieliński, 1999]. Gnojowica zawiera makro- i mikroelementy niezbędne w procesie przemian biochemicznych w komorze fermentacyjnej. W ciągu roku średnio z 1 jednostki konwersji w gnojowicy otrzymujemy: P - 28,8 kg, K - 41,1 kg, Ca - 35,3 kg, Na - 11,0 kg, Mg - 10,0 kg. Gnojowica wieprzowa jest bogatsza w fosfor niż gnojowica bydlęca. pH gnojowicy jest stabilne, dla gnojowicy bydlęcej wynosi około 7,2 a dla świń około 7,0 i jest zasadowe.

4.5.1.2. Model monosubstratowego reaktora przepływowego biogazu wraz z instalacją tzw. „ścieżką biogazu”

Projekt i budowę modelu reaktora biogazu przepływowego monosubstratowego przeprowadzono na podstawie wynalazku [Myczko, 2012]. Przedmiot wynalazku [Myczko i in., 2018] przedstawiono szczegółowo w (O1), a widok wykonania fermentatora na Rys. 5.



Rys. 5. Monosubstratowy reaktor przepływowy do fermentacji metanowej gnojowicy wraz z fragmentem instalacją do produkcji biogazu – widok (fot. Grzegorz Wałowski).

Fermentator, którego cylindryczna część jest położona pionowo, zawiera wypełnienie w postaci pionowych rur wykonanych z tworzywa sztucznego Rys. 6a, po piaskowaniu o chropowatych powierzchniach Rys. 6b.

(a)



(b)



Rys. 6. Wypełnienie fermentatora, złoże szkieletowe wykonane z rur typu pionowego A PVC-U S4 UD umieszczone w widoku kosza: **a)** brak chropowatości na powierzchni rur; **b)** chropowatość powierzchni rur po piaskowaniu wynosi 80 μm (fot. Grzegorz Wałowski).

W górnej części fermentatora znajduje się wspólny króciec, przez który podawane jest świeża gnojowica świńska i fermentująca masa. Tuż obok znajduje się króciec wylotowy biogazu; jest on połączony z rurociągiem za pomocą dmuchawy, zaworu odwadniającego gaz, króćca wlotowego biogazu i bełkotki (urządzenia barbotażowego), umieszczonej na dnie fermentatora – Rys. 7.

(a)



(b)



Rys. 7. Układ mieszania substratu w reaktorze widziany od spodu: **a)** elementy ssące; **b)** fragment dyszy ssącej (fot. Grzegorz Wałowski).

Pionowe rury Rys. 6b, które zwiększają aktywną powierzchnię dla flory bakterii fermentacyjnych, są umieszczone wewnątrz węzownicy grzewczej Rys. 8. Wężownica grzewcza jest połączona z pompą wodną i wymiennikiem ciepła, które tworzą zamknięty obieg dla cyklu wody.



Rys. 8. Złoże szkieletowe umieszczone w fermentatorze - pomiędzy fragment wężownicy - zabezpieczone kratą (fot. Grzegorz Wałowski).

W dolnej części fermentora Rys. 5 znajduje się króciec wylotowy masy fermentacyjnej, który poprzez pompę masy fermentacyjnej połączony jest ze wspólnym króćcem doprowadzającym świeży substrat i masę fermentacyjną do fermentatora.

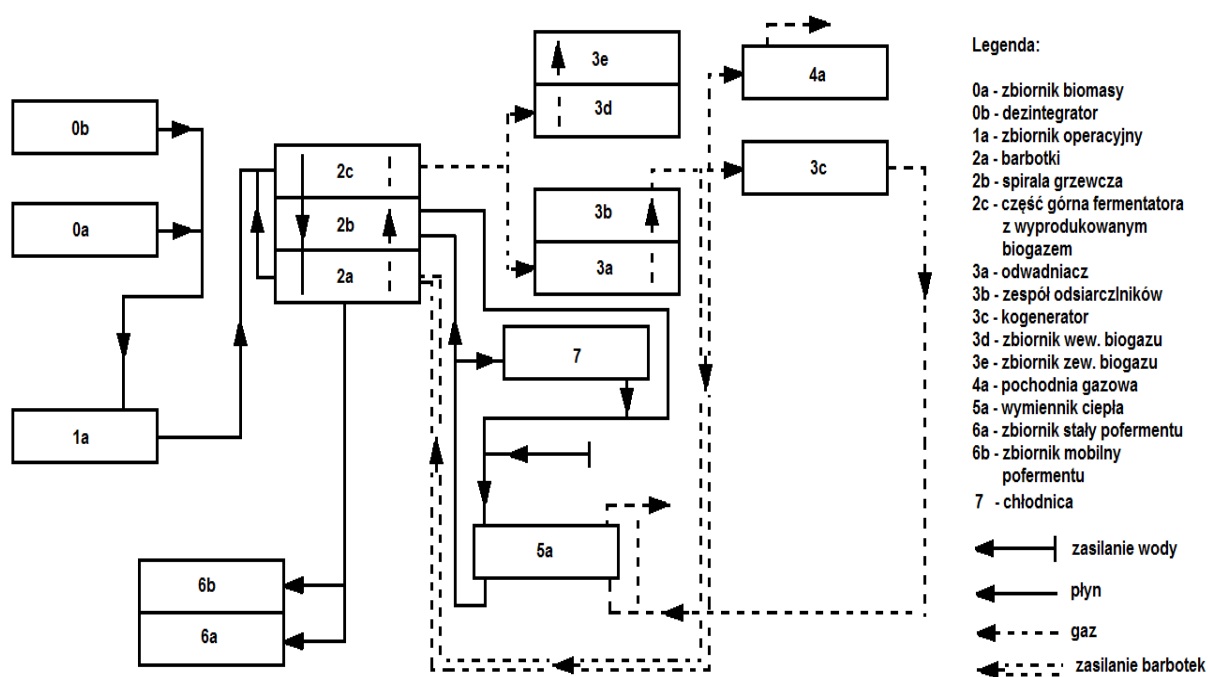
Fermentator jest napełniany gnojowicą świńską w cyklu automatycznym, zapewniając pionową migrację frakcji biofermentacyjnej przez cały zbiornik. Część biogazu, obecna w przestrzeni gazowej fermentatora, jest przenoszona do bełkotki (urządzenia barbotażowego), a następnie w postaci pęcherzyków unosi się do góry, mieszając masę fermentującą. Fermentator pracuje w temperaturze $(35\div 40)$ °C, czynnikiem grzewczym jest ciepła woda przepływająca przez wężownicę grzewczą Rys. 8. Pozostałość pofermentacyjna jest odprowadzana $(2\div 3)$ razy dziennie przez główny króciec wylotowy. Poziom napełnienia fermentatora jest kontrolowany w cyklu automatycznym.

Opracowano instalację pilotażową (**O1, O3, O6**), widok – Rys. 9a, schemat blokowy – Rys. 9b, wskazując na sposób wstępnej obróbki substratu, produkcji (**O1**) i oczyszczania surowego biogazu (**O3**) oraz kongeneracji (**O6**). Zgodnie ze schematem Rys. 9a zbiornik roboczy 1a napełniany jest płynnym substratem z centralnego zbiornika biomasy 0a; całość jest mieszana i doprowadzana do górnej części fermentatora 2 za pomocą króćca. Napełnianie fermentatora odbywa się w sposób automatyczny poprzez system monitorowania i sterowania procesem. Proces napełniania odbywa się dwa lub trzy razy na dobę, łącznie dla fermentatora o pojemności 15 m^3 , tj. $1,5\text{ m}^3\cdot\text{doba}^{-1}$. Do kontroli poziomu substratu w fermentatorze stosuje się sondę hydrostatyczną. Raz na 24 godziny część pozostałości po fermentacji jest kierowana do zbiornika pozostałości po fermentacji 6 i zastępowana taką samą objętością świeżej biomasy. Fermentator jest napełniany biomasą od góry, co zapewnia kierunkowy ruch/migrację frakcji fermentacyjnej przez cały system. Pionowa cyrkulacja biomasy i system cyrkulacji świeżego, właśnie wygenerowanego gazu są wykorzystywane do mieszania zawartości fermentatora. Mieszanie zawartości fermentatora, w celu uśrednienia jej składu, odbywa się za pomocą barbotażu, przy użyciu bełkotki 2a. Jest to realizowane w taki sposób, że część biogazu jest pobierana z przestrzeni gazowej fermentatora za pomocą dmuchawy i kierowana przez zawór zwrotny do dolnej części fermentora przez system bełkotek. Gaz wypływa z bełkotek w postaci pęcherzyków i podczas migracji w górę miesza zawieszinę. Część fermentującej masy jest transportowana za pomocą zewnętrznego systemu z dolnej części fermentatora do rurociągu, podającego świeży/surowy substrat do fermentatora. Wypełnienie dla flory bakterii fermentacyjnych znajduje się wewnątrz fermentatora.

(a)



(b)



Rys. 9. Instalacja prototypowa produkcji biogazu: **a)** widok od prawej: kontener z instalacją tzw. „ścieżka biogazowa”; fermentator; budynek inwentarski (chlewnia); laguna (zbiornik na przereagowany ferment) (fot. Grzegorz Wałowski); **b)** schemat blokowy stanowiska badawczego (opracowanie własne).

Fermentator jest ogrzewany za pomocą rury w formie węzownicy grzewczej 2b, ciepłą wodą, która jest pobierana z wymiennika ciepła 5a umieszczonego przy kogeneratorze 3c. Biogaz

uzyskany w fermentatorze jest kierowany do układu oczyszczania biogazu, składającego się z dwóch odsiarczalników 3b, z wyposażeniem do regeneracji złoża. Biogaz przepływa naprzemiennie do odsiarczalników, w których jest oczyszczany/poddawany obróbce w celu usunięcia związków siarki. W tym czasie złoże drugiego odsiarczalnika jest regenerowane. Aby usunąć nadmierną wilgoć z biogazu, odwadniacz biogaz 3a jest zainstalowana przed odsiarczalnikami. Nadciśnienie biogazu w fermentatorze powoduje pokonanie oporu, szacowanego na $(2\div 3)$ kPa, przepływu przez odwadniacz i odsiarczalniki. Odsiarczony biogaz jest przechowywany w zbiorniku 3d pod nadciśnieniem; zbiornik jest wyposażony w urządzenie zabezpieczające przed przekroczeniem dopuszczalnego nadciśnienia. Układ kontrolno-pomiarowy monitoruje nieoczyszczony biogaz i skład chemiczny oczyszczonego biogazu; system głównie komunikuje stężenie siarkowodoru w biogazie. Oczyszczony biogaz jest kierowany przez dmuchawę do kogeneratora 3c w celu konwersji na energię elektryczną (moc) i energię cieplną. W kogeneratorze znajduje się wymiennik ciepła 5a składający się z silnika paliwowego (spalinowego) i generatora prądu, podgrzewanego gazami spalinowymi. Woda podgrzana w wymienniku ciepła jest kierowana między innymi do węzownicy grzewczej 2b, umieszczonej przy wewnętrznej ścianie fermentatora. System ogrzewania fermentatora spiralnego jest zaprojektowany w celu utrzymania wymaganej temperatury fermentacji. Medium grzewcze, którym jest woda o temperaturze $65\text{ }^{\circ}\text{C}$, przepływa między wymiennikiem ciepła 5a, umieszczonym przy kogeneratorze, a węzownicą grzewczą 2b, aż do osiągnięcia zadanej temperatury biomasy w zakresie $(35\div 40)\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nadmiar ciepła przepływa również przez chłodnicę 7. W przypadku awarii lub wyłączenia kogeneratora czujnik ciśnienia zasygnalizuje wzrost ciśnienia i wyśle sygnał sterujący do automatycznego elementu sterującego zaworem trójdrożnym, a następnie biogaz zasila pochodnię gazową 4a. Jeśli w pochodni nie ma płomienia lub jeśli zgaśnie, dopływ biogazu do pochodni zostanie automatycznie odcięty.

4.5.1.3. Rezultaty z badań

Badania eksperymentalne na wdrożonej instalacji dotyczyły oceny ilości i jakości produkcji biogazu (O1).

Badania prowadzono w zakresie:

- Reologii; badania reologiczne gnojowicy świńskiej wykonano przy użyciu kine-matycznego wiskozymetru U-VIsc oraz wiskozymetru modyfikowanego Ubbelohde, produkcji Omnitek B.V., autoryzowanego dystrybutora EKMA, Polska;

Niezależnie oszacowano ilość biogazu oraz spadek ciśnienia w złożu szkieletowym. Podstawą oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez warstwę złoża była charakterystyka przepływu wynikająca z ciśnienia wymuszającego ten przepływ. W każdym przypadku określenie tej charakterystyki polegało na określeniu wpływu strumienia biogazu na wartość nadciśnienia odpowiadającego spadkowi ciśnienia, co było równoznaczne z określeniem całkowitego oporu przepływu biogazu przez złożo adhezyjne.

W przeprowadzonych badaniach eksperymentalnych zastosowano następujący algorytm:

- Gnojowica świńska została zakwalifikowana, jako substrat polidispersyjny;
- Przeprowadzono kilka prób szczelności dla biogazowni;
- Uruchomiono instalację na ciekłym inokulum (prowadzonym przez 10 dni) do uzyskania stabilnych warunków do produkcji biogazu, analizując jednocześnie warunki procesu niezbędne do fermentacji mezofilowej;
- Biogaz wytwarzano przy użyciu złoża adhezyjnego w układzie immobilizacji;
- Zastosowano cykliczne mieszanie hydrodynamiczne substancji polidispersyjnej;
- Zoptymalizowano mieszanie substratu polidispersyjnego w całym obiegu instalacji;
- Optymalizowano produkcję biogazu poprzez analizę składu biogazu;
- Opracowano kryteria oceny produkcji biogazu w zależności od przepływu gazu w czasie, ciśnienia gazu w czasie i temperatury w czasie;

Badania reologiczne - właściwości pniące substratu obserwowano w temperaturze 25 °C i 500 obr./min dla lepkości kinematycznej 27,5 mPa. Należy podkreślić, że właściwości gnojowicy świńskiej klasyfikują ją jako układ polidispersyjny, w którym faza stała znajduje się w stanie zawieszonym [Kutera i Hus, 1998; Kutera i Hus, 1990; Makowiak, 1997; Magrel i Boruszko, 1997] i rozwarstwa się podczas długotrwałego przechowywania. Górna warstwa składa się z kożucha owczego, dolna to ciecz nadosadowa, a dolna to zagęszczony osad [El-Mashad i in., 2021; Wang i in., 2019]. Natomiast piana powstaje z gnojowicy świńskiej w wyniku dyspersji [Szendowski i Siemianowski, 2013] pęcherzyków gazu w fazie ciekłej na skutek jednoczesnego oddziaływania białka z cząsteczkami cieczy i gazu [Darewicz i Dziuba, 2005; Walstra i de Roos, 1993]. Na podstawie przeprowadzonych badań [Problem, 2021; Donham i in., 2016; Beware, 2021; Gas, 2021] stwierdzono, że pęcherzykami gazu w warunkach beztlenowych są siarkowodor i CH₄, których stężenie może sięgać nawet 70%. Ponadto wyniki wykazały, że pniący się nawóz zawiera znacznie więcej węgla. Na tej podstawie postawiono hipotezę, że węgiel jest odpowiedzialny za wzrost aktywności metanogenów. Doprowadziło to do zmiany składu flory bakteryjnej, co doprowadziło do zwiększonej produkcji CH₄. Z drugiej strony piana jest bogata w białka i cząstki stałe, które

stabilizują pianę. Mikroby w nawozie przekształcają węgiel w CH_4 bardziej wydajnie. Zwiększa to stężenie CH_4 poprzez przenoszenie polimerów biologicznych i białek z gnojowicy świńskiej na powierzchnię. Mikroby stają się zatem stabilizatorami piany, determinując jej zdolność do utrzymywania rozproszonej fazy gazowej w celu produkcji zwłaszcza CH_4 .

Przeprowadzono kilka testów szczelności dla:

- instalacji biogazowej, rodzaj testu pneumatycznego, ciśnienie 0,5 bara, czas trwania testu 1 h;
- instalacji odzysku ciepła, rodzaj testu hydraulicznego, ciśnienie 5 barów, czas trwania testu 1 h;
- instalacja mieszająca w fermentatorze, rodzaj próby hydraulicznej, ciśnienie 3 bary, czas trwania próby 1 h;
- instalacja fermentacyjna, rodzaj próby hydraulicznej, ciśnienie 3 bary, czas trwania próby 1 h.

Rozruch instalacji trwał 10 dni z wykorzystaniem sterowania ręcznego, które dotyczyło:

- podgrzewania cieczy obiegowej komory fermentacyjnej,
- pompowania substratu do zbiornika wstępnego,
- regulacji ciśnienia gazu,
- dozowania dodatków stabilizujących natężenie przepływu masy biogazu,
- poziomu napełnienia zbiornika podstawowego.

Stopniowo wprowadzano sterowanie automatyczne na odcinku:

- cyrkulacji cieczy fermentacyjnej w komorze fermentacyjnej,
- dozowania substratu zasilającego do komory fermentacyjnej,
- oceny stopnia napełnienia komory fermentacyjnej, składu biogazu oraz parametrów analitycznych cieczy technologicznych.

Rozruch przeprowadzono na płynnym inokulum pofermentacyjnym z biogazowni z województwa wielkopolskiego przy następujących parametrach analitycznych procesu: temperatura 27,2 °C, pH 8, sucha masa 4,37%, sucha masa organiczna 62,25% suchej masy, OWN 17,641 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, LKT 3,117 $\text{mg CH}_3\text{COOH}\cdot\text{dm}^{-3}$ i APB 0,177 dla objętości początkowej 10 m^3 . Substratem płynnym była gnojowica tuczników o parametrach analitycznych procesu [Myczko, 2018]: temperatura (26,5 ÷ 30,5) °C, pH (7,8 ÷ 8,0), sucha masa 3,92%, sucha masa organiczna 66,70%, OWN 19,678 $\text{mg}\cdot\text{dm}^{-3}$, LKT 8,958 mg

$\text{CH}_3\text{COOH} \cdot \text{dm}^{-3}$ i APB 0,450 dla objętości podawania ($250 \div 500$) dm^3 . Od uruchomienia do ciągłej pracy pH było stabilne.

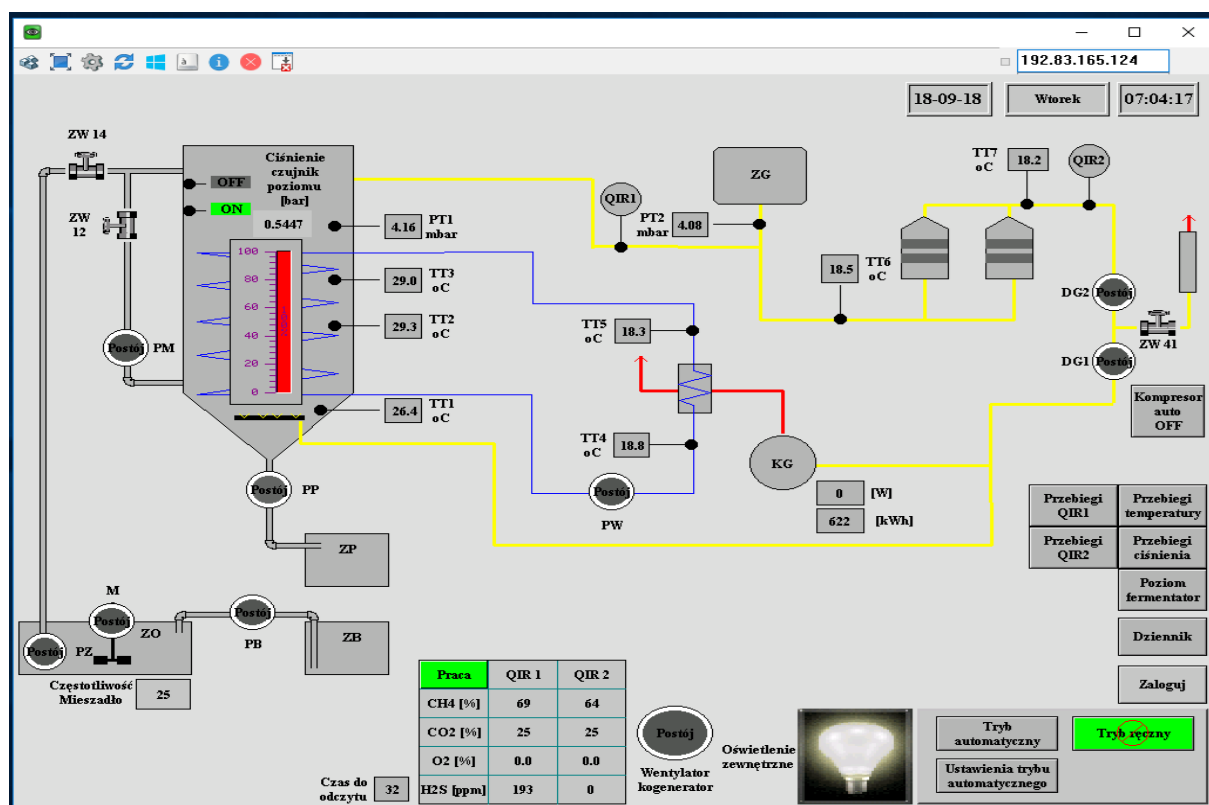
W efekcie uzyskano ciśnienie gazu w instalacji ($1,5 \div 2,5$) kPa i skład biogazu według modułów pomiarowych zainstalowanych przez producenta: CH_4 57,3%, CO_2 28,5%, O_2 0,3% i H_2S 0,000232%; reszta to inne, w tym H_2O , które nie mają znaczenia dla praktycznego wykorzystania energii.

Węzeł produkcji surowego biogazu to system transportu biogazu wytworzonego w zbiorniku fermentacyjnym wraz z jego wyposażeniem; umożliwia przeprowadzenie procesu fermentacji, jego kontrolę i regulację - Rys. 10. System sterowania i pomiaru jest wyposażony (na wejściu) w gazomierz i stacjonarny analizator gazu nieoczyszczonego QIR1 oraz analizator kontrolujący skład chemiczny gazu oczyszczonego QIR2. Analizator obejmuje moduły pomiarowe CH_4 , CO_2 , H_2S i O_2 , a jego wskazania mogą być kontrolowane na wyświetlaczu lub wykorzystywane do aktywacji wskaźnika „wizualno-dźwiękowego” lub do sterowania pracą jednostki adsorpcyjnej. Temperatura biogazu jest mierzona przez czujnik TT6. Wzrost ciśnienia surowego biogazu jest uwalniany przy 35 mbar i kierowany do odsiarczalników.

System cyrkulacji - zbiornik fermentacyjny jest napełniany biomasą od góry, aby zapewnić kierunkową migrację frakcji przez cały system. Pionowy system cyrkulacji biomasy i świeżo wyekstrahowany system cyrkulacji biogazu służą do mieszania zawartości zbiornika fermentacyjnego. System mieszania biomasy zapewnia homogenizację składu i temperatury fermentu, a także dostarczanie niektórych składników wspomagających proces fermentacji.

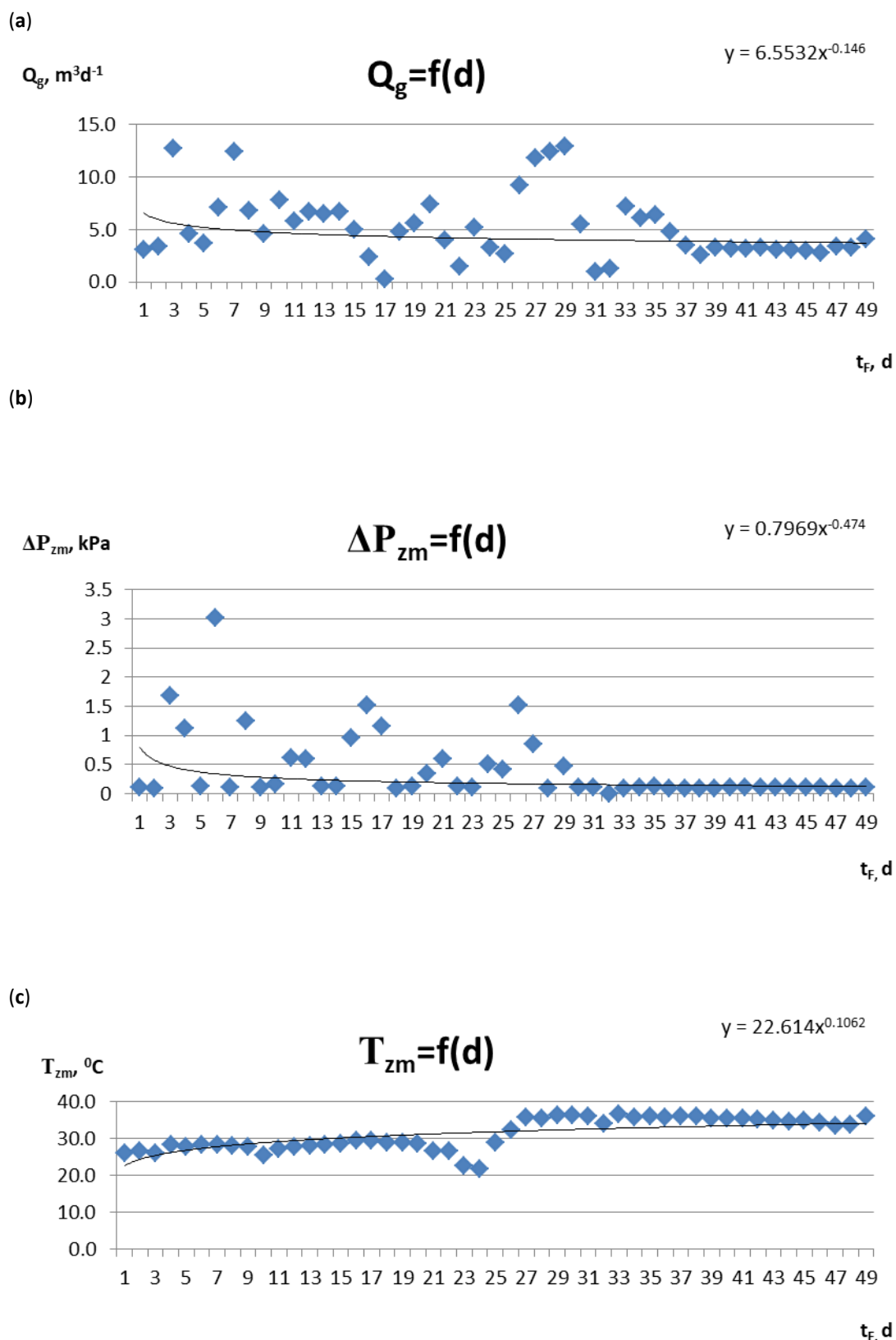
System unieruchamiania – wewnątrz fermentatora znajduje się wypełnienie, czyli szkielet wykonany z pionowych rur PCV stanowiących tzw. „kosz”. Wsad znajduje się na wysokości 1,22 m od dna zbiornika. Tak zwany „kosz” opiera się na podporach, które jednocześnie centrują go względem osi systemu.

Instalacja grzewcza – wewnętrzna ściana fermentatora wyposażona jest w węzownię grzewczą w postaci plastikowej rurki DN32. Medium grzewczym jest gorąca woda pobierana z głównego wymiennika ciepła znajdującego się w pobliżu jednostki CHP. Aby zapewnić optymalne warunki biogazu, ściany, stożkowe dno i pokrywa fermentatora są izolowane, aby ograniczyć emisję ciepła na zewnątrz. Optymalne warunki pracy fermentatora to temperatura ($35 \div 40$) °C, nadciśnienie gazu ($10 \div 20$) kPa.



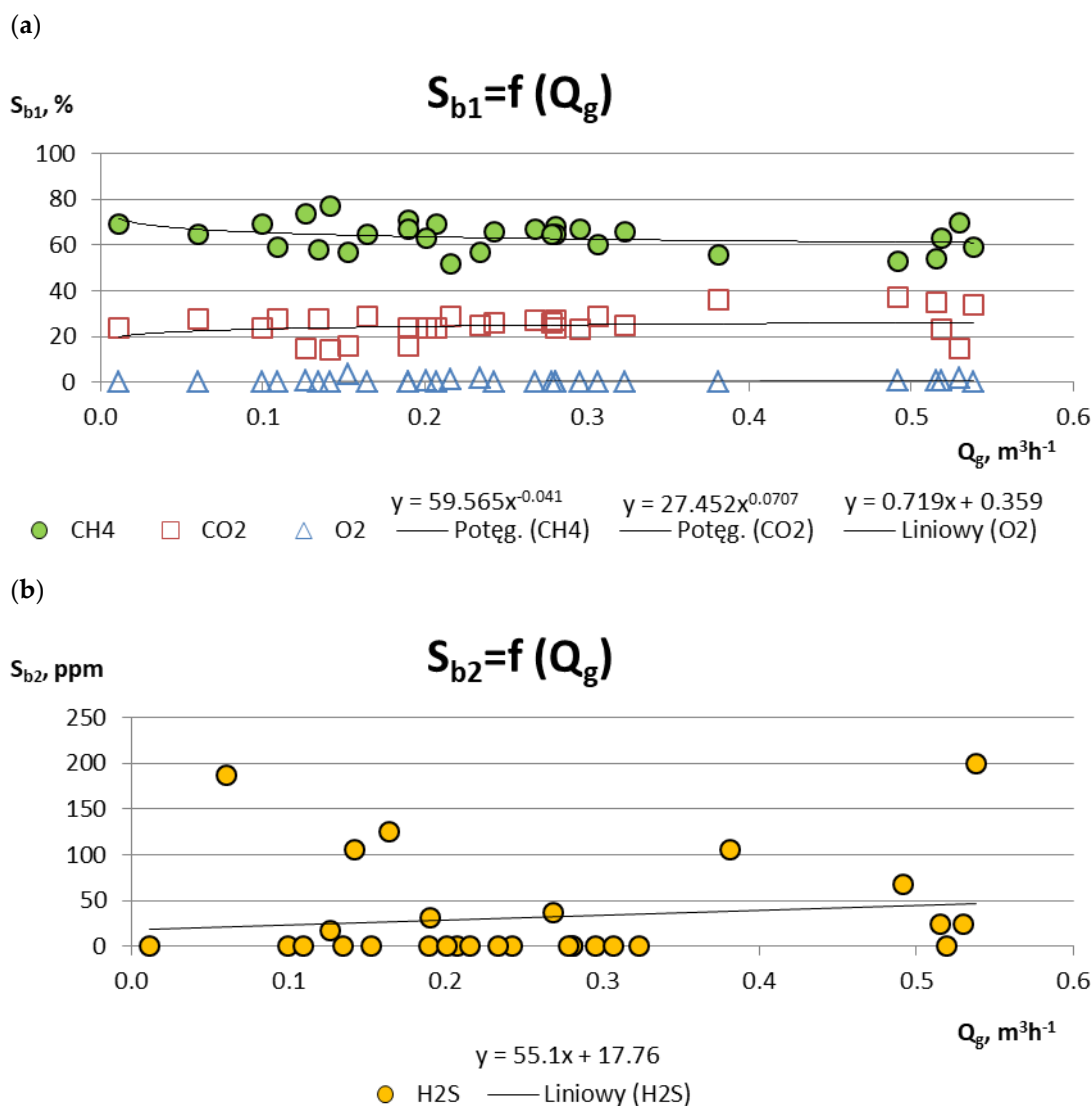
Rys. 10. Plansza synoptyczna układu sterowania i wizualizacji biogazowni - oprogramowanie Ultra VNC, (fotografia G. Wałowski): DG – dmuchawa gazu, KG – kogenerator, M – mieszadło, PB – pompa biomasy, PM – pompa mieszająca, PP – pompa pofermentu, PW – pompa wody, PT – ciśnienie, PZ – pompa zatapialna, QIR – analizator gazu, TT – temperatura, ZB – zbiornik biomasy, ZG – zbiornik gazu, ZO – zbiornik operacyjny, ZP – zbiornik pofermentu, ZW – zawór.

Podstawą oceny produkcji biogazu (**O1**) jest przebieg zmian średniego dobowego strumienia gazu. Interpretując Rys. 11a należy wskazać, że po 10 dniach produkcja biogazu ustabilizowała się, następnie w dniach 17, 22, 25, 31 i 32 wystąpiła minimalna produkcja biogazu (zjawisko inhibicji) spowodowana awariami mieszadła mechanicznego, którego rolą była stabilizacja substratu polidispersyjnego (gnojowicy świńskiej). Awaria mieszadła w zbiorniku roboczym doprowadziła do zastosowania innowacyjnego rozwiązania do hydrodynamicznego podawania substratu polidispersyjnego. Doprowadziło to do stabilnej produkcji biogazu począwszy od 39 dnia. Określenie wpływu strumienia biogazu skutkowało określeniem całkowitego oporu przepływu biogazu przez złożę adhezyjne - Rys. 11b. Interpretując Rys. 11c, należy wskazać, że po 22 dniach nastąpił spadek temperatury grzania fermentatora. Zastosowano innowacyjne rozwiązanie grzewcze: układ trzech grzałek zaczął działać od 24 dnia, a temperatura ustabilizowała się na poziomie 35 °C od 27 dnia.



Rys. 11. Zmiany parametrów technologii fermentacji mezofilowej z substratu polidispersyjnego dla średniej dobowej produkcji biogazu rolniczego [opracowanie własne]: **a)** zależność czasowa strumienia gazu; **b)** zależność czasowa ciśnienia i **c)** zależność czasowa temperatury.

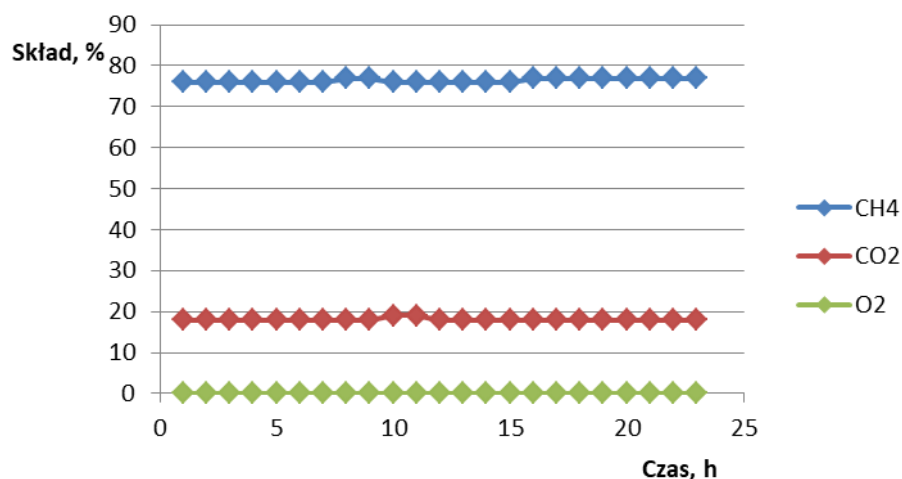
Substrat polidispersyjny, z którego powstaje biogaz rolniczy, zależy od paszy tuczniaka (O1). Przekłada się to na jakość biogazu rolniczego – Rys. 12a, w którym CH₄ osiąga nawet 80% przy bardzo niskim uwalnianiu H₂S – Rys. 12b.



Rys. 12. Skład biogazu rolniczego produkowanego z substratu polidispersyjnego (gnojowica świńska) (opracowanie własne): **a)** objętość CH₄, CO₂, O₂; **b)** udział H₂S.

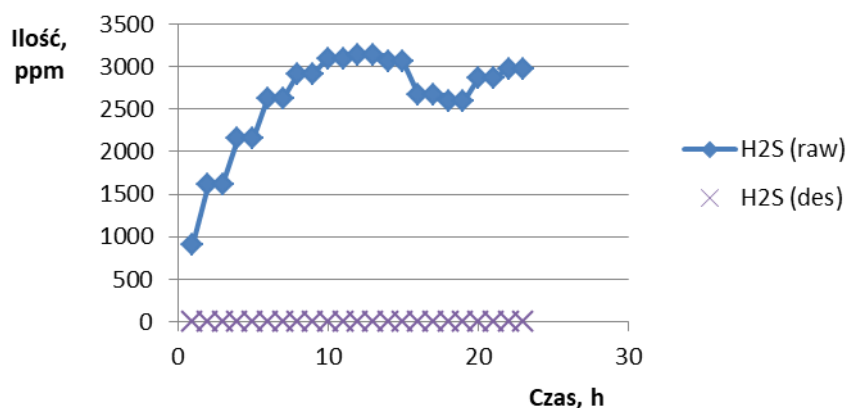
W ciągu 24 h, przy minimalnej wymianie 1,5 m³ substratu polidispersyjnego na 15 m³ objętości fermentatora, w celu utrzymania procesu produkcji biogazu, następuje wzrost kwasowości, tj. zaczyna uwalniać się H₂S. Zaobserwowano, że dla optymalnej produkcji biogazu należy stosować mieszanie w zakresie (1,5÷2,0) m³ substratu polidispersyjnego, tj. po 37 dniach parametry technologiczne ustabilizowały się (Rys. 12a) na naturalnym oborniku świńskim.

Substrat polidispersyjny, z którego powstaje biogaz rolniczy, zależy od żywienia tuczniaka (O1). Przekłada się to na jakość biogazu rolniczego, w którym udział CH_4 sięga nawet 80%, co przedstawiono na Rys. 13. Zaobserwowano, że dla optymalnej produkcji biogazu należy stosować mieszaninę, która charakteryzuje się zawartością substratu polidispersyjnego w granicach $(1,5 \div 2,0) \text{ m}^3$, jaka występuje w naturalnym oborniku świńskim.



Rys. 13. Procent biogazu rolniczego wyprodukowanego z substratu polidispersyjnego (opracowanie własne); objętość CH_4 , CO_2 i O_2 .

W celu utrzymania procesu produkcji biogazu, przy minimalnej wymianie $1,5 \text{ m}^3$ substratu polidispersyjnego w ciągu 24 godzin na 15 m^3 objętości fermentatora, zaobserwowano wzrost powstawania H_2S , co przedstawiono na Rys. 14.



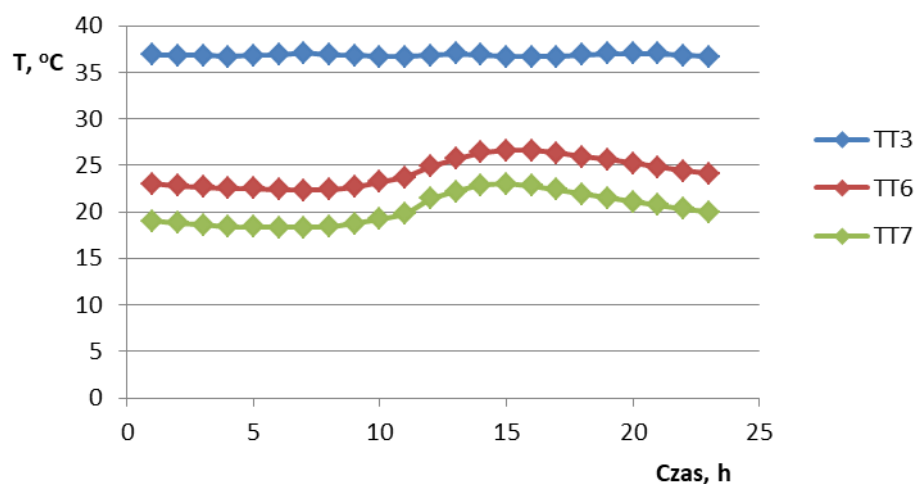
Rys. 14. Ilość H_2S w biogazie rolniczym wyprodukowanym z substratu polidispersyjnego (opracowanie własne): H_2S (raw) – biogaz surowy; H_2S (des) – biogaz odsiarczony.

Ze względu na nadmierną ilość uwalnianego H_2S , sięgającą ponad 3000 ppm, opracowano autorską metodę odsiarczania, klasyfikowaną jako metoda fizykochemiczna, stosowaną poza fermentatorem, jak pokazano na Rys. 15.



Rys. 15. Odsiarczalniki – wnętrze, pojemność 50 litrów (fot. Grzegorz Wałowski).

Opracowano mieszankę węgla (węgiel aktywowany) z rudą darniową (związki żelaza), która umożliwia 100% odsiarczania surowego biogazu rolniczego w warunkach procesowych dla fermentacji mezofilowej, jak pokazano na Rys. 16.

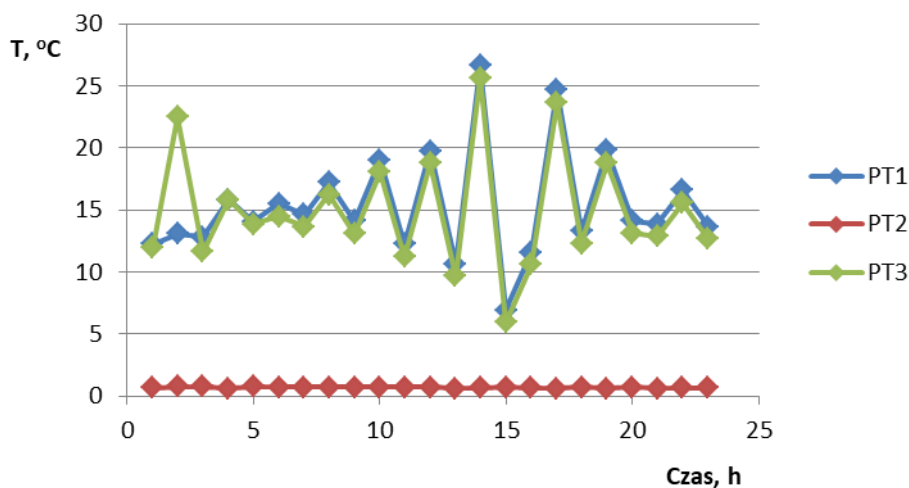


Rys. 16. Pomiar temperatury - punkty pomiarowe zgodnie ze schematem procesu Rys. 10, niezbędne do produkcji i odsiarczania biogazu rolniczego wytwarzanego z substratu polidispersyjnego (opracowanie własne): TT3 — pomiar wewnątrz fermentatora; TT6 — pomiar przed odsiarczalnikiem; TT7 — pomiar za odsiarczalnikiem.

Biorąc pod uwagę zakres temperatur ($22,3 \div 26,6$) °C dla surowego biogazu w punkcie pomiarowym TT6, tj. pomiar przed odsiarczalnikiem, warto zauważyć, że oczyszczony

biogaz jest chłodniejszy o 3 °C według punktu pomiarowego TT7, tj. pomiar za odsiarczalnikiem, w zakresie temperatur (18,3÷23,6) °C.

Zaobserwowano zjawisko niskiego ciśnienia (Rys. 17) dla punktu pomiarowego PT2, pomiar przed odsiarczalnikiem w zakresie ciśnień (0,61÷0,75) mbar.



Rys. 17. Pomiar ciśnienia - punkty pomiarowe wg schematu procesu (Rys. 10), niezbędne do produkcji i odsiarczania biogazu rolniczego produkowanego z substratu polidispersyjnego (opracowanie własne): PT1 — pomiar wewnątrz fermentatora; PT2 — pomiar przed odsiarczalnikiem; PT7 — pomiar za odsiarczalnikiem.

Biorąc pod uwagę zakres ciśnienia (6,90÷19,78) mbar dla surowego biogazu w punkcie pomiarowym PT1, tj. pomiar wewnątrz fermentatora, warto zauważyć, że oczyszczony biogaz ma niższe ciśnienie 1 mbar zgodnie z punktem pomiarowym PT3, tj. pomiar za odsiarczalnikiem w zakresie ciśnienia (5,90÷18,78) mbar.

Na podstawie przeprowadzonych badań eksperymentalnych opracowano wytyczne do przyszłych badań eksploatacyjnych układu odsiarczania i oczyszczania biogazu (O3). Układ oczyszczania biogazu składa się z zespołu dwóch odsiarczalników i odwadniacza biogazu z urządzeniami do regeneracji złoża. Wytworzony biogaz wydostaje się z górnej przestrzeni fermentatora przez zawór wyposażony w ręczny zawór kulowy lub zawór wyposażony w sterowany zawór kulowy. Następnie surowy biogaz przepływa do jednego z dwóch odsiarczalników, gdzie jest oczyszczany ze związków siarki (głównie siarkowodoru i merkaptanów — tioli). Odsiarczenie biogazu odbywa się za pomocą uwodnionych tlenków żelaza zawartych w rudzie. Związki siarki są utleniane do siarki elementarnej, która jest zatrzymywana w rudzie. Powstały w reakcji siarczek żelazawy jest następnie regenerowany z powrotem do tlenku żelaza II za pomocą tlenu w obecności pary wodnej. Aby zapewnić

warunki niezbędne do regeneracji katalizatora w rudzie darniowej, mieszaninę pary wodnej wytworzonej w generatorze z powietrzem należy wprowadzić do biogazu za pomocą sprężarki. Ilości tych substancji należy dobrać na podstawie strumienia związków siarki niesionych przez biogaz. Regeneracja złoża następuje po ustaleniu utraty zdolności oczyszczania biogazu ze szkodliwych domieszek. W zależności od ilości, rodzaju zastosowanego adsorbenta i sprawności systemu, odbywa się to mniej więcej raz na ~9 miesięcy i (w tym przypadku) proces ten jest wyłączony z cyklu automatycznej regulacji. Odsiarczalniki wymagają od czasu do czasu wyłączenia z eksploatacji w celu odkrycia i wymieszania (regeneracja przez wymieszanie z powietrzem atmosferycznym) lub wymiany rudy na nową. Aby bezpiecznie przeprowadzić taką operację, należy na przykład odciąć jeden odsiarczalnik od instalacji biogazowej zaworami, a następnie wprowadzić azot z cylindra, usuwając biogaz z odsiarczalnika do atmosfery przez odpowiedni zawór. Po regeneracji lub wymianie darniowego żelaza odsiarczalnik można ponownie uruchomić w instalacji. Aby regeneracja darniowej rudy mogła odbywać się bez przestoju fermentatora, biogazownia jest wyposażona w dwa naprzemienne odsiarczalniki. Wprowadzenie zbyt dużej ilości powietrza do biogazu może spowodować powstanie mieszanki wybuchowej, natomiast zbyt duża ilość pary wodnej może zablokować biogaz, powodując jego kondensację i gromadzenie się w zbiorniku. Aby usunąć nadmiar wilgoci z gazu, należy zainstalować odwadniacz gazu za odsiarczalnikami. Nadciśnienie biogazu w fermentatorze pozwoli systemowi pokonać opór jego przepływu przez odsiarczalnik i odwadniacz oraz ciśnienie wsteczne w zbiorniku biogazu.

4.5.1.4. Ocena mobilnej jednostki kogeneracyjnej na biogaz

Zwrócono uwagę na korzyści środowiskowe i aspekty zrównoważonego rozwoju układów kogeneracyjnych oraz znaczenie tych układów dla wykorzystania energii odnawialnej. Wskazując na lukę badawczą – dotyczącą dostosowania kogeneratora (O6) do warunków panujących w gospodarstwie rolnym, który powinien spełniać oczekiwania techniczne i technologiczne dla procesu zagospodarowania produkowanego CH₄ o wartości 80% w biogazie rolniczym – zaproponowano przedstawienie obecnej sytuacji, problemów i perspektyw optymalizacji i eksploatacji jednostki kogeneracyjnej biogazowej na przykładzie gospodarstwa rolnego. Wykorzystując swoją wiedzę i możliwości przemysłowe, komponenty niezbędne do optymalizacji wykorzystaly firmy: Woodward Inc., Woodward Poland, Karl Dungs GmbH & Co. KG i WOMIX.

Węzeł kogeneracyjny (technicznie rzecz biorąc) jest zespołem kogeneratora, wymiennika ciepła i układu transportu ciepła do warunków pracy instalacji. Układ kogeneracyjny składa się z następujących elementów węzła:

a) Kogenerator;

b) Elementy do zainstalowania jednostki kogeneracyjnej w biogazowni (elementy instalacji):

- Pompa obiegowa centralnego ogrzewania,
- Zawory sterowane elektrycznie,
- Chłodnica spalin dostosowana do silnika kogeneracyjnego,
- Przepustnica sterowana automatycznie,
- Zbiornik buforowy chłodziwa.

Wymiennik ciepła dostosowany do generatora wielopaliwowego (pierwotnie zastosowany kogenerator), jest zasadniczo zasilany biogazem w celach badawczych. Medium roboczym wymiennika jest woda, która będzie wchodzić do wymiennika z maks. temp. 38°C, a woda będzie podgrzewana na wymienniku do maks. temp. 65°C. Kogenerator ma chłodnicę spalin o mocy cieplnej (8÷10) kW i temperaturze spalin 550°C. Spirala grzewcza w formie rury o średnicy wewnętrznej $d_w = 1,25'' = DN32$, jest zamontowana wewnątrz fermentatora. Pompa wodna tłocząca medium grzewcze (wodę) jest częścią układu.

Urządzenia sterujące i regulacyjne:

- Czujnik temperatury, który wskazuje temperaturę wody wchodzącej do spirali grzewczej i wysyła sygnał do zaworów zasuwowych; czujnik temperatury jest pomocny w określaniu bilansu cieplnego. Czujniki temperatury są pomocne w określaniu rozkładu temperatury w zbiorniku, a czujnik temperatury służy do sterowania pracą pompy;
- Odpowietrznik znajduje się za zaworem.

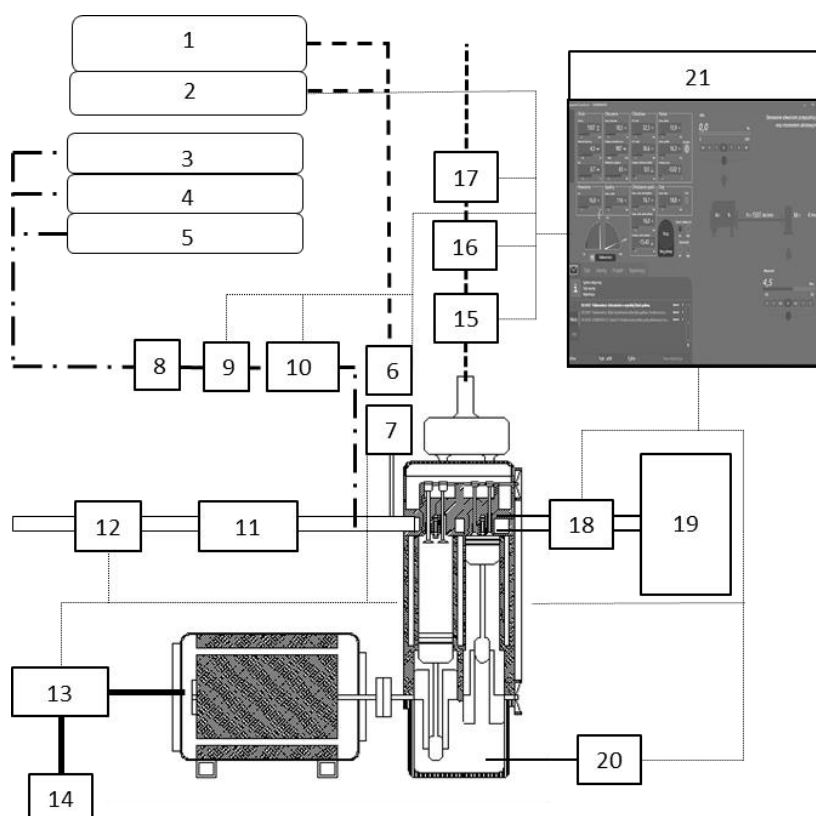
Układ kogeneracyjny wyposażony jest w falownik, który synchronizuje częstotliwość wytwarzanej energii elektrycznej z siecią energetyczną. Podczas pracy generatora energia jest wprowadzana do sieci za pomocą gniazda sieciowego. W przypadku awarii i odłączenia generatora lub farmy od sieci energetycznej silnik wyłączy się i przestanie wytwarzać energię elektryczną.

Badania przeprowadzono na dwucylindrowym silniku wysokoprężnym przeznaczonym do napędu agregatu prądotwórczego, który nie był przystosowany do spalania paliw gazowych. Modyfikacje silnika wprowadzone poprzez umieszczenie dwóch wtryskiwaczy gazowych w kolektorze dolotowym pozwoliły na zasilanie silnika również biogazem. Takie działania odpowiadają sytuacji, gdy podmiot produkujący biogaz

(biogazownia) podejmuje próbę samodzielnego wykorzystania uzyskanego biogazu do produkcji energii elektrycznej za pomocą agregatu prądotwórczego. W tego typu działalności, biorąc pod uwagę aspekt ekonomiczny, przedsiębiorstwo (biogazownia) zazwyczaj kupuje silnik wysokoprężny (o wyższej sprawności niż silniki z zapłonem iskrowym) lub modyfikuje istniejący i dostosowuje go do własnych potrzeb, nie ingerując w układ regulujący pracę silnika. W większości przypadków są to silniki/jednostki napędowe starszej generacji, sterowane zazwyczaj za pomocą mechanicznego regulatora prędkości.

W silniku doświadczalnym zastosowano elektroniczny układ sterowania układem wtrysku biogazu podawanego do kolektora dolotowego, który w zależności od założonego udziału biogazu i parametrów pracy silnika regulował czas otwarcia wtryskiwacza. Zmiana czasu otwarcia wtryskiwacza biogazu powodowała automatyczną korektę dawki paliwa ciekłego przez regulator pompy wtryskowej.

Eksperymentalny silnik wysokoprężny na biogaz (Rys. 18) — przeprowadzone pomiary miały charakter wstępnych testów, których celem było zapewnienie braku zakłóceń w układach regulujących pracę silnika napędzającego generator. Należy podkreślić, że w badaniach wielu autorów [Wasilewski i Krzaczek, 2014; Duda i in., 2018; Hunicz i Krzaczek, 2016; Bueschke i in., 2017; Kuranc, 2015] badano całkowitą ilość tlenków azotu (NO_x) niezależnie od testowanych paliw i układów spalania. W pracy wykonano jednak pomiary dwóch najgroźniejszych NO_x , które często występują razem, tj. NO i NO_2 , z których NO_2 jest uważany za najgroźniejszy ze względu na wpływ na zdrowie ludzi i innych organizmów żywych. Jako paliwo referencyjne do testów wykorzystano surowy biogaz (BG). Ocenę wpływu ilości biogazu na poziom emisji CO , NO , NO_2 i cząstek stałych (PM) przeprowadzono przy stałej prędkości obrotowej silnika dla różnych poziomów obciążenia; udział biogazu zmieniano od 40 do około (70÷80)%, tj. do momentu wykrycia znaczącego spalania stukowego w testowanych silnikach. Biogaz do badań pobierano bezpośrednio z instalacji produkcyjnej i wtryskiwano za pomocą kompresora do cylindra pod ciśnieniem 100 bar, z którego pobierano próbkę do analizy. Skład BG oznaczano za pomocą analizatora składu gazu GA2000, a gęstość i wartość opałową obliczano na podstawie składu biogazu, masy molowej mieszaniny CH_4 i CO_2 oraz wartości opałowej CH_4 .

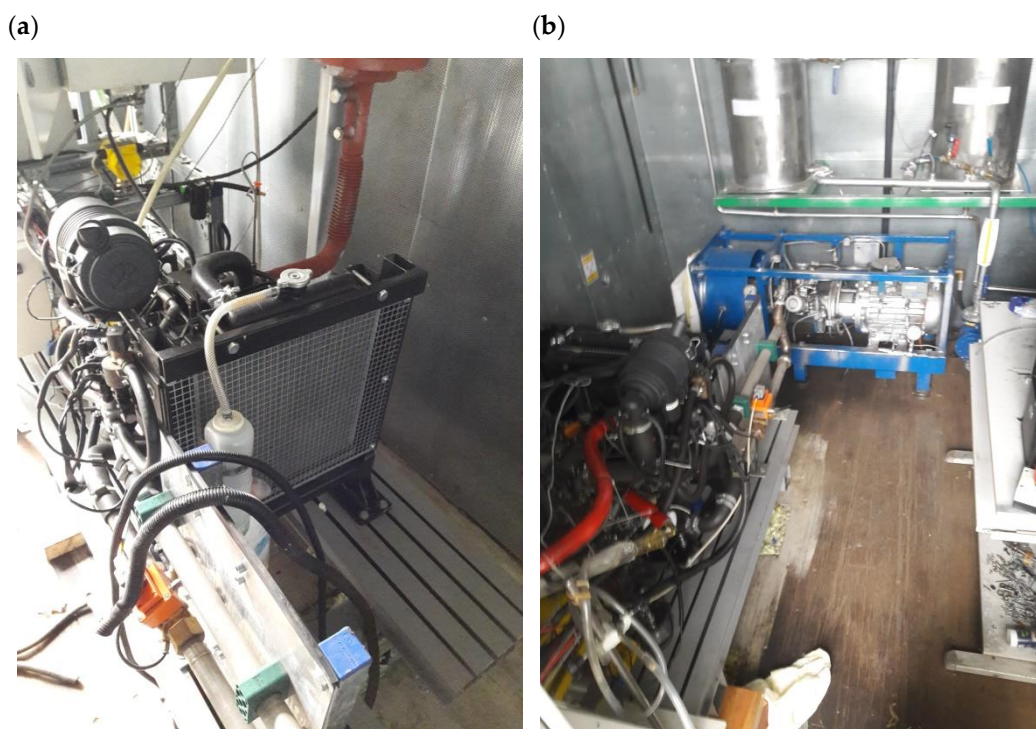


Rys. 18. Schematyczny diagram eksperymentalnej instalacji silnika wysokoprężnego na biogaz [Golimowski i in., 2019]. 1 — Zbiornik paliwa wysokoprężnego. 2 — Zbiornik paliwa biodiesel z układem grzewczym. 3 — Zbiornik paliwa biogazowego. 4 — Zbiornik paliwa CNG. 5 — Zbiornik paliwa LPG. 6 — Przepływomierz masowy oleju napędowego. 7 — Pomiar temperatury paliwa. 8 — Regulator ciśnienia gazu. 9 — Wartość sterowania przepływem gazu. 10 — Sterowanie układem wtryskiwacza gazu. 11 — Filtr powietrza. 12 — Pomiar układu temperatury, wilgotności i ciśnienia. 13 — Układ sterowania i pomiaru energii. 14 — Sieć elektryczna. 15 — Temperatura spalin. 16 — Analizator emisji. 17 — Pomiar objętościowego przepływu spalin. 18 — Pomiar energii cieplnej. 19 — Układ chłodzenia. 20 — Pomiar temperatury oleju. 21 — Główny układ pomiaru i sterowania.

Stanowisko badawcze (Rys. 18) składało się z dwucylindrowego silnika wysokoprężnego z komorą wstępną o mocy 9 kW, chłodzonego cieczą. Silnik wyposażony jest w układ zasilania paliwem z wtryskiem pośrednim z sekcyjnym wtryskiem paliwa. Silnik jest trwale połączony za pomocą wału odbioru mocy (PTO) z silnikiem asynchronicznym sterowanym przez automatyczny układ sterowania i pomiaru. Energia elektryczna wytwarzana przez silnik asynchroniczny była kierowana bezpośrednio do sieci energetycznej. Stanowisko doświadczalne stanowi zwartą całość i służy do badań symulacyjnych [Golimowski i in., 2019].

Badany silnik spalinowy pracował ze stałą prędkością obrotową $2000 \text{ obr./min} \pm 30 \text{ obr./min}$, którą regulowano nastawami pompy wtryskowej i regulowano za pomocą regulatora pompy wtryskowej w zależności od obciążenia silnika generowanego przez asynchroniczny układ sterowania i pomiaru silnika. Badania rozpoczęto po rozgrzaniu silnika tak, aby temperatura oleju silnikowego przekroczyła $70 \text{ }^\circ\text{C}$. Pomiar wykonano w sześciu punktach pomiarowych, dla których wartość momentu obciążenia wynosiła 0, 4,5, 8, 12, 16 i 20 Nm. Po każdej zmianie konfiguracji parametrów silnik pracował przez 0,5 h w celu ustabilizowania parametrów pracy.

Eksploatacja jednostki kogeneracyjnej na biogaz – badania potwierdziły efektywność produkcji biogazu, a jednocześnie wykazały pewne ograniczenia techniczne i trudności w eksploatacji instalacji badawczej przez indywidualne gospodarstwo rolne. Obecny system sterowania i monitorowania pracy jednostki kogeneracyjnej (Rys. 19) nie spełnia znowelizowanych wymagań Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (IRiESD) krajowych operatorów sieci dystrybucyjnych (OSD), w tym IRiESD obowiązującej w ENEA Operator, tj. OSD odpowiedzialnym za odbiorców w Ocieszynie [Raport, 2019a].



Rys. 19. Układ sterowania i monitoringu agregatu kogeneracyjnego przed optymalizacją: **a)** chłodnica agregatu; **b)** fragment agregatu (od prawej) na tle sprężarki biogazu (fot. Grzegorz Wałowski).

Układ sterowania i monitoringu agregatu kogeneracyjnego przed optymalizacją, m.in.:

- nie zapewnia automatycznej synchronizacji (dane potwierdzone przez producenta) jednostki kogeneracyjnej z siecią publiczną, a jedynie umożliwia pracę jednostki w trybie wyspowym na wydzielonej sieci energetycznej biogazowni o zmiennej prędkości obrotowej (czyli o zmiennej częstotliwości wytwarzanej energii elektrycznej) i ma poważne trudności w synchronizacji z siecią publiczną poprzez wykorzystanie istniejącego przemiennika częstotliwości;
- nie posiada automatycznych zabezpieczeń wymaganych przez IRiESD krajowego OSD, zwykle definiowanych jako $\text{tg } \varphi = 0,4$ (współczynnik mocy wymagany przez OSD);
- nie zapewnia pracy ze współczynnikiem mocy wymaganym przez właściwy terytorialnie OSD.

W rezultacie istniejący system sterowania i regulacji pracą jednostki kogeneracyjnej uniemożliwia najbardziej efektywny tryb pracy instalacji badawczej jako mikroinstalacji prosumenckiej zgodnie z ustawą o OZE wraz z „magazynowaniem” przejściowych nadwyżek energii elektrycznej w sieci. Wewnętrznie niespójny system sterowania, składający się z wielu układów i modułów, wymaga stałego nadzoru ze strony operatora, a jednocześnie jego

skomplikowana obsługa nadal powoduje wiele błędów i alarmów. Praktycznie wyklucza autonomiczną pracę agregatu kogeneracyjnego bez stałego nadzoru ze strony użytkownika końcowego, czyli indywidualnego gospodarstwa rolnego. Uniemożliwia zdalny nadzór nad pracą agregatu kogeneracyjnego na biogaz.

W ramach optymalizacji jednostki kogeneracyjnej na biogaz, dokonano gruntownej przebudowy istniejącej jednostki kogeneracji biogazowej. Wykorzystując swoją wiedzę i możliwości przemysłowe, niezbędne do optymalizacji podzespoły wykorzystały firmy Woodward Inc. (CO 80524 Fort Collins, USA), Woodward Poland (32005 Niepołomice, Polska), Karl Dungs GmbH & Co. KG (73660 Urbach, Niemcy) i WOMIX (89200 Szubin, Polska). Firma Woodward Poland (część globalnego koncernu Woodward, Inc.), producent systemów automatyki (m.in. zaawansowanych sterowników, przepustnic z siłownikami elektronicznymi, mieszalników i sterowników silników) dla elektrowni gazowych i agregatów kogeneracyjnych, udostępniła do testów:

- sterownik jednostki easYgen 2500 (z możliwością późniejszej wymiany na bardziej zaawansowany sterownik easYgen 2800, który jest obecnie w fazie certyfikacji) wraz z instalacją i uruchomieniem w biogazowni;
- sterownik silnika gazowego PG+ z wbudowanym modułem SECM70 wraz z kablami, wtyczkami i czujnikami;
- zintegrowana przepustnica serii L z siłownikiem elektronicznym, mieszalnikiem i sterownikiem mieszanki.

Karl Dungs GmbH & Co. KG, producent wysokiej jakości armatury gazowej (w tym filtrów, reduktorów, regulatorów ciśnienia zerowego i zintegrowanych zaworów elektromagnetycznych z układami kontroli szczelności), udostępnił do testów:

- Filtr biogazu GF 510/1;
- Podwójny zawór elektromagnetyczny DMV-D 507/11 12VDC (w tym dwa kołnierze przyłączeniowe i wtyczka elektryczna);
- Regulator ciśnienia zerowego FRNG 508.

WOMIX to polski producent i dystrybutor energooszczędnej armatury grzewczej do centralnego ogrzewania i ciepłej wody użytkowej (w tym zaworów mieszających z siłownikami, kompletnych systemów grup pompowych i automatyki instalacji grzewczych).

Udostępnił do testów:

- Wymiennik ciepła płytowy SWEP B12MTx70;
- Izolacja termiczna wymiennika ciepła płytowego SWEP EPP/HVAC.

Poprawa funkcjonalności eksploatacyjnej w wyniku optymalizacji jednostki kogeneracyjnej na biogaz eliminuje istotne ograniczenia techniczne i trudności w eksploatacji instalacji badawczej przez indywidualne gospodarstwo rolne oraz poprawia jej efektywność energetyczną [Raport, 2019b]. Automatyczna synchronizacja jednostki kogeneracyjnej (Rys. 20) z siecią publiczną i praca z mikroinstalacją prosumencką zgodnie z ustawą o OZE świadczy o „maga-zynowaniu” chwilowych nadwyżek energii elektrycznej w sieci. Przed optymalizacją układ sterowania jednostki kogeneracyjnej umożliwiał jedynie jej pracę w trybie wyspowym na wydzielonej sieci energetycznej biogazowni o zmiennej prędkości obrotowej (czyli częstotliwości wytwarzanej energii elektrycznej) i ewentualnej synchronizacji z siecią publiczną za pomocą kłopotliwego przemiennika częstotliwości. Ponadto taki tryb współpracy z siecią nie jest dopuszczalny przez IRiESD krajowego OSD dla odbiorców z mikroinstalacjami wytwarzającymi energię elektryczną, w tym ENEA Operator, który odpowiada za odbiorców w Ocieszynie.



Rys. 20. Agregat kogeneracyjny po optymalizacji - widok szafy sterowniczej (od lewej) i chłodnicy agregatu (od prawej) (fot. Grzegorz Wałowski).

Optymalizacja agregatu kogeneracyjnego biogazowego z wykorzystaniem zaawansowanego sterownika Woodward serii easYgen 2500/easYgen 2800 oraz przepustnicy zintegrowanej

z siłownikiem elektronicznym i mieszalnikiem oraz regulacji składu mieszanki gazowo-powietrznej (również udostępnionej do testów przez Woodward Poland) pozwala na stabilną pracę agregatu kogeneracyjnego po zmianie zawartości CH_4 w biogazie produkowanym w zbiorniku fermentacyjnym. Zaawansowany sterownik Woodward serii easYgen 2500/easYgen 2800 z przepustnicą zintegrowaną z siłownikiem elektronicznym i mieszalnikiem oraz regulacją składu mieszanki gazowo-powietrznej po dodatkowym zastosowaniu sterownika pracy silnika gazowego z wbudowanym modułem Woodward PG+ (również udostępnionym do testów przez Woodward Poland) pracujący w obiegu zamkniętym zapewnia autonomiczną regulację składu mieszanki gazowo-powietrznej i ciągłość pracy agregatu kogeneracyjnego, niezależnie od wahań zawartości CH_4 w biogazie produkowanym w zbiorniku fermentacyjnym, bez konieczności dokonywania jakichkolwiek zmian ustawień przez użytkownika.

4.5.2. Model inwestycyjny biogazowni rolniczej

Omówiono przykładowe rozwiązania, pozwalające czytelnikowi zapoznać się z różnymi metodami i propozycjami dotychczas szacowanych inwestycji (**O2**), lecz nie zawsze można je zastosować dla gospodarstw indywidualnych. Luka badawcza polegająca na braku uniwersalnego lub elastycznego zastosowania modelu inwestycyjnego – stwarza niedobór dla potencjalnych inwestorów w biogazowni rolnicze. Również stanowi to pewnego rodzaju zniechęcenie w rozwój indywidualnych energii odnawialnych.

Modele biznesowe polegające na sprzedaży oczyszczonego biogazu tj. biometanu do sieci nie są jeszcze sprawdzone w Polsce i wystarczająco rozpowszechnione za granicą, aby można było zaproponować rozwiązania i koszty referencyjne dla krajowych inwestorów. Jednak wraz z przewidywanym rozwojem regulacji pierwsze tego typu, komercyjne projekty pojawią się także w Polsce. Budowa instalacji do uszlachetniania biogazu do parametrów gazu ziemnego wiąże się ze znacznymi nakładami. Całkowita wysokość nakładów inwestycyjnych oraz rocznych kosztów operacyjnych zależy przede wszystkim od wielkości instalacji i rodzaju zastosowanej technologii.

Brak wsparcia technologicznego ze strony wiodących ośrodków naukowych w Polsce pogłębia przepaść w tym obszarze. Największą rolę odgrywa kapitałochłonność. Wysokie nakłady finansowe połączone z długim okresem zwrotu mogą ulec zmianie tylko wtedy, gdy w Polsce prowadzona będzie na większą skalę produkcja poszczególnych komponentów do budowy biogazowni. W dłuższej perspektywie nie są także zdefiniowane korzyści, jakie może osiągać przyszły inwestor - zwłaszcza indywidualne gospodarstwo rolne. Konieczne jest

podejmowanie kolejnych prób i wypracowywania w praktyce modeli inwestycyjnych, które określą sprawne funkcjonowanie gospodarstw rolnych wykorzystujących energię odnawialną dla tak innowacyjnych rozwiązań, jak biogazownie rolnicze.

Przykładowy koszt budowy biogazowni rolniczej o mocy 1 MW wynosi ok. (2,6÷3,3) mln EUR [Kowalczyk-Juško, 2013]. Przyjmuje się, że możliwy okres eksploatacji biogazowni wynosi 20 lat. Przyjęto stałą stopę dyskontową na poziomie 7%. Ryzyko finansowe dla producenta biogazu wynika ze zmienności cen energii i świadectw pochodzenia. Podstawowe wskaźniki oceny ekonomicznej inwestycji: NPV i IRR ściśle zależą od ceny świadectw pochodzenia energii. Jeśli $NPV \geq 0$, to inwestycja jest akceptowana, a jeśli $NPV < 0$, to inwestycja nie powinna być realizowana. Według obecnych obliczeń cena świadectw pochodzenia na poziomie ok. 46,36 EUR/MWh jest wartością graniczną, poniżej której NPV ma wartość ujemną, co świadczy o nieopłacalności inwestycji. IRR jest również przydatny do oceny opłacalności inwestycji. Gdy jej wartość jest równa lub wyższa od tzw. „stopy kapitalizacji”, np. realnego kredytu oprocentowanego, inwestycję można uznać za opłacalną. IRR dla 1 MW biogazowni przy cenie świadectw pochodzenia 46,36 EUR/MWh spada poniżej 5%, więc trudno oczekiwać opłacalności takiej inwestycji przy obecnych stawkach kredytów komercyjnych. Poprawę stóp ekonomicznych zapewni uzyskanie kredytu preferencyjnego lub dopłat do inwestycji.

Na stopy ekonomiczne biogazowni istotny wpływ ma koszt zakupu substratów. Przy obecnych cenach sprzedaży energii i świadectw pochodzenia cena kiszonki wynosi ok. 18,76 EUR/Mg. Zakup substratu po wyższej cenie sprawia, że produkcja energii z biogazu przestaje być opłacalna. Dlatego wskazane jest poszukiwanie substratów odpadowych o jak najniższym koszcie. Z punktu widzenia rolników jako dostawców substratów istnieje ryzyko, że umowa zostanie sporządzona w sposób nieprawidłowy, zbyt ogólny, a także może zależeć od sytuacji samej biogazowni. Dlatego bardzo ważne jest, aby umowa została sporządzona w sposób satysfakcjonujący obie strony i aby rolnik dokładnie wiedział, za jaką biomasę, ile i w jakiej formie otrzyma wynagrodzenie [Kowalczyk-Juško, 2013].

Na podstawie powyższych metod możliwe jest również zidentyfikowanie potencjalnych ryzyk i prognozowanie ewentualnych trudności na podstawie opracowanego modelu finansowego inwestycji biogazowych.

Model finansowy opracowano w celu wsparcia procesu decyzyjnego dotyczącego budowy biogazowni. Biorąc pod uwagę parametry oceny jej efektywności, przyjęto założenie, że inwestycja będzie realizowana, jeśli wystąpią określone zdarzenia ekonomiczne. Badana

inwestycja jest całkowicie nową działalnością, nie jest związana z żadnym przedsięwzięciem. Do budowy biogazowni i dalszej eksploatacji zostanie powołana spółka celowa.

Powyższe przykłady oceny opłacalności inwestycji w budowę i eksploatację biogazowni rolniczych w Polsce opracowano na podstawie analizy literatury i zebranych danych literaturowych, co umożliwiło ocenę i analizę w aspekcie ekonomicznym.

Średni koszt budowy biogazowni w Polsce, liczony na 1,0 MW, wynosi około (3,3÷3,5) mln EUR/MW. Model finansowy, opracowany na podstawie wyliczeń i dostępnych materiałów, zakłada, że koszt budowy biogazowni od zakupu gruntu do uruchomienia wyniesie 3,5 mln EUR [Przesmycka i Podstawka, 2016].

Analiza opłacalności inwestycji - jednym z najważniejszych działań przed podjęciem decyzji o inwestycji w biogazownię jest analiza wszystkich obszarów modelu, ze szczególnym uwzględnieniem pożądaných stóp, które są wielowymiarowym odzwierciedleniem planowanej inwestycji. Dzięki temu rachunek inwestycyjny jest dodatni od 2018 roku. Przepływy pieniężne są dodatnie w każdym okresie, co pozwala na przeprowadzenie inwestycji.

Bez warunku dyskontowania przepływów pieniężnych zwrot z inwestycji uzyskuje się po 33 kwartałach, tj. w 9. roku eksploatacji biogazowni. Po uwzględnieniu dyskontowania przepływów pieniężnych zwrot z inwestycji następuje rok później, tj. w 10. roku eksploatacji biogazowni. W pierwszym roku eksploatacji stopa zwrotu z biogazowni wyniesie 4,1%. Należy to rozpatrywać pozytywnie, ponieważ w pierwszych okresach inwestycje nie są zbyt często rentowne i stają się rentowne dopiero po (2÷3) okresach. Biorąc pod uwagę amortyzację, stopa zwrotu wynosi 13,07%, co jest bardzo dobrym wynikiem. Zarówno IRR, jak i PI świadczą o opłacalności inwestycji i są wyższe od kosztu kapitału, co prowadzi do wniosku, że inwestycja ta jest opłacalna w długim okresie. Co istotne, zwrot z inwestycji można spodziewać się w ciągu 3 lat. W przypadku projektów o dużych nakładach inwestycyjnych w stosunku do rocznych przychodów bardzo często stwierdza się, że zwrot z inwestycji powinien nastąpić przed końcem 10. roku eksploatacji inwestycji przy pełnej wydajności i w analizowanym przypadku warunek ten jest spełniony. Tak więc przyjęty model, pokazuje opłacalność biogazowni w analizowanej konfiguracji [Przesmycka i Podstawka, 2016].

Podstawowe zyski ekonomiczne dla inwestorów biogazowni w Polsce pochodzą z przychodów ze sprzedaży produktów powstających w trakcie eksploatacji biogazowni: wytworzonej energii elektrycznej i uzyskanych świadectw pochodzenia, uzyskanego

nadmiaru ciepła technologicznego, pulpy pofermentacyjnej w postaci nawozów oraz opłat za utylizację odpadów szkodliwych i organicznych [Igliński i in., 2012].

Według Iglińskiego i zespołu [Igliński i in., 2012] przychód biogazowni o mocy 1 MW_e i 1 MW_t zależy od tego, co zostało wykorzystane jako główny substrat (gnojowica, odpady poubojowe, kiszonka z kukurydzy, organiczne odpady komunalne). Ilość biogazu produkowanego w tej konkretnej biogazowni wynosi około $3,7 \text{ mln m}^3/\text{rok}$. Przyjmując, że sprawność produkcji energii elektrycznej wynosi 40%, a ciepła 45%, a 10% wytworzonej energii elektrycznej i 25% ciepła jest wykorzystywane na własne potrzeby, ilość sprzedanej energii elektrycznej wynosi $7,5 \text{ GWh}/\text{rok}$, a ciepła na poziomie $7 \text{ GWh}/\text{rok}$. Zakładano, że gnojowica i odpady organiczne komunalne będą dostarczane bezpłatnie, utylizacja 1 Mg odpadów poubojowych przyniesie $26,49 \text{ EUR}/\text{Mg}$, koszt zakupu (i składowania) kiszonki kukurydzianej wyniesie $28,7 \text{ EUR}/\text{Mg}$. Oszacowano, że roczny koszt eksploatacji biogazowni wyniesie $0,88 \text{ mln EUR}$.

Analizując dane [Walla i in.Schneeberger, 2008] można stwierdzić, że wykorzystanie odpadów zwierzęcych lub roślinnych generuje zysk w wysokości $(0,66 \div 0,88) \text{ mln EUR}$, podczas gdy wykorzystanie wyłącznie kukurydzy kupionej po cenie komercyjnej prowadzi do straty. Sprzedaż „kolorowych” certyfikatów przynosi $0,75 \text{ mln EUR}$ przychodu, bez czego biogazownia wykorzystująca wyłącznie odpady poubojowe po prostu by zbankrutowała. Z drugiej strony należy pamiętać, że zarówno gnojowica, jak i odpady poubojowe wymagają utylizacji, co jest dość kosztowne dla gospodarstw rolnych i rzeźni. Wprowadzenie nawet niewielkich opłat za utylizację gnojowicy i frakcji organicznej odpadów komunalnych znacznie poprawiłoby sytuację ekonomiczną biogazowni.

Koszt zakupu i magazynowania kiszonki kukurydzianej stanowi znaczną część wydatków biogazowni. Koszty eksploatacji (bez amortyzacji) opisywanej biogazowni wynoszą ok. $0,88 \text{ mln EUR}$. Oznacza to, że rolnicza biogazownia zlokalizowana obok bezpiecznego źródła substratu przynosi zwrot z inwestycji po kilku latach (wartość bieżąca netto NPV jest równa 40).

Sposób podziału poszczególnych rodzajów nakładów inwestycyjnych według ich składowych zależy od struktury procesowej konkretnej biogazowni. Można jednak zidentyfikować pewne istotne i powtarzalne rodzaje nakładów inwestycyjnych. Wydaje się, że we wszystkich analizowanych biogazowniach występują dwa podstawowe elementy: budowa zbiorników fermentacyjnych i zakup jednostek kogeneracyjnych. W ujęciu procentowym składniki te stanowią ok. 20% nakładów inwestycyjnych. Istotną rolę w kosztach odgrywa również budowa innych zbiorników (innych niż fermentatory) i oczyszczalni gazów oraz zakup

technologii [Walla i in.Schneeberger, 2008]. Nakłady inwestycyjne potrzebne do budowy biogazowni o mocy 1 MW_{el} i 1 MW_t wynoszą około $(2,64 \div 2,86)$ mln EUR [Walczak, 2010]. Przy szacowaniu zysków ekonomicznych należy pamiętać o innych, trudniejszych do zmierzenia, niematerialnych korzyściach. Lokalizacja biogazowni w pobliżu potencjalnych odbiorców zmniejsza straty sieciowe przesyłanej energii. Ponadto tworzenie rozproszonych źródeł energii usuwa potrzebę rozbudowy sieci transportowych i dystrybucyjnych. Lokalna społeczność może korzystać ze szkodliwych odpadów, powstają nowe miejsca pracy, a gmina i gmina uzyskują dochody z opodatkowania działalności gospodarczej i mogą korzystać z tańszej energii (zwłaszcza ciepła) z niezależnego źródła [Kosewska i Kamiński, 2008].

Analiza wrażliwości projektu jest rozwinięciem tradycyjnego modelu zdyskontowanych przepływów pieniężnych. Analiza ilustruje wpływ zmiany pojedynczej zmiennej bazowej na daną inwestycję. Analiza ta pokazuje zmianę wartości inwestycji w wyniku zmiany parametrów ryzyka modelu. Inwestycja w biogazownię również została poddana analizie wrażliwości. Zweryfikowano, jak zmienią się jej kluczowe parametry w wyniku zmiany wartości. Przedstawiono wrażliwość projektu, najpierw zilustrowano wpływ na model braku dotacji i konieczności zapłaty 1,1 mln EUR kredytem komercyjnym. Pokazano, jak na wskaźniki wpłynie brak uzyskania dotacji i konieczność dodatkowego finansowania zewnętrznego w formie kredytu komercyjnego. Druga modyfikacja modelu zakładała wzrost kosztów pozyskania całego kapitału obcego do 8%. Trzecia i czwarta modyfikacja dotyczą eksploatacji biogazowni po jej uruchomieniu. Dane te pokazują, jak na wynik inwestycyjny wpłynie spadek przychodów o 20% przy niezmiennych kosztach i wzrost kosztów o 20% przy niezmiennych przychodach. Na podstawie wyników można stwierdzić, że zarówno brak dotacji, jak i spadek przychodów o 20%, czyli w całym okresie 10 lat, czynią inwestycję nieopłacalną. Z drugiej strony, wraz ze wzrostem kosztów operacyjnych i finansowych, rentowność maleje, a okres zwrotu wydłuża się. Inwestycja jest jednak nadal w pewnym stopniu opłacalna, choć przy wzroście kosztów o 20% osiąga już dolną granicę [Przesmycka i Podstawka, 2016].

Jednak finanse to nie jedyne ryzyko, które należy wziąć pod uwagę przy analizie opłacalności inwestycji w biogazownię. W tej dziedzinie bardzo istotną rolę odgrywają czynniki społeczne. W praktyce w ostatnich latach każda budowa biogazowni w Polsce napotykała na znaczny opór społeczny. Mieszkańcy okolicznych terenów obawiają się, że nowe inwestycje doprowadzą do degradacji środowiska. Ponadto obawiają się, że eksploatacja takich obiektów w ich okolicy niekorzystnie wpłynie na ich komfort życia. Ponadto OZE to obszar w dużej mierze zależny od decyzji politycznych. Ponieważ Unia Europejska (UE) udziela dużego

wsparcia dla działań w tym obszarze ze środków UE, może się wydawać, że inwestycje te będą jeszcze bardziej dotowane, a więc wzrośnie ich efektywność ekonomiczna [Przesmycka i Podstawka, 2016].

Inną kwestią są ceny świadectw pochodzenia i ich obrót na giełdzie towarowej. Po fali dobrych cen, rynek ten załamał się od 2012 r. Koszt wytworzenia 1 MWh z OZE jest znacznie wyższy niż koszt wytworzenia 1 MWh w sposób tradycyjny. Operatorzy nie oferują zbyt korzystnych cen. Jeśli nałożymy na to niskie ceny certyfikatów, bilans kończy się wynikiem ujemnym, co pokazuje analiza wrażliwości.

W związku z tym inwestycja w biogazownię należy do grupy inwestycji wysokiego ryzyka. Jest to widoczne w wielu obszarach. Oprócz parametrów finansowych inwestorzy muszą dokładnie przeanalizować ryzyka związane z wpływem inwestycji na środowisko i lokalną społeczność. Są to dwa obszary, których nie da się w żaden sposób sparametryzować i mogą, ale nie muszą, istotnie wpłynąć na powodzenie całej inwestycji [Przesmycka i Podstawka, 2016].

Analiza przepływów pieniężnych z inwestycji - ostatnim obszarem analizowanym w ramach oceny wykonalności inwestycji w biogazownię będzie ocena jej wykonalności finansowej. Modele zakładają, że inwestor będzie dysponował środkami finansowymi na sfinansowanie inwestycji. Znaczna ich część będzie pochodzić ze źródeł zewnętrznych, tj. kredytów komercyjnych, kredytów miękkich i dotacji. Udział własny w tym modelu przyjęto na poziomie 10% kosztów inwestycji. Zobowiązania będą spłacane instytucjom finansującym projekt od pierwszego roku funkcjonowania biogazowni, tj. 2018 r. Aby spłacić takie zobowiązania, konieczne jest uruchomienie biogazowni, aby mogła ona generować przychody niezbędne do spłaty kwot, które będą stopniowo wymagalne.

Analizując prognozowane przepływy pieniężne i wynik finansowy można zauważyć, że przez cały okres funkcjonowania biogazowni - od 2018 r. - wynik finansowy będzie dodatni. Ponadto nie wystąpią problemy z płynnością finansową. Przepływy pieniężne są zawsze dodatnie i w żadnym wypadku nie zbliżają się do zera. Dlatego też pod względem wykonalności model nie zakłada żadnych trudności. Ponadto niewielkie wahania w każdym z analizowanych parametrów nie powinny mieć negatywnego wpływu na wynik całego projektu [Przesmycka i Podstawka, 2016].

W literaturze zagranicznej można zauważyć opracowany probabilistyczny wskaźnik ryzyka [Benjamin i in., 2015]. Przedstawiono studium przypadku parku bioenergetycznego, aby zademonstrować obliczenie wskaźnika ryzyka wielozakłóceniewego. Parki bioenergetyczne to zintegrowane systemy energetyczne opracowane w oparciu o synergię

materiałową i energetyczną między zakładami bioenergetycznymi i pomocniczymi w celu zwiększenia wydajności i zmniejszenia emisji CO₂. Jednak wynikająca z tego duża współzależność między jednostkami składowymi powoduje podatność sieci na zakłócenia w przepustowości (tj. niesprawność zakładu). Niesprawność jednego lub większej liczby zakładów w parku bioenergetycznym powoduje odchylenie od początkowej konfiguracji sieci z powodu rozprzestrzeniania się awarii. Konsekwencje takich zakłóceń zależą od tego, które jednostki składowe spowodowały awarię. Opracowano probabilistyczny wskaźnik ryzyka wielozakłóceniewego, aby zmierzyć zmianę netto produkcji parku bioenergetycznego w oparciu o egzogenicznie zdefiniowane scenariusze zakłóceń zakładu, których prawdopodobieństwa są szacowane przy użyciu procesu hierarchii analitycznej (AHP). Ten wskaźnik sieciowy jest ważnym miernikiem odporności systemu na szereg scenariuszy zaburzeń probabilistycznych. Takie informacje oparte na ryzyku mogą być wykorzystane do opracowania środków zarządzania ryzykiem w celu zmniejszenia podatności sieci na zagrożenia poprzez zwiększenie redundancji i różnorodności systemu.

Innym przykładem możliwego ryzyka dla opłacalności ekonomicznej produkcji biogazu jest „chorwacki syndrom” [Pukšec i Duić, 2012]. Obecny obiecujący wzrost inwestycji w rolnictwo w Chorwacji nie tylko prowadzi do wdrażania nowych technologii i procedur, ale także prowadzi do wzrostu świadomości społecznej na temat nowoczesnej produkcji rolnej. Odnawialne źródła energii są efektem ubocznym, ze szczególnym uwzględnieniem biogazu. Ze względu na ten efekt kwestia całkowitego potencjału biogazu dla sektora rolniczego w Chorwacji staje się bardzo ważna. Jedną z największych przeszkód w wykorzystaniu biogazu w chorwackich gospodarstwach jest jego geograficzne przemieszczenie i niewielkie rozmiary. Jednym z największych zagrożeń w wykorzystaniu biogazu w Chorwacji jest stosunkowo niewielki rozmiar gospodarstw, które nie są w stanie zapewnić ekonomicznie opłacalnej produkcji biogazu. Dlatego też miejskie biogazownie odegrają ważną rolę w zwiększeniu wykorzystania biogazu w chorwackim rolnictwie. Opracowana metodologia stanowi podstawę regionalnej analizy potencjału biogazu w sektorze rolniczym w Chorwacji. Wartość potencjału biogazu rolniczego w Chorwacji jest istotna, ponieważ gospodarstwa rolne zużywają dużą ilość energii w swojej codziennej działalności, a część tego zużycia energii można zrekompensować odnawialnymi źródłami energii, takimi jak biogaz.

Rozważania przedstawiają model inwestycyjny (**O2**) dla biogazowni rolniczej, zawierając:

- 1) opracowanie struktury kategorii inwestycyjnych dla biogazowni;

- 2) zależności wskaźników wpływu ceny sprzedaży świadectw pochodzenia na NPV i IRR przy stałej cenie sprzedaży energii elektrycznej do sieci oraz wpływ ceny zakupu substratu na NPV i IRR;
- 3) opracowany model biznesowy dla biogazowni w oparciu o opłacalność inwestycji;
- 4) interpretację wyniku finansowego i przepływów pieniężnych;
- 5) przedstawione koszty, zyski i oszczędności inwestycji biogazowych dla wskaźników ekonomicznych i wariantów infrastruktury energetycznej biogazowni.

Wykazano, że na polskim rynku wciąż brakuje kompletnej i sprawdzonej oferty technologicznej mikrobiogazowni, w tym w szczególności najprostszych w budowie małych biogazowni kontenerowych. Dlatego istnieje potrzeba opracowania uproszczonego „modelu biznesowego” biogazowni rolniczych dla gospodarstw indywidualnych.

4.5.3. Substraty stosowane do produkcji biogazu

Dokonano przeglądu obecnego stanu technologii stosowanych w produkcji biogazu na wybranych europejskich przykładach (O4) pod względem wydajności fermentacji metanowej i rzeczywistej produkcji energii. Przeprowadzono ocenę polskiego rolnictwa energetycznego nieżywnościowego w kontekście perspektyw odnawialnego źródła energii, jakim jest biomasa (O5).

Bez wątplenia liderem pod względem produkcji biogazu i liczby biogazowni w Europie są Niemcy, które do 2020 r. miały już ponad 10.000 działających biogazowni. Niemcy produkowały 52.158 GWh energii rocznie, a w 2018 r. prawie 13% energii odnawialnej pochodziło z biogazu i było wykorzystywane głównie do produkcji energii elektrycznej i ciepła. Niemiecki model opiera się na kiszonce kukurydzianej jako głównym substracie do produkcji biogazu. Istnieje znaczny potencjał wykorzystania małych instalacji biogazowych, zasilanych głównie obornikiem, ale mimo to większy potencjał elektryczny wykazują instalacje wykorzystujące, jako substrat rośliny energetyczne [Liebetau i in., 2021].

Ponad 600 biogazowni rolniczych działa w Wielkiej Brytanii – 381 szt., Szwajcarii – 111 szt. i Francji – 108 szt. [Théobald, 2021; Lukehurst i Banks, 2021; Baier, 2019]. Większość biogazowni znajduje się w sektorze rolniczym, ale w porównaniu z tymi w innych sektorach są one znacznie mniejsze pod względem wydajności. Ten sektor odniósł największy sukces w rozwoju przemysłu. W Wielkiej Brytanii większość substratów wykorzystywanych w biogazowniach to ścieki, osady ściekowe i odpady komunalne, ze względu na przepisy, zgodnie z którymi nie więcej niż 50% wykorzystywanego surowca mogą stanowić uprawy

energetyczne. Istnieją również znaczne ograniczenia dotyczące rodzaju zakładu, który może być wykorzystywany do produkcji biogazu i miejsca jego wytwarzania [Théobald, 2021]. W Szwajcarii substraty są podobne i chociaż liczba działających zakładów jest podobna, zgłoszona produkcja energii była prawie 3 razy niższa [Baier, 2019] w porównaniu z energią wytwarzaną we Francji. We Francji od kilku lat widoczny jest silny rozwój gospodarstw rolnych i scentralizowanych biogazowni, których celem jest odzyskiwanie biogazu w celu produkcji energii elektrycznej do samoobsługi. Na przykład w 2017 r. 113 z 240 składowisk odpadów wykorzystywało biogaz. Stwierdzono, że około 47% odzyskanej energii zostało przekształcone w energię elektryczną, 43% w ciepło, a prawie 10% w biometan. Surowcami wykorzystywanymi do produkcji biogazu we Francji są pozostałości z oczyszczalni ścieków, bioodpady, odpady rolnicze i przemysłowe oraz składowiska odpadów [Théobald, 2021].

W Austrii – 287 szt. i Szwecji – 44 szt., w 2020 r. działały rolnicze instalacje biogazowe [Bochmann, 2021; Ammenberg i in., 2021]. Podczas gdy w Austrii większość wykorzystywanego surowca składa się z obornika i odpadów organicznych, w Szwecji nacisk kładzie się na wykorzystanie osadów ściekowych, które stanowią prawie 50% wykorzystywanego substratu. Ponadto wykorzystuje się bioodpady, odpady rolnicze i przemysłowe oraz składowiska odpadów [Ammenberg i in., 2021]. Porównując ilość wytwarzanej rocznie energii, wydajność produkcji w Szwecji była 3,4 razy wyższa niż w Austrii. Przepisy austriackie wymagają, aby co najmniej 30% substratu wykorzystywanego do produkcji biogazu stanowił obornik, aby otrzymać taryfę gwarantowaną. Jeśli wykorzystywane są odpady organiczne, taryfa może zostać obniżona o 20% [Bochmann, 2021]. W 2018 r. w Holandii zgłoszono 250 biogazowni. Chociaż liczba ta pozostała niemal taka sama do 2019 r. (252), efektywność energetyczna tej instalacji była naprawdę imponująca. Spośród 95 instalacji współsubstratów zarejestrowanych w raporcie z dn. 2018 r. roczna produkcja energii wyniosła 3720,83 GWh/rok [Dumont i Siemers, 2021], co jest wartością zbliżoną do wyniku osiągniętego przez ponad 600 biogazowni we Francji. Większość holenderskich fermentatorów wykorzystuje lokalne odpady rolnicze i zwierzęce jako surowiec do produkcji biogazu. Wiele obiektów jest technologicznie przystosowanych do przetwarzania biogazu na biometan, który może być stosowany jako substytut gazu ziemnego i może być bezpośrednio wtryskiwany do sieci gazu ziemnego. W Danii liczba biogazowni (która w 2020 r. wynosiła 166) jest o ponad 100 mniejsza niż w Szwecji i Austrii, ilość wytworzonej energii jest bardzo porównywalna z wartością osiągniętą przez jej skandynawskiego sąsiada i znacznie wyższa niż w Austrii. Istnieje silna inicjatywa w celu pełnego wykorzystania fermentatu z upraw rolnych, który jest następnie wykorzystywany

jako nawóz do upraw. Dania jest również ograniczona do wykorzystania nie więcej niż 12% upraw energetycznych do produkcji biogazu jako surowca AD do 2020 r. Nowe rozporządzenie miało na celu dalsze obniżenie tego limitu [Al Saedi i Lorenzen, 2021].

W Polsce w 2021 r. działało 128 zakładów biogazu rolniczego [Banasik i in. 2022; PIBNASC, 2022; OGI, 2021], co stanowi znaczny wzrost w porównaniu z 2014 r., kiedy działało 45 zakładów. W 2021 r. wyprodukowano 342,9 m³ biogazu rolniczego, co przełożyło się na 732,6 GWh energii [PIBNASC, 2022]. Surowcem wykorzystywanym do produkcji są głównie odpady rolnicze, obornik i uprawy energetyczne. W ostatnich latach obserwuje się stały wzrost zużycia surowców odpadowych wykorzystywanych do produkcji biogazu rolniczego. Udział substratów takich jak kiszonka z kukurydzy, zboża czy owoce i warzywa wykorzystywanych w polskich biogazowniach w 2019 r. wyniósł zaledwie 10,6%, co jest najniższym wynikiem od początku rozwoju biogazowni w tym kraju. Z kolei w 2021 r. największy udział wśród substratów dla rolnictwa miały: wywar gorzelniany 18,98%, obornik 16,41%, odpady z przemysłu rolno-spożywczego 16,61% oraz pozostałości z przetwórstwa owoców i warzyw 16,20%.

Najmniej biogazowni znajduje się w Norwegii. W tym skandynawskim kraju w 2020 r. działało 46 biogazowni, z czego 6 to instalacje rolnicze, 13 zmodernizowanych do produkcji gazu transportowego, a 2 podłączone do lokalnej sieci gazowej. Około 40% wydobywanego gazu jest wykorzystywane do celów transportowych, a całkowita produkcja w 2019 r. wyniosła 922 GWh. Dominującym substratem wykorzystywanym do eksploatacji biogazowni w Norwegii są osady ściekowe i odpady żywnościowe [Lying, 2021].

Rozwój przemysłu biogazowego w Europie jest oczywisty, chociaż dynamika różni się w zależności od kraju. Przedstawiono różne modele, które opierają się na różnych rodzajach surowców wykorzystywanych do produkcji biogazu i proporcji substratów wykorzystywanych w współfermentatorach. Oczywiście Niemcy są niekwestionowanym pionierem w tym odnawialnym źródle energii – 8400 sztuk biogazowni rolniczych. Niemniej jednak wysiłki na rzecz poprawy samowystarczalności energetycznej i wpływu na środowisko odzwierciedlają się w rosnącej liczbie działających biogazowni w innych krajach europejskich, co daje nadzieję na szybki postęp w kierunku całkowitego zniesienia konwencjonalnej eksploatacji paliw kopalnych.

Liczba biogazowni we Włoszech wynosi – 1.391 szt., dzięki czemu rynek biogazu rozwinął się poprzez stworzenie korzystnego systemu wsparcia finansowego w postaci dopłat do sprzedanej energii z biogazu [Gostomczyk, 2017].

Rozwój sektora biogazowni rolniczych, który w kluczowy sposób determinuje decyzje inwestorów o wejściu na ten rynek - ustanowiono stały system cen gwarantowanych (np. w Niemczech lub Austrii), który był podstawą skutecznego wejścia instytucji finansowych w projekty biogazowe. Z kolei tam, gdzie obserwuje się znaczący wzrost udziału biogazu w strukturze paliw transportowych, tj. we Włoszech lub Szwecji, zdecydowano się na ustanowienie specjalnej ścieżki pomocy w postaci dopłat do produkcji. Dzięki temu taka działalność ma stabilne podstawy ekonomiczne, co zmniejsza ryzyko wahań cen obserwowanych np. w sektorze biokomponentów [BKB, 2022].

Choć w ostatnich latach technologia biogazowa zwiększyła liczbę działających w Europie biogazowni rolniczych i komunalnych - warto zaznaczyć, że dane na ten temat nie są łatwo dostępne. Przedstawiono porównanie z odniesieniem do analizy przeprowadzonej na podstawie dostępnej literatury na temat stanu technologii w poszczególnych krajach europejskich.

Bezpieczeństwo energetyczne, rozwój gospodarczy i ochrona Ziemi są liderami krajowej polityki energetycznej każdego kraju w nowoczesnej Europie. Biogaz może być rozwiązaniem dla wymagań i oczekiwań odnawialnych źródeł energii. To czyste i dostępne źródło energii może pomóc w zmniejszeniu śladu węglowego, zarządzaniu odpadami organicznymi i produkcji energii elektrycznej, ciepła, a nawet transportu. Oszacowano, że wykorzystanie ulepszonego biogazu do transportu (90% zawartości CH₄ w biogazie) pozwala na znaczną redukcję emisji gazów cieplarnianych. Ponadto, fermentat uzyskany podczas produkcji biogazu jest dodatkową korzyścią i może być używany jako nawóz i zwracany do gleby. Przekształcanie odpadów w energię poprzez produkcję biogazu jest nie tylko realną opcją o ogromnym potencjale zmniejszenia lub nawet wyeliminowania zależności od paliw kopalnych, ale także zrównoważonym i wydajnym sposobem na produkcję zdecentralizowanej energii o mniejszym śladzie węglowym.

Europa była i jest jednym z największych promotorów praktyk i rozwoju odnawialnych źródeł energii. Rządy krajów europejskich kwestionowały dotychczas wiele kwestii technicznych, ekonomicznych i politycznych związanych z ich zaangażowaniem w realizację Celów Zrównoważonego Rozwoju ONZ (UN SDGs), które muszą zostać osiągnięte do 2030 r. [UNDP, 2022]. Jeden z tych celów, „Tania i czysta energia”, wymaga szybkiej i bezprecedensowej skali restrukturyzacji systemów energetycznych, nie tylko pod względem technologicznym, ale także ekonomicznym. Zadanie to może okazać się trudne do wykonania, zwłaszcza w krajach rozwijających się. Niemniej jednak obecna pozycja Unii Europejskiej w dziedzinie OZE skutkuje znacznym wzrostem rozwoju sektora biogazu,

widocznym na przestrzeni lat w liczbie biogazowni i sukcesywnym zwiększaniu produkcji energii odnawialnej, w konsekwencji przechodząc na produkcję biowodoru.

Cechą charakterystyczną praktycznie wszystkich podłoży pochodzenia roślinnego jest znaczna zmienność ich właściwości [Kaszkowiak i Kaszkowiak, 2016]. Przede wszystkim zmienna jest zawartość wody, czyli wilgotność. Wynika to zarówno z różnych stadiów dojrzewania, jak i wpływu warunków atmosferycznych.

Materiały pochodzenia roślinnego są materiałami o niskim stopniu zagęszczenia, dlatego wymagają dużej powierzchni (objętości) do przechowywania. Często przechowywanie podłoży wymaga zadaszenia lub zastosowania osłony foliowej. W niektórych przypadkach narażenie na czynniki atmosferyczne poprawia zdolność wiązania i zagęszczania, dlatego wskazane jest przechowywanie tych materiałów bez zabezpieczenia. W wielu przypadkach czynniki atmosferyczne znacząco wpływają na zawartość zanieczyszczeń, zwłaszcza piaskistość. Należy również uwzględnić zmienność składu chemicznego, a tym samym efektywność energetyczną. Przykładem takiego podłoża są uprawy jednoroczne (np. zboża). Szczególnie problematyczna jest niestabilna podaż, spowodowana między innymi niestabilnością upraw. Oprócz zmiennej dostępności, zróżnicowane plony powodują niestabilność cen surowców. Gdy koszty materiałów stanowią znaczącą pozycję w kosztach produkcji, może to powodować zmiany w rentowności.

Zgodnie z propozycją Unii Europejskiej [Grassi i in., 1992] biomasa obejmuje materiały pochodzenia biologicznego (głównie pochodzenia roślinnego), które są produkowane na specjalnych plantacjach lub powstają jako odpady w leśnictwie i przemyśle drzewnym. Historycznie biomasa była wykorzystywana w gospodarce wiejskiej od wieków jako drewno opałowe i odpady organiczne.

Zwykle 2 tony (Mg) suchego drewna lub słomy są energetycznie równoważne 1 Mg węgla, a 1 m³ biogazu jest energetycznie równoważne 1 kg węgla. Polski węgiel ma na ogół parametry 25/22/0,8 (ciepło spalania, 25 MJ·kg⁻¹; 22% popiołu; 0,8% siarki), podczas gdy biomasa roślinna, taka jak drewno lub słoma, ma parametry 13/3/0,03. W suchych osadach ściekowych występują parametry 14/45/0,8, nieco zbliżone do parametrów osadów odpadowych powstających podczas wzbogacania węgla lub parametrów miazgi lignitowego [Kowalik, 2023]. Biomasa może być stosowana jako paliwo bezpośrednie, a w przypadku suchej biomasy jej ciepło spalania wynosi 18 MJ·kg⁻¹. W Polsce promieniowanie słoneczne szacuje się na 3600 MJ·m⁻²·rok⁻¹. W przypadku wydajności fotosyntezy 0,5% — średnia wynosi 1%, a maksymalna 3,2% — daje to energię chemiczną w biomacie wynoszącą 18 MJ·m⁻²·rok⁻¹. Gdy 18 MJ·m⁻²·rok⁻¹ na biomasę podzielimy przez 18 MJ·kg⁻¹, otrzymamy

$1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$. Produkcja biomasy wyniesie wówczas $1 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$, czyli $10.000 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, co jest równe $10 \text{ Mg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{rok}^{-1}$, czyli $1.000 \text{ Mg}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}$. Powierzchnia użytków rolnych w Polsce wynosi 200.000 km^2 , więc produkcja $1.000 \text{ t}\cdot\text{km}^{-2}\cdot\text{rok}^{-1}\cdot 200.000 \text{ km}^2$ jest równa $200 \text{ mln Mg}\cdot\text{rok}^{-1}$, czyli co najmniej $100 \text{ mln Mg}\cdot\text{rok}^{-1}$. Polskie rolnictwo produkuje więc mniej więcej tyle węgla, co polskie górnictwo. Zamiast rolnictwa spożywczego istnieje nowa alternatywa, czyli rolnictwo energetyczne niespożywcze. Metodyka koncentruje się na wykorzystaniu materiałów pochodzenia biologicznego przeznaczonych do spalania, stanowiących potencjalne źródła energii w Polsce, prognozowaniu wykorzystania nośników energii, a także wykazaniu zależności między biomasa a energią odnawialną.

Zaprezentowano prognozowanie pozyskania drewna na cele energetyczne w Lasach Państwowych i lasach prywatnych. Porównano koszty spalania słomy w stosunku do węgla. Porównano również paliwa opałowe. Przedstawiono przykładowe możliwości wykorzystania kukurydzy jako surowca energetycznego, a także skład chemiczny biomasy odmian sorgo do produkcji bioetanolu.

Na podstawie parametrów energetycznych opracowano wykorzystanie nośników energii w wybranych gospodarstwach rolnych na cele grzewcze. Wskazano na przykład zawartość biomasy na ugorach, wartość opałową biomasy i charakterystykę biomasy w odniesieniu do wartości opałowej, wartości energetycznej i produkcji energii netto.

Zaprezentowano pozyskiwanie energii pierwotnej, w tym energii ze źródeł odnawialnych, a także wskazano udział energii ze źródeł odnawialnych w Unii Europejskiej i w Polsce.

W Polsce:

- Interpretuje się powierzchnię użytków rolnych potencjalnie użytecznych pod uprawę roślin energetycznych;
- Wykazuje się związek między zainstalowaną mocą biogazu a ilością energii elektrycznej wytworzonej z biogazu;
- Wykazuje się związek między zainstalowaną mocą pochodzącą z biomasy a ilością energii elektrycznej z niej wytworzonej;
- Wykazuje się związek między powierzchnią użytków rolnych potencjalnie użytecznych pod uprawę roślin energetycznych a regionalnym podejściem do instalacji energii z biogazu i do zainstalowanej mocy z biomasy.

Potencjał biomasy w Polsce - zgodnie z definicją zawartą w ustawie o odnawialnych źródłach energii [Act, 2023] biomasa pochodzenia rolniczego jest biomasa pochodząca z upraw energetycznych, a także odpady lub pozostałości z produkcji rolnej i przetwórstwa przemysłowego. Jednocześnie ustawa definiuje biogaz rolniczy jako gaz uzyskany w procesie

fermentacji metanowej surowców rolnych, produktów ubocznych produkcji rolnej, płynnych lub stałych odchodów zwierzęcych, produktów ubocznych, odpadów lub pozostałości z przetwórstwa produktów rolnych lub biomasy leśnej albo biomasy roślinnej zebranej z terenów innych niż rolne lub leśne, z wyłączeniem biogazu uzyskanego z surowców pochodzących ze składowisk odpadów, a także oczyszczalni ścieków, w tym przydomowych oczyszczalni ścieków z przetwórstwa rolno-spożywczego, w których ścieki przemysłowe nie są oddzielane od innych rodzajów osadów i ścieków. Dlatego też substraty stanowiące podstawę produkcji biogazu rolniczego można podzielić na następujące grupy:

- (A). Nawozy naturalne, w tym obornik i niezmineralizowane guano, klasyfikowane jako materiały kategorii 2 zgodnie z rozporządzeniem UE w sprawie produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego [Regulation, 2023].
- (B). Odpady pochodzenia roślinnego z produkcji rolnej (np. zboża niespełniające norm jakościowych), klasyfikowane zgodnie z katalogiem odpadów [RMC, 2023] jako podgrupa 02 01 odpady z rolnictwa, ogrodnictwa, hydroponiki, leśnictwa, łowiectwa i rybołówstwa.
- (C). Odpady z rzeźni, klasyfikowane jako materiały kategorii 2 i 3 zgodnie z rozporządzeniem UE w sprawie produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego.
- (D). Odpady z przetwórstwa spożywczego, klasyfikowane zgodnie z katalogiem odpadów do następujących podgrup:
 - 02 02 odpady z przygotowywania i przetwarzania produktów spożywczych pochodzenia zwierzęcego;
 - 02 03 odpady z przygotowania i przetwórstwa artykułów spożywczych i używek, odpady pochodzenia roślinnego, w tym odpady owoców, warzyw, produktów zbożowych, olejów jadalnych, kakao, kawy i herbaty, odpady z przygotowania i przetwórstwa tytoniu i drożdży, odpady z produkcji ekstraktów drożdżowych oraz odpady z przygotowania i fermentacji melasy (z wyłączeniem 02 07);
 - 02 04 odpady z przemysłu cukrowniczego;
 - 02 05 odpady z przemysłu mleczarskiego;
 - 02 06 odpady z przemysłu piekarniczego i cukierniczego;
 - 02 07 odpady z produkcji napojów alkoholowych i bezalkoholowych (z wyłączeniem kawy, herbaty i kakao).
- (E). Uprawy przeznaczone do recyklingu organicznego poprzez biogazyfikację.

Doniesienia literaturowe [Gołaszewski, 2011; Jędrejek i Jarosz, 2016; Kwaśny i in., 2012; Wiącek i Tys, 2015] wskazują, że w warunkach polskich najczęściej stosuje się nawozy

naturalne, tj. obornik, gnojowicę, gnojowicę i pomiot kurzy. Najczęściej jednak głównym substratem dla biogazowni jest gnojowica w postaci mieszaniny wody, kału i moczu zwierząt gospodarskich. Gnojowica jest substratem o stosunkowo niskiej wydajności biogazu, ponieważ zawiera dużą ilość wody. Dane w tabeli 2 pokazują, że produkcja biogazu z 1 Mg suchej masy organicznej gnojowicy waha się od 200 do 700 m³, przy czym gnojowica świńska jest bardziej wydajna niż gnojowica bydlęca.

Według Kowalczyk-Juško [Kowalczyk-Juško, 2009] efektywność produkcji biogazu przy wykorzystaniu substratu gnojowicowego można zwiększyć poprzez dodanie współsubstratów, np. kiszonki kukurydzianej, wytlóków owocowych lub obornika. Dywersyfikacja substratów sprzyja uzyskaniu lepszych parametrów produkcji biogazu [Wiśniewski i in., 2008].

Przetworzone substraty w postaci odpadów z ubojni i zakładów mięsnych charakteryzują się wysoką efektywnością produkcji biogazu. Zgodnie z Rozporządzeniem Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 do procesu biogazyfikacji można stosować materiały kategorii 2 i 3 produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego. Jednak przy stosowaniu tego typu substratów konieczne jest spełnienie wymogów dotyczących procesu i monitorowania procesu zgodnie z rozporządzeniem Komisji UE [Commission, 2023]. Przetwarzanie produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego stanowi również gospodarke odpadami w procesie recyklingu, z uwzględnieniem hierarchii postępowania z odpadami. Przykładem jest biogazownia w Sokółce, gdzie surowcem do produkcji biogazu są flotanty z własnych oczyszczalni, pierze i treści żołądkowe charakteryzujące się wysoką wydajnością biometanu [Nikiciuk, 2019].

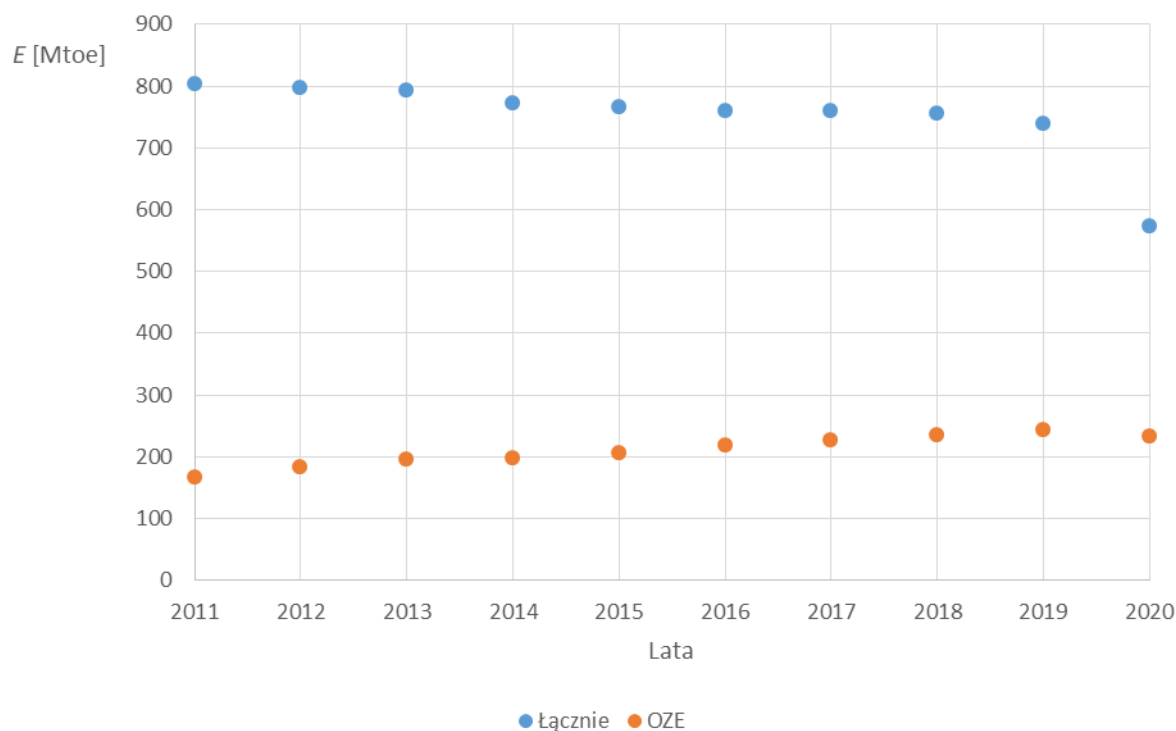
Substraty do produkcji biogazu mogą być również pochodzenia roślinnego, zarówno z upraw niespełniających norm jakościowych dla przemysłu spożywczego, jak i z upraw celowych. Najczęściej wykorzystywanym gatunkiem roślin do produkcji biogazu jest kukurydza [Stańczyk i Ludwik, 2003]. Według Gołaszewskiego [Gołaszewski, 2014] najefektywniejszym substratem w procesie rozkładu beztlenowego poprzez proces biogazyfikacji jest kiszonka z kukurydzy. Kiszonka z kukurydzy zapewnia stabilny skład chemiczny surowca dostarczanego do komory fermentacyjnej, ponieważ polisacharydy ulegają biodegradacji w trakcie procesu kiszenia, a powstały kwas octowy można bezpośrednio wykorzystać do produkcji CH₄. Dlatego do kiszenia wykorzystuje się również inne rośliny, w tym zboża, trawy i lucernę. Dobrym substratem jest również kiszonka z buraków cukrowych [Jasiulewicz i Janiszewska, 2013]. Substratami do produkcji biogazu mogą być również odpady z przetwórstwa spożywczego, w tym wysłodki buraczane, pulpa ziemniaczana i wytloki owocowe (powstające przy produkcji soków i wina); z gorzelnii

i browarów, takie jak wywary gorzelniane; z przemysłu mleczarskiego, takie jak warzenie serwatki i słomy; oraz z produkcji cukru z buraków cukrowych, takie jak wysłodki i melasa [Stańczyk i Ludwik, 2003].

Potencjał substancji organicznych, które ulegną rozkładowi beztlenowemu i produkcji biogazu w warunkach polskich jest wysoki. Zróżnicowany skład chemiczny, a co za tym idzie różna efektywność procesu poszczególnych substratów, powoduje, że dobór substratu, najlepiej kilku substratów, powinien być uwarunkowany potencjalną lokalizacją biogazowni i dostępnością substratów na miejscu. Dobór substratów do procesu z jednej strony powinien gwarantować najwyższą efektywność pozyskiwania biogazu, w tym CH_4 ; z drugiej strony konieczne jest zapewnienie ciągłości dostaw substratów do biogazowni i, jeśli to możliwe, ich stałego składu.

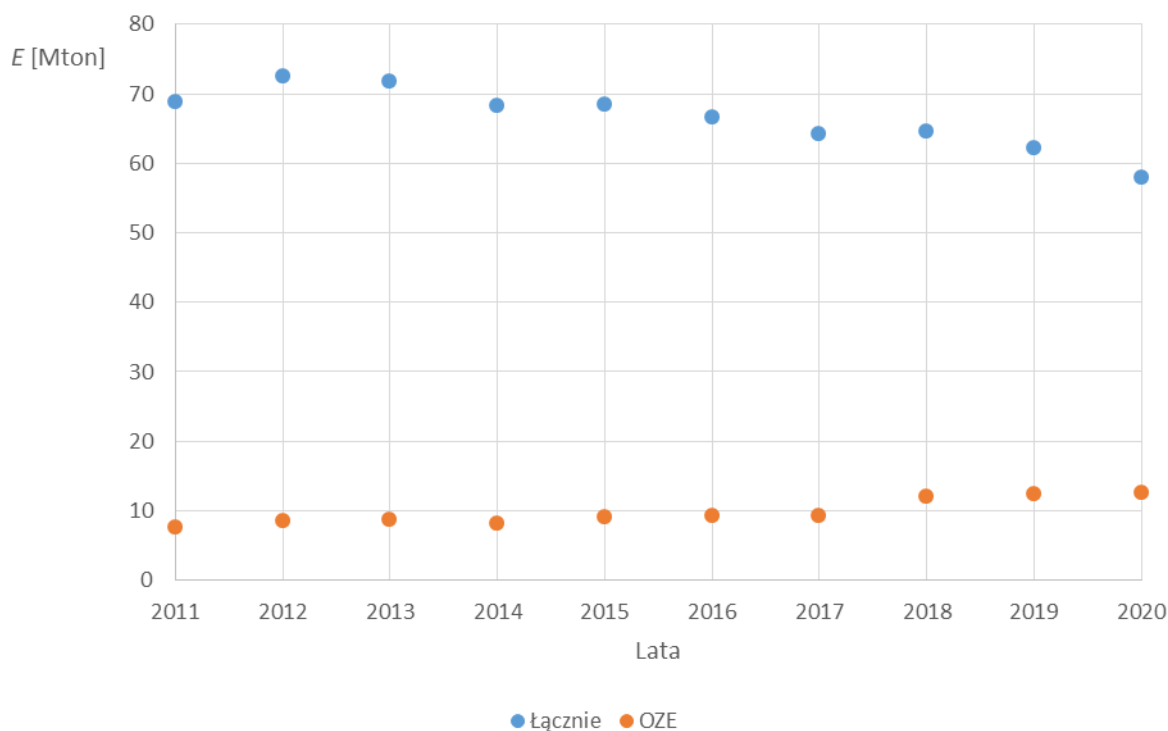
Odnawialne źródła energii stanowią alternatywę dla tradycyjnych, pierwotnych nieodnawialnych nośników energii (paliw kopalnych). Ich zasoby uzupełniają się wzajemnie w procesach naturalnych, co pozwala traktować je praktycznie jako niewyczerpywalne. Ponadto pozyskiwanie energii z tych źródeł jest, w porównaniu do źródeł tradycyjnych (kopalnych), bardziej przyjazne dla środowiska.

Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii znacząco ogranicza szkodliwy wpływ energetyki na środowisko naturalne, głównie poprzez redukcję emisji szkodliwych substancji, zwłaszcza gazów cieplarnianych [Portal, 2023]. W latach 2011–2019 zaobserwowano bardzo łagodny spadek ilości energii produkowanej w UE (Rys. 21), co świadczy o rosnącej efektywności energetycznej (zmniejszeniu energochłonności gospodarki). Niska wartość produkcji energii w 2020 r. na tle wskazanego okresu wiąże się z wyjściem Wielkiej Brytanii z Unii Europejskiej. W tym samym okresie nastąpił powolny wzrost udziału energii wytwarzanej ze źródeł odnawialnych. Ponieważ wartość tego wskaźnika dla 2020 r. nie odbiega znacząco od trendu wieloletniego, można zauważyć stosunkowo niewielki udział wkładu do bilansu energetycznego Unii Europejskiej pochodzącego ze źródeł odnawialnych przetwarzanych w Wielkiej Brytanii.



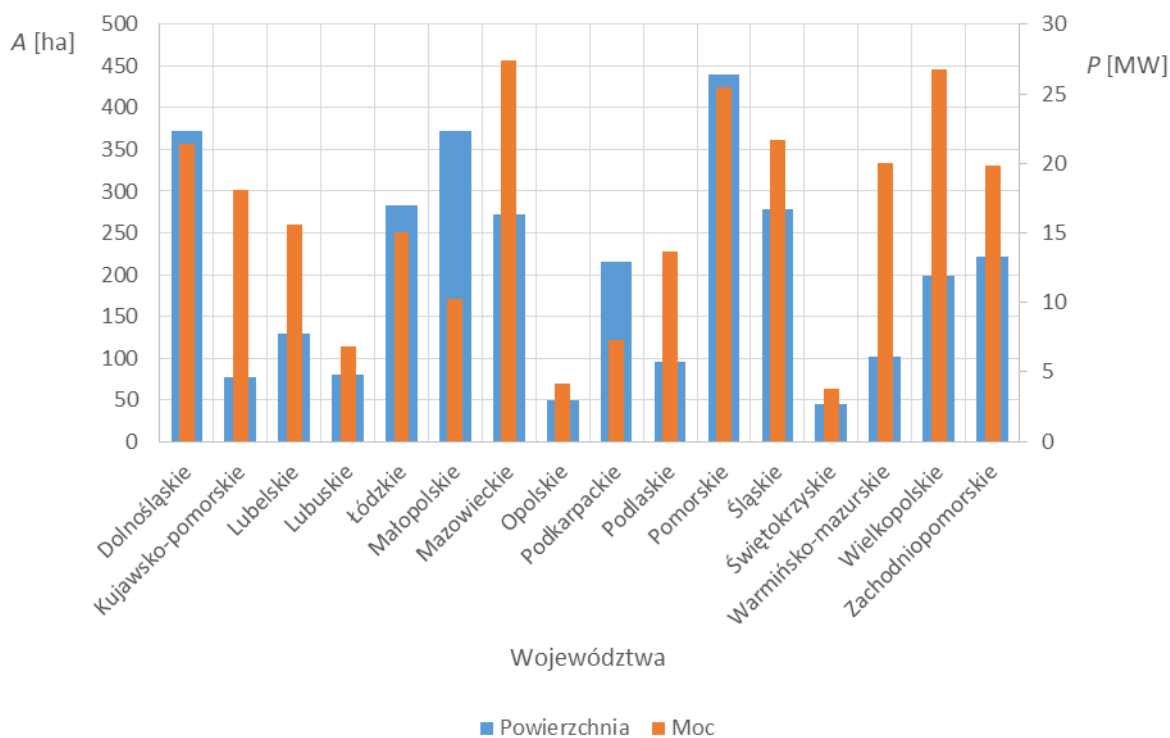
Rys. 21. Pozyskiwanie energii pierwotnej, w tym energii ze źródeł odnawialnych (OZE), w Unii Europejskiej (opracowanie Jakub T. Hołaj-Krzak).

W latach 2011÷2020 można zaobserwować systematyczny spadek (o 14%) ilości energii produkowanej w Polsce (Rys. 22). Było to spowodowane nie tylko modernizacją przemysłu (wdrażaniem energooszczędnych technologii), ale także pogarszającym się stanem krajowej infrastruktury energetycznej. Towarzyszący temu wzrost produkcji „zielonej energii”, choć postępujący, należy uznać za wciąż niewystarczający dla potrzeb gospodarki.



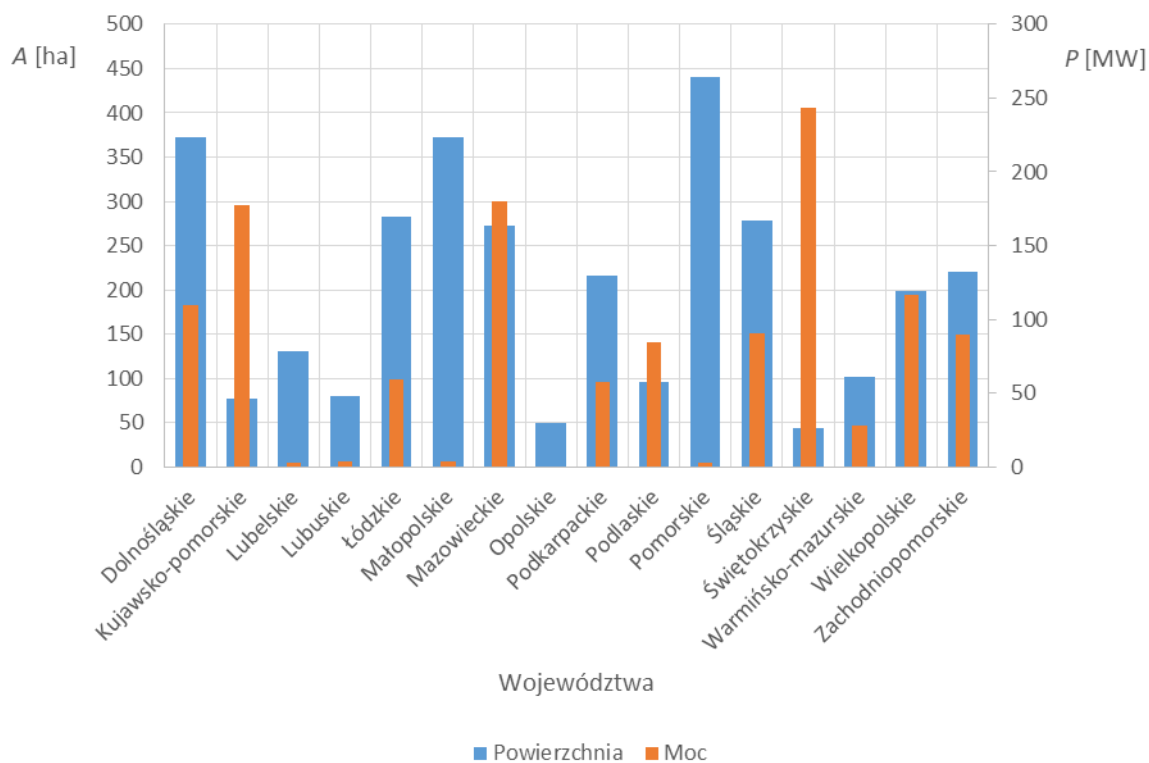
Rys. 22. Pozyskiwanie energii pierwotnej, w tym energii ze źródeł odnawialnych (OZE), w Polsce, (opracowanie Jakub T. Hołaj-Krzak).

Najwyższy wskaźnik ilości (Rys. 23) energii uzyskanej z biogazowni na jednostkę powierzchni występuje w województwach warmińsko-mazurskim, wielkopolskim, zachodniopomorskim i mazowieckim. Niekorzystnie w tej klasyfikacji wypada województwo małopolskie, podkarpackie i w mniejszym stopniu pomorskie. Stan ten można przypisać niekorzystnej topografii (tereny górskie charakteryzują się surowszym klimatem). Przypadek województwa pomorskiego można wyjaśnić intensyfikacją energetyki wiatrowej.



Rys. 23. Zależność powierzchni użytków rolnych potencjalnie przydatnych do uprawy roślin energetycznych (stan na 2021 r.) od regionalnego podejścia do instalacji energii z biogazu w Polsce (opracowanie Jakub T. Hołaj-Krzak).

W skali kraju (Rys. 24) problemem jest nieefektywne wykorzystanie potencjalnie dostępnych gruntów pod uprawę na potrzeby pozyskiwania biomasy.



Rys. 24. Zależność powierzchni użytków rolnych potencjalnie przydatnych do uprawy roślin energetycznych (stan na 2021 r.) od regionalnego podejścia do mocy zainstalowanej z biomasy w Polsce (opracowanie Jakub T. Hołaj-Krzak).

Zależność tę można wyjaśnić konkurencyjną ofertą materiałową rolników na inne potrzeby, co z kolei wynika z przyjęcia niekorzystnego modelu finansowania (dotacje). Najwyższy wskaźnik ilości mocy pozyskiwanej z biomasy na jednostkę powierzchni występuje w regionie świętokrzyskim.

4.5.4. Ocena produkcji biowodoru – rozwój zielonej energii

Przedstawiono aktualny stan technologii produkcji biowodoru (**O7**) — wybrano charakterystyczne przykłady na kontynentach (Ameryka, Afryka, Azja, Australia i Oceania) oraz w Europie (ze szczególnym uwzględnieniem Polski) pod względem efektywności fermentacji ciemnego CH_4 .

Niniejszy przegląd ma na celu opisanie różnych metod produkcji biowodoru. Skupia się na porównaniu ich wydajności pod względem produkcji H_2 i podkreśleniu ich głównych zalet i wad.

Status biowodoru na kontynentach (Ameryka, Afryka, Azja, Australia i Oceania))

Istnieją różne podejścia do tematu produkcji biowodoru w zależności od regionu. Powodem są różnice w liczbie gatunków roślin wykorzystywanych do produkcji biomasy i odpadów komunalnych wytwarzanych w danych warunkach na różnych kontynentach.

Rynek H₂ w Ameryce Północnej osiągnął około 55,6 mln ton w 2022 r. i oczekuje się, że będzie rósł w tempie wynoszącym 3,58% do 2032 r. H₂ znajduje zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, odgrywając kluczową rolę w kształtowaniu przyszłości czystej energii i zrównoważonych praktyk. Jednym z jego głównych zastosowań jest produkcja energii, w której ogniwa paliwowe wodorowe wytwarzają energię elektryczną, wykorzystując parę jako jedyny produkt uboczny, zapewniając czystą i wydajną alternatywę. Dotyczy to również transportu, w którym H₂ napędza pojazdy, a nawet samoloty, co pokazuje jego potencjał do zrewolucjonizowania sektora motoryzacyjnego i lotniczego. W skali przemysłowej H₂ znacząco uczestniczy w procesach takich jak uwodornienie, które jest niezbędne w produkcji chemikaliów, takich jak metanol i amoniak. W przemyśle elektronicznym H₂ odgrywa kluczową rolę w produkcji półprzewodników i procesach redukcji metali [NAHMA, 2015].

W Ameryce Południowej Becerra-Quiroz i in. [Becerra-Quiroz i in., 2024] uznali fermentację ciemną za główną strategię produkcji biowodoru. Ich badania i rozwój technologii koncentrowały się na określeniu parametrów operacyjnych w oparciu o obciążenie materia organiczną i stosunek substratu do inokulum. Wyniki badań odniesiono do masy przewidywanych odpadów komunalnych generowanych przez Bogotę (Kolumbia) w 2042 r. Według autorów możliwe będzie wygenerowanie mocy przekraczającej 2,3 GWh dziennie.

Naukowcy z Brazylii [Albuquerque i in., 2024] zbadali perspektywy produkcji biowodoru z oleju palmowego i produktów ubocznych powstających podczas jego przetwarzania. Szczególną uwagę zwrócono na POME, czyli odpady ściekowe powstające podczas produkcji oleju palmowego. W pracy przeanalizowano różne rodzaje wstępnej obróbki surowca przed fermentacją ciemną i ich wpływ na produkcję biowodoru. Znaczny wzrost produkcji biowodoru zaobserwowano, gdy zastosowano kwaśną i zasadową hydrolizę oraz enzymatyczną obróbkę wstępną. Jednocześnie autorzy zauważają, że niska produkcja wodoru na poziomie 1 do 3 milimoli H₂/mol glukozy może skutkować brakiem wdrożenia przemysłowej ekstrakcji H₂ z POME.

W ostatnich latach zielony wodór wyłonił się jako możliwe rozwiązanie globalnego kryzysu energetycznego. W Ameryce Łacińskiej opublikowanie przez Chile Narodowej Strategii Zielonego H₂ na rok 2020 doprowadziło do przyspieszenia regionalnego zainteresowania przemysłem wodorowym. Podczas gdy nowość branży stwarza szereg wyzwań i niepewności,

oferuje również możliwości innowacji i szansę dla krajów Ameryki Łacińskiej na wykorzystanie branży. Ameryka Łacińska ma duży potencjał w zakresie zielonego H₂, ale realizacja tego potencjału wymaga poruszania się po złożonym rynku, na którym, oprócz wielu wyzwań, podaż i popyt będą musiały ewoluować jednocześnie. Kwestia podaży i popytu znajduje oddźwięk wśród graczy na rynku organicznego H₂. Potencjalni dostawcy nie są pewni rynku zbytu dla swoich produktów, a potencjalni konsumenci nie są pewni dostępności wodoru, który zaspokoi ich potrzeby [HDLA, 2024].

W Chinach technologie produkcji biowodoru badano zarówno pod względem produkcji fotosyntetycznej, jak i procesów fermentacji. W przypadku produkcji biowodoru przez fermentację przeanalizowano rodzaje fermentacji i możliwości ich inżynierskiej kontroli, wykorzystanie czystych bakterii oraz opracowanie dwufazowego procesu beztlenowego do produkcji biowodoru. W latach 2000. powstała pierwsza instalacja pilotażowa produkująca wodór o wydajności przekraczającej 1.200 m³ na dobę, powstał w Harbinie w Chinach [Ren i in., 2005].

Ze względu na dążenie Chin do osiągnięcia szczytu emisji CO₂ i celów neutralności węglowej, zauważalna jest ważna rola biowodoru. W tym celu rozwijany jest chiński krajowy system gospodarki wodorowej. Plan zakłada opracowanie czystego, niskoemisyjnego, bezpiecznego i wydajnego systemu energetycznego opartego na H₂. Przewiduje się również udział biomasy w produkcji biowodoru. Xiangyu Meng i in. [Meng i in., 2022] przewidują, że potencjał biomasy do produkcji energii w Chinach wynosi 2952 · 10⁴ kW. Jednak rola biomasy w produkcji biowodoru w tym rozwiązaniu dotyczy jedynie funkcji paliwa do produkcji energii elektrycznej, która następnie byłaby wykorzystywana do produkcji biowodoru. Według autorów plan rozwoju wodoru powinien opierać się na zasadzie „niebieski wodór przejmuje inicjatywę, zielony wodór dotrzymuje kroku, a szary wodór odchodzi”. Jednocześnie konieczne jest intensywniejsze wykorzystanie biowodoru w sektorze przemysłowym [Meng i in., 2022]. Autorzy pracy [Zhang i Jiang, 2023] wskazują na potrzebę dalszego rozwoju przemysłu i stymulowania przedsiębiorstw oraz instytucji naukowo-badawczych do wspólnego promowania każdego aspektu produkcji, magazynowania i transportu H₂ w łańcuchu przemysłowym oraz koordynacji z procesem budowy nowego systemu energetycznego. Wiąże się to ze zwiększeniem inwestycji w badania i rozwój technologii. Podstawowe badania nad energią wodorową w Chinach są stosunkowo słabe i nieinnowacyjne, a kluczowe technologie i materiały krytyczne pozostają zagrożone. Ważne jest, aby w pełni wykorzystać wiodącą rolę kluczowych gigantów energetycznych, takich jak China Petroleum i China Petrochemical w sektorze energetycznym. Spełnienie tych wymagań

ułatwi z kolei promocję wykorzystania energii wodorowej, w pełni wykorzystując istniejącą infrastrukturę rurociągów i promując poprawę infrastruktury (stacje tankowania H₂). Energia wodorowa powinna odgrywać większą rolę w obszarach głębokiej dekarbonizacji w sektorze przemysłowym, rozproszonego magazynowania energii, lotnictwa i żeglugi, z samolotami i statkami napędzonymi H₂, ponieważ nowy sprzęt do transportu energii stanowi główne możliwości dla Chin pod względem technologii i rynku, a należy podjąć wysiłki w celu realizacji budowy społeczeństwa energii wodorowej. Chiny, największy na świecie producent i konsument H₂, w swoim średnio- i długoterminowym planie rozwoju H₂ na lata 2021÷2035 wskazują na zamiar wyprodukowania 50.000 pojazdów z ogniwami paliwowymi wodorowymi do 2025 r. i zbudowania szeregu stacji tankowania H₂. Plan zakłada, że do 2025 r. produkcja zielonego H₂ przy użyciu odnawialnych zasobów surowców osiągnie 100.000÷200.000 ton rocznie. Oprócz transportu plan przewiduje wykorzystanie czystego H₂ w innych sektorach: magazynowaniu energii, wytwarzaniu energii elektrycznej i przemyśle [Hydrogen, 2024].

24 lutego 2023 r. Rada Ministerialna ds. Energii i Zmian Klimatu (ECMC) zgodziła się dokonać przeglądu Krajowej Strategii H₂ z 2019 r., aby zapewnić, że Australia znajdzie się na drodze do stania się światowym liderem w zakresie H₂ do 2030 r., zarówno pod względem eksportu, jak i dekarbonizacji australijskiego przemysłu. H₂ ma potencjał, aby wnieść znaczący wkład w przejście na zerową emisję netto poprzez wykorzystanie w takich obszarach jak przemysł, transport, wzmocnienie sieci, produkcja chemikaliów i metali. Potencjał inwestycyjny dla H₂ wynosi 300 miliardów dolarów australijskich, przy czym projekty koncentrują się na użytku krajowym, jak również na dużych projektach eksportowych.

Chociaż Australia była trzecim krajem, który opublikował strategię wodorową w 2019 r., możliwości wodorowe wyłoniły się z względnych marginesów, aby wywołać międzynarodowe zainteresowanie, a ponad 30 krajów publikuje obecnie strategię wodorową. Rząd Australii przeprowadza przegląd krajowej strategii wodorowej we współpracy ze stanami i terytoriami [Energy, 2024].

Status biowodoru w Europie

Nawiązując do najnowszego raportu IAE [IEA, 2023] Electricity Market Report 2023, rynek energii elektrycznej przechodzi głęboką transformację. Zgodnie z danymi trendy w spłaszczaniu globalnych emisji CO₂ przecinają się, od 12.306 Mt odnotowanych w 2020 r.

do prognozowanych 13.043 Mt w 2025 r. W Europie oczekiwana redukcja wyniesie 950 Mt w 2020 r. do 763 Mt w 2025 r., co stanowi spadek o prawie 84,5%.

Analizując trendy i prognozy dla Europy — rozumianej jako kraje Unii Europejskiej, Europejskiego Stowarzyszenia Wolnego Handlu (EFTA) i Wielkiej Brytanii — przewiduje się, że liczba planowanych projektów, które mają zostać ukończone do 2030 r., wyniesie 628, przy łącznej szacowanej mocy 138.554 MW. Rok 2030 jest ponownie identyfikowany jako punkt zwrotny w transformacji energetycznej regionu [Hydrogen Strategy, 2024; REPowerEU 2024]. W porównaniu do założeń Clean Hydrogen Monitor opublikowanych w 2020 r. [Pwaelec i in., 2020], tj. 9101 MW, prognozy zostały zrewidowane do 138.554 MW do 2030 r. [Cihlar i in., 2021].

Próbując zbadać problem z perspektywy inwestycji w wytwarzanie energii elektrycznej (lub ogólny potencjał energetyczny) obecnie realizowanych i w przyszłości, możemy wskazać na rosnący trend, ale napotykamy problem z precyzyjnym prognozowaniem skali zjawiska.

Analiza danych liczbowych wskazuje, że do 2050 roku H₂ będzie pozyskiwany wyłącznie metodami ekologicznymi, a metody produkcji H₂ z innych źródeł nie będą rozwijane. Jeśli chodzi o relację opłacalność-efektywność, to obecnie osiągnięta technologicznie wydajność oscyluje średnio w granicach (50÷70)%, przy czym maksymalna wydajność metod ekologicznych jest przewidywana na poziomie około 80%, przy jednoczesnym obniżeniu kosztów na jednostkę mocy.

W Europie istnieją dwie duże organizacje skupiające podmioty zainteresowane zagadnieniami związanymi z H₂. Pierwszą i największą jest Hydrogen Europe, która ma 250 członków, w tym 9 polskich — dla porównania Niemcy mają 37, a Francja 33. Drugą organizacją jest European Clean Hydrogen Alliance, założony przez 30 członków UE, do którego obecnie należą PGNiG, Orlen i Polenergia.

Cele UE określone w planie RePower [Energy Europe, 2024] i strategii wodorowej [Energy Systems, 2024] przewidują krajową produkcję UE wynoszącą 10 Mt odnawialnego H₂ i import takiej samej liczby Mt (z czego 4 Mt będą w postaci amoniaku). Gdyby 10 Mt odnawialnego H₂ miało być produkowane wyłącznie poprzez elektrolizę wody, europejski przemysł wodorowy szacuje, że do 2030 r. potrzebnych byłoby 140 GW zainstalowanej mocy elektrolizy. Europa jest w dużym stopniu uzależniona od importowanych surowców, ale jej globalny udział przetworzonych surowców i komponentów stopniowo rośnie, osiągając znaczną frakcję, gdy weźmie się pod uwagę produkty końcowe. Produkcja elektrolizerów wymaga ponad 40 surowców i 60 przetworzonych materiałów. Głównymi dostawcami surowców do elektrolizerów są Chiny 37%, Republika Południowej Afryki 11% i Rosja 7%,

podczas gdy udział UE wynosi zaledwie 2%. Innymi głównymi postrzeganymi wyzwaniami będą kontraktowanie i zabezpieczanie znacznego popytu na odnawialny wodór oraz zapewnienie odpowiedniej podaży odnawialnej energii elektrycznej, co może być kluczowym wąskim gardłem w osiągnięciu strategicznych celów Europy w zakresie produkcji odnawialnego wodoru.

Status biowodoru w Polsce

Przenosząc te rozważania na sytuację w Polsce, pierwszym faktem wartym odnotowania jest duża koncentracja sektora energetycznego wokół spółek państwowych (PGNiG, Lotos, Orlen) oraz w mniejszym stopniu inicjatyw prywatnych. Inwestycje w energetykę i innowacje wymagają znacznych nakładów finansowych, co wydaje się być istotną przeszkodą dla mniejszych i średnich inicjatyw prywatnych [PEI, 2020]. Zgodnie z wytycznymi sformułowanymi przez Komisję Europejską krajowa produkcja oparta na elektrolizie do 2030 r. wyniesie 40 GW energii [European Commission, 2024]. W 2020 r. polskie władze uznały za stosowne położenie większego nacisku na ten sektor gospodarki [Letter, 2020].

Spośród znaczących podmiotów krajowych mających doświadczenie w technologiach H₂ możemy wyróżnić [PEI, 2020] następujące instytucje wraz z ich obszarami uczestnictwa w tym segmencie:

- Jastrzębska Spółka Węglowa (JSW) – wydzielanie H₂ z gazu koksowniczego;
- Lotos, Polskie Sieci Elektroenergetyczne – Polskie Sieci Elektroenergetyczne (PSE) – wykorzystanie elektrolizerów z energią elektryczną z odnawialnych źródeł energii (OZE);
- Sescom sprzedaż – elektrolizery zasilane PV;
- Grup Azoty – skalowanie własnej produkcji „szarego” H₂ na sprzedaż;
- Polenergia – produkcja i wykorzystanie „zielonego” H₂ – kogeneracja przekonwertowana na spalanie H₂;
- RB Consulting – dystrybucja elektrolizerów;
- Zespół Elektrowni Pątnów Adamów Konin (ZE PAK) – wykorzystanie elektrolizerów z energią elektryczną z biomasy;
- Orlen – wykorzystanie elektrolizerów z energią elektryczną z OZE;
- Tauron Wytwarzanie – produkcja SNG (syntetycznego gazu ziemnego): H₂ z elektrolizy z energią elektryczną z OZE i CO₂ z instalacji emisyjnych;
- Wałbrzyskie Zakłady Koksownicze „Victoria” – separacja H₂ z gazu koksowniczego;
- Stalprodukt — parowy reforming CH₄.

Prace nad wykorzystaniem H_2 jako źródła energii są obecnie najbardziej intensywne w przemyśle motoryzacyjnym. Początkowo koncentrowano się na budowie silników, które spalałyby H_2 , tzn. zastąpiłyby dotychczas stosowane paliwa H_2 .

H_2 jest postrzegany jako paliwo przyszłości. Zainteresowanie H_2 jako źródłem energii gwałtownie wzrosło w ciągu ostatnich dwóch dekad, a głównym powodem tego jest chęć ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Paliwo H_2 jest definiowane jako bezemisyjne, ponieważ podczas spalania praktycznie jedynym produktem ubocznym jest H_2O (para wodna) oraz w śladowych ilościach tlenki azotu, których ilość jest znacznie mniejsza niż w przypadku spalania paliw konwencjonalnych. Dlatego H_2 , ze względu na swoje właściwości chemiczne i fizyczne, może być alternatywą dla paliw kopalnych. W świetle polityki UE i wprowadzanych regulacji prawnych, stopniowa eliminacja paliw wysokoemisyjnych, w tym gazu, będzie kontynuowana i wymuszać wprowadzanie paliw niskoemisyjnych, a docelowo, tam gdzie to możliwe, paliw zeroemisyjnych, takich jak H_2 . Zakładają to strategię rozwoju do 2050 roku, przyjmowane w UE, w tym w Polsce. Europejski Zielony Ład to nowa strategia rozwoju gospodarczego UE. Jej celem jest głęboka proekologiczna przebudowa gospodarki UE, która ma stać się pierwszym obszarem neutralnym klimatycznie w ciągu trzech dekad. Porównując sytuację polskiego środowiska na tle otoczenia europejskiego, należy zwrócić uwagę na wielkość inwestycji w badania i rozwój infrastruktury i produkcji podmiotów komercyjnych i rządowych, a także na wielkość wkładu badań naukowych w ogólny stan wiedzy i know-how, w postaci zgłoszeń patentowych, publikacji, projektów wdrożeniowych, wskaźników cytowań oraz ogólnej ilości informacji udostępnianych publicznie przez podmioty prowadzące działalność badawczo-rozwojową.

Postęp w badaniach i rozwoju pokazuje, że biowodór produkowany z alg może być w przyszłości wykorzystywany jako czysta energia. Z drugiej strony, będzie to wiązało się ze znacznymi komplikacjami ekonomicznymi, nawet przez dziesięciolecia. Przewiduje się, że punkt zwrotny może zostać osiągnięty dzięki testom genetycznym [Bolatkhan i in., 2019].

Procesy fermentacji są bardziej przyjazne dla środowiska, ale charakteryzują się niską wydajnością konwersji światła słonecznego i wydajnością biowodoru. Metody biofotolizy mają również niską wydajność biowodoru (<15%) i stwarzają kilka wyzwań pod względem wrażliwości na tlen i dostępności światła słonecznego. Niemniej jednak bezpośrednia biofotoliza zapewnia wydajność przekraczającą 80%. Stwierdzono, że procesy elektrochemiczne są znacząco energochłonne i wiążą się z wysokimi wymaganiami dotyczącymi ciśnienia, temperatury, mocy i zaawansowanego sprzętu, ale produkują 90% biowodoru. Obecny koszt produkcji biowodoru jest dość wysoki i waha się od 10 do 20 USD

za GJ, w zależności od systemu uprawy mikroalg, konstrukcji reaktora i zastosowanej ścieżki metabolicznej. Aby konkurować z benzyną, koszt ten musi być niższy niż 0,33 USD za GJ. Z drugiej strony większość ocen ekonomicznych jest dość optymistyczna, ale nie bierze pod uwagę ważnych czynników kosztowych, takich jak przechowywanie, obsługa i transport [Ahmed i in., 2021b].

Istniejące technologie oferują potencjał do praktycznych zastosowań, ale jeśli systemy biowodoru mają stać się konkurencyjne komercyjnie, muszą być w stanie syntetyzować H_2 w tempie wystarczającym do zasilania ogniw paliwowych wystarczająco dużych do wykonywania prac praktycznych. Dalsze badania i rozwój są konieczne w celu zwiększenia tempa syntezy i końcowej wydajności H_2 [Levin i in., 2004; Show i in., 2012; Sansaniwal i in., 2017].

Konwersja biomasy to obiecująca technologia, która ma duży potencjał zastąpienia stosowania paliw kopalnych. Omówiono różne parametry, takie jak rodzaj surowca, warunki pracy (ciśnienie i temperatura), czas przebywania, materiał złoża itp., wymagane do produkcji biopaliw przy użyciu syntezy Fischera-Tropscha. Jakość gazu syntezowego z biomasy jest silnie zależna od tych czynników; jednak w niektórych omówionych warunkach zgazowanie biomasy nie może pokonać wysokich kosztów energii, nakładów inwestycyjnych i całkowitych kosztów produktu. Dlatego skalowalność energii z biomasy na duże obszary pozostaje trudnym zadaniem w dziedzinie energii odnawialnej.

Chociaż proste spalanie cząsteczki H_2 wydaje się być idealnym rozwiązaniem wyżej wymienionych problemów, należy zwrócić uwagę na technologię produkcji samego paliwa. Obecnie dominującą metodą jest jego pozyskiwanie ze źródeł kopalnych do celów przemysłowych. Aby sprostać nadziejom pokładanym w H_2 jako „paliwie” i „magazynie”, potrzebne są nowe technologie, w tym odnawialne źródła energii, biotechnologia i rolnictwo. Rozpatrując tę kwestię, niezbędna jest zmiana dotychczasowego modelu podziału technologii produkcji H_2 na podstawie kolorów. Okazuje się, że oprócz skupienia się na surowcu, kluczowe jest szersze, holistyczne podejście do technologii, czyli analiza całkowitych kosztów środowiskowych związanych z produkcją jednej jednostki energii.

Jeśli chodzi o Rzeczpospolitą Polską, środowisko ma inną specyfikę niż partnerzy zachodni. Duże przedsiębiorstwa państwowe są silnym i wpływowym podmiotem dominującym nad środowiskiem. Posiadają szeroko rozumiane zasoby: infrastrukturę, know-how w pokrewnej branży, zasoby ludzkie, finansowanie i patronat ze strony władz publicznych. Ponadto w przestrzeni rynku komercyjnego jest pusta przestrzeń w segmencie tej odwróconej piramidy. Są potencjalne małe inicjatywy prywatne, projekty koncepcyjne, startupy itp. Małe

i średnie podmioty starają się zmniejszyć dystans w wyścigu, organizując większe organizacje, takie jak klastry, stowarzyszenia branżowe i stowarzyszenia. Próbuje zaangażować społeczność naukową, samorząd lokalny i potencjalnie inne podmioty wykazujące dobrą wolę wobec kooperantów (w tym dużych graczy rynkowych).

Istnieje rozbieżność między sektorem badań komercyjnych i naukowych. Sektor badań osiąga produktywność w grantach, publikacjach, patentach itp., podobnie jak kraje sąsiednie. Wydatki na poziomie państwowym nie zajmują czołowego miejsca w stosunku do produktu krajowego brutto. Brak współpracy między stroną naukową i komercyjną prowadzi do dystansowania się obu. Ze względu na słabe finansowanie społeczność naukowa zmierza w kierunku koncepcji, które nie są gotowe do wdrożenia w biznesie. Liczba inicjatyw eksperymentalnych, testowych i półprzemysłowych jest ograniczona. Środowisko biznesowe jest ostrożne w finansowaniu pomysłów eksperymentalnych i dąży do ulepszania już opracowanych metod, takich jak oczyszczanie H_2 uzyskanego ze „starych” ścieżek i inwestowanie w infrastrukturę magazynowania i przesyłu, taką jak idea „Doliny Wodorowej”, a nie innowacji i rewolucji.

4.5.5. Produkcja biometanu w warunkach fotofermentacji - rezultaty z badań

Przedstawiono aktualny stan technologii produkcji biogazu (biometanu) — przykład wykorzystania obornika koziego w kontekście efektywności fotofermentacji. Opracowano mechanizm procesu fotofermentacji obejmującego produkcję biometanu (**O8**).

Przed użyciem danego surowca bada się jego skład, aby określić jego przydatność do produkcji biogazu. Szacuje się również, ile biogazu można z niego wyprodukować. Do najważniejszych parametrów, które należy zbadać, należą zawartość organicznego C i ilość N_2 . Na tej podstawie określa się stosunek C do N_2 .

Do najważniejszych wykonywanych oznaczeń należą [Konkol i in., 2023]:

- 1) Oznaczanie suchej masy i suchej substancji organicznej.
- 2) Oznaczanie całkowitego azotu i NH_3 metodą Kjeldahla.
- 3) Pomiar pH, przewodności i potencjału redoks.
- 4) Analiza elementarna.

Przechowywanie obornika powoduje straty w tonażu z powodu rozkładu materii organicznej w czasie — około (10÷20)% masy przy przechowywaniu przez 1 do 6 miesięcy. Podczas przechowywania obornik kozi traci swoją wartość odżywczą, a utrata składników zależy od czasu przechowywania. Jednocześnie może stanowić zagrożenie dla środowiska. Ilości N, fosforu (P), potasu (K) i siarki (S) w oborniku kozim, w zależności od czasu przechowywania.

Wielkość strat N_2 , oprócz czasu przechowywania, zależy od przebiegu warunków atmosferycznych, a mianowicie opadów i temperatury; straty są większe podczas przechowywania obornika w czasie suchej i ciepłej pogody. Straty te są spowodowane emisją NH_3 do atmosfery i wypłukiwaniem azotanów, co może powodować zanieczyszczenie wód gruntowych i spływ z wodami powierzchniowymi do cieków wodnych. W przypadku fosforu (P) straty te są stosunkowo niewielkie, ponieważ większość P jest chemicznie związana z materią organiczną i nie jest łatwo wypłukiwana. Przechowywanie obornika w warunkach dużej wilgotności powietrza i opadów sprzyja wypłukiwaniu rozpuszczalnego potasu (K) i siarki (S) [WRC, 2010].

Celem badań przedstawionych w pracy jest ocena jakości biogazu produkowanego w warunkach atmosferycznych z obornika koziego umieszczonego w reaktorze (fotofermentatorze). Podjęto próbę ustalenia warunków procesu:

- immobilizacji na złożu obornika koziego (w zależności od zebranego materiału badawczego), co pozwala na wykazanie aktywności flory bakteryjnej fermentacji, a tym samym wpływa na ilość biogazu (biometanu) produkowanego w reaktorze.

Następujące przyjęto kryteria oceny produkcji biogazu (biometanu):

- 1) Czas pobrania materiału badawczego;
- 2) Mineralizacja i skład pierwiastkowy materiałów badawczych;
- 3) Skład procentowy poszczególnych składników biogazu dla danego przepływu biogazu;
- 4) Przebieg zmian poszczególnych składników biogazu w zależności od temperatury i czasu produkcji biogazu.

Obornik kozi pobierano bezpośrednio z miejsca składowania, które znajdowało się na farmie w otwartej przestrzeni, w następujący sposób:

- a) Materiał A przechowywany przez 1 miesiąc (świeży — próbka mokra);
 - b) Materiał B przechowywany przez 12 miesięcy (stary — próbka mokra);
- oraz w przestrzeniach zamkniętych:
- c) Materiał C przechowywany przez 12 miesięcy (stary — próbka sucha).

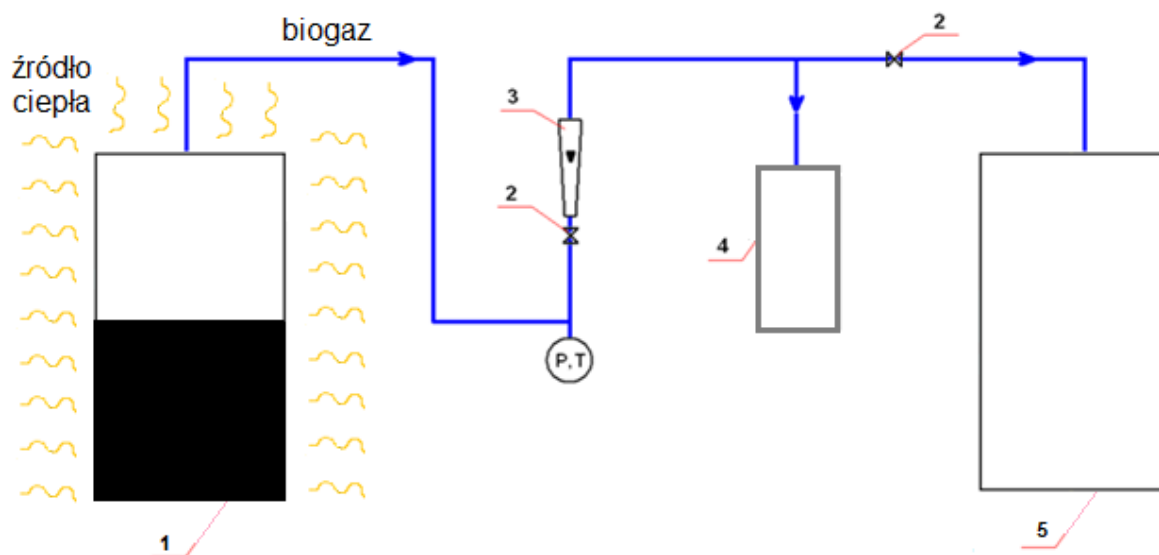
Badania obornika koziego przeprowadzono w oparciu o następujące normy:

- 1) Oznaczanie suchej masy w temperaturze $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ metodą wagową — ISO 11465:1994 [Soil quality, 1994];
- 2) Mineralizacja próbek roślinności i nawozów naturalnych w stężonych kwasach mineralnych na składniki ogólne (makro i mikroelementy) — PB/31/12:2014* [Mineralization, 2014a]; PB/31/14:2014*; [Mineralization, 2014b]; PN-91/R-04014* [Mineralization, 2014c];

- 3) Mineralizacja próbek roślinności i nawozów naturalnych w skoncentrowanych kwasach mineralnych dla azotu — PB/31/09:2014* [Mineralization, 2014d];
- 4) Oznaczanie fosforu i azotu — według metodyki SKALAR [SKALAR, 2024];
- 5) Oznaczanie Na, K, Mg, Ca (ASA) — PN-ISO 9964-1:1994 [Water quality, 1994]; PN-ISO 9964-2/AK:1997 [Water quality, 1997];
- 6) Oznaczanie Fe, Mn, Zn, Cu (ASA) — PN-ISO 8288:2002 [Water quality, 2002].

* procedura badawcza Laboratorium Badawcze Chemii Środowiska.

Stanowisko eksperymentalne - laboratoryjną produkcję biogazu w złożu obornika koziego przedstawiono na schemacie — Rys. 25.



Rys. 25. Stanowisko badawcze do produkcji biometanu w warunkach fotofermentacji na złożu obornika koziego (*oprac. G. Wałowski*): 1—fotofermentator ze złożem obornika koziego (próbka), 2—zawór regulacyjny, 3—rotametr, 4—analizator gazów, 5—zbiornik biogazu, P—manometr, T—termometr.

Sposób badania substratu w warunkach laboratoryjnych do produkcji surowego biometanu charakteryzuje się tym, że w szklanym naczyniu-reaktorze (fotofermentatorze o pojemności 0,00075 m³) znajduje się złożo w postaci obornika koziego o pojemności 0,000375 m³. Po uszczelnieniu fotofermentatora elastyczny kanał przepływowy poprowadzono z fotofermentatora do zamkniętego zbiornika stanowiącego magazyn biogazu.

W ten sposób przygotowano trzy reaktory (fotofermentatory) dla trzech próbek testowych:

- 1) Materiał A;
- 2) Materiał B;

3) Materiał C.

Badania przeprowadzono na stanowisku laboratoryjnym, którego głównym elementem było szklane naczynie (fotofermentator) służące do produkcji biogazu w warunkach atmosferycznych. Fotofermentator pracował w warunkach wymiany ciepła z otoczeniem, a promieniowanie słoneczne powodowało intensywność produkcji ze względu na szklane ściany fotofermentatora. Stanowisko laboratoryjne wyposażone jest w:

- a) Naturalne źródło ciepła (ciepło otoczenia ze Słońca);
- b) Termometr do pomiaru ciepła;
- c) Analizator gazów do sprawdzania składu i parametrów fizycznych naturalnie występujących mieszanin gazowych, ze szczególnym przeznaczeniem do badania biogazu.

Pomiar przeprowadzono przy przepływie biogazu $0,018 \text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$, wskazując % skład poszczególnych składników jako CH_4 , CO_2 , O_2 , H_2 i H_2S w ppm.

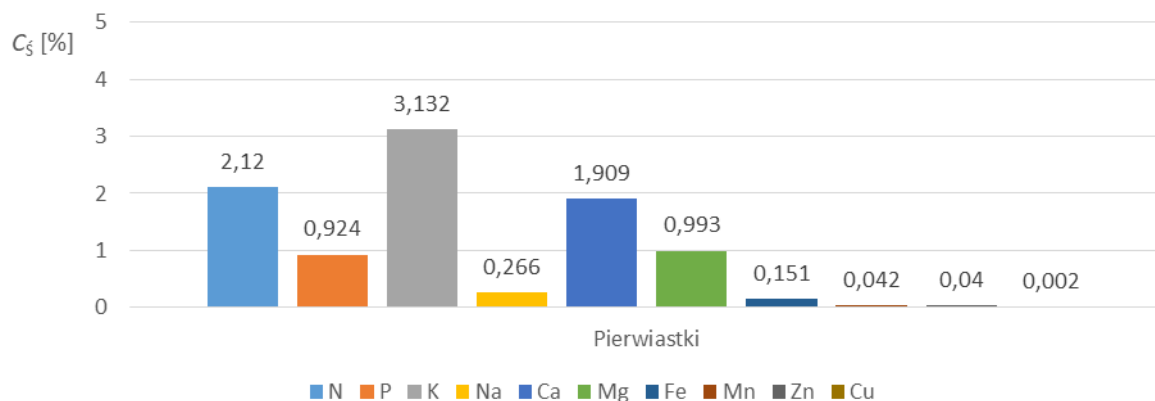
Zakres i metodologia badań – celem pracy jest ocena jakości biogazu produkowanego w warunkach atmosferycznych ze złoża obornika koziego umieszczonego w reaktorze (fotofermentatorze), wskazująca na potencjalne wykorzystanie substratu do produkcji biometanu w ramach odnawialnych źródeł energii.

Przedmiotowa metoda badawcza jest następująca:

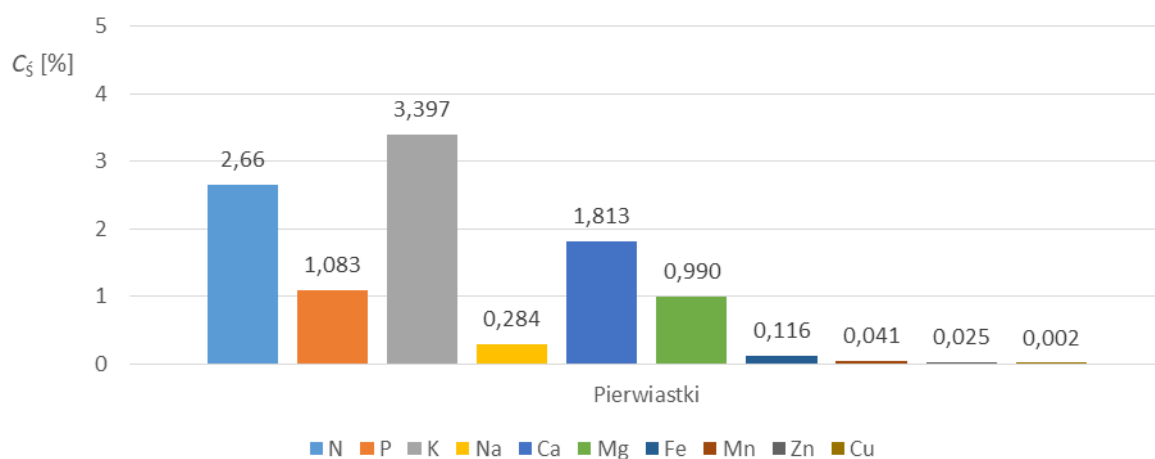
- określenie mineralizacji i składu pierwiastkowego materiałów badawczych;
- ustalenie warunków procesu produkcji biogazu (biometanu) w zależności od przyjętych kryteriów procesowych.

Punktem wyjścia do interpretacji zmienności zawartości pierwiastków (Rys. 26) niemetalu (N, P), metali lekkich (Ca, K, Mg, Na) i metali ciężkich (Cu, Fe, Mn, Zn) jest zjawisko specjacji [Barałkiewicz i Bulska, 2009]. Zależy ono przede wszystkim od warunków przechowywania próbki (wilgotność, środowisko, temperatura), a w drugiej kolejności od jej wieku (podatność na wietrzenie). Przypadek N należy rozpatrywać przede wszystkim w kontekście wpływu wysokiego pH i wieku próbek. Alkalizacja środowiska powoduje wypieranie tego pierwiastka w postaci amoniaku (NH_3). Zawartość wilgoci, w zależności od wieku próbki, wpływa z kolei na ruchliwość stabilnych form N; sole amonowe, NH_4^+ , są na ogół dobrze rozpuszczalne w środowiskach polarnych, co ułatwia ich migrację do odcieku podczas suszenia badanego materiału. Ponadto należy uwzględnić zjawisko rozkładu soli poprzez hydrolizę anionową, co prowadzi również do deprotonacji kationu amonowego.

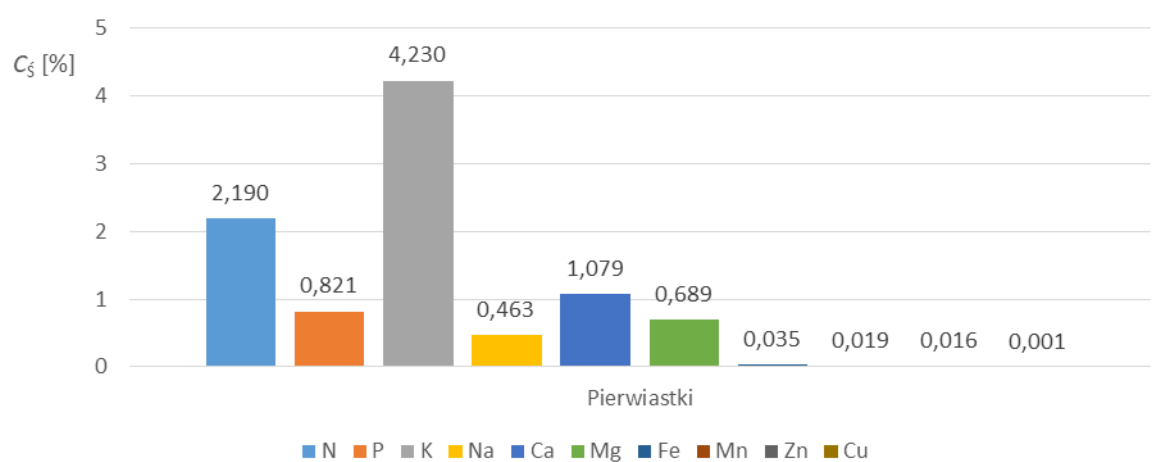
(a)



(b)



(c)



Rys. 26. Skład pierwiastkowy nawozu koziego (opracował J.T. Hołaj-Krzak): (a) materiał A; (b) materiał B; (c) materiał C.

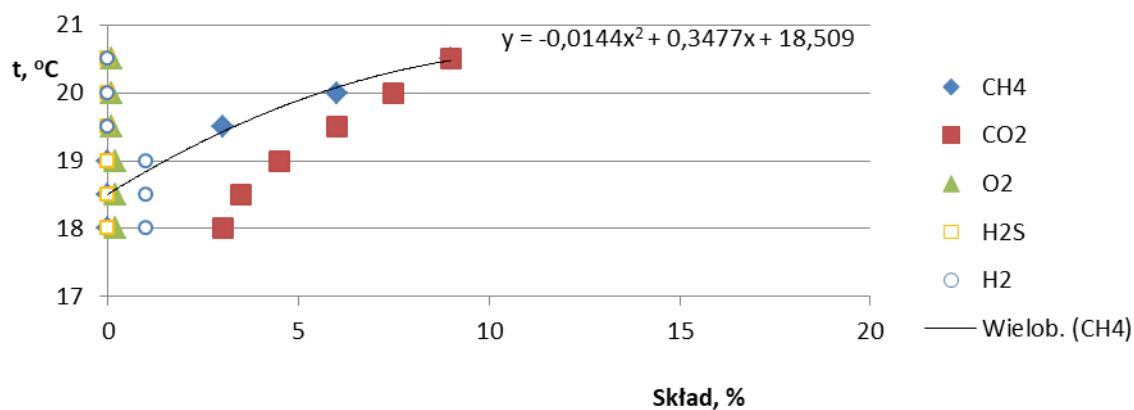
Podobieństwo właściwości chemicznych kationów amonowych i alkalicznych (K^+ , Na^+) pozwala przypuszczać, że wpływ wilgotności i jonowości roztworów (kwestia siły jonowej i efektu solnego determinującego wpływ jonów obcych na rozpuszczalność soli) będzie miał jakościowo podobny efekt.

Zmienność stężeń Ca i Mg w zależności od charakteru próbek należy wiązać przede wszystkim z formą fosforu (różna podatność na rozpuszczanie anionów o różnej liczbie protonów kwasowych).

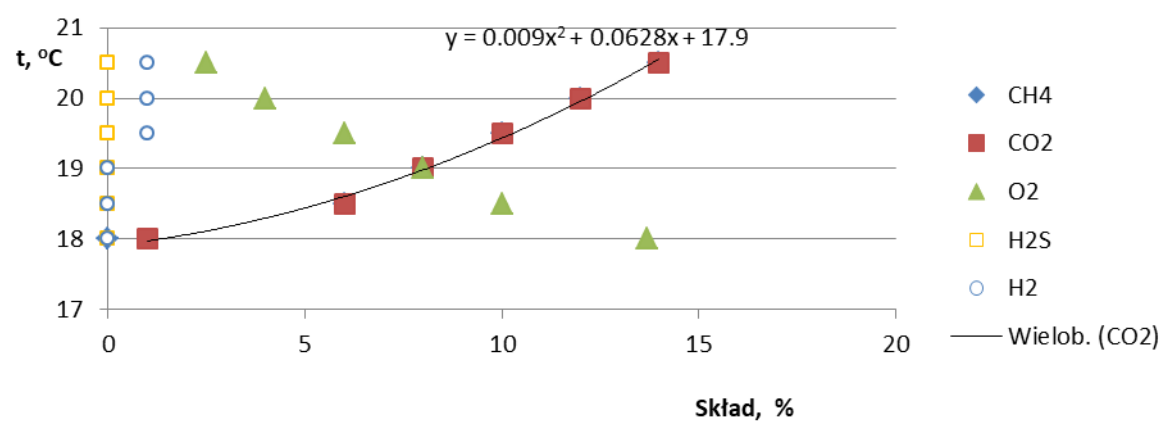
Labilne formy Cu, Fe i Mn to (uwodnione) kationy na stopniu utlenienia II, stabilne w środowisku kwaśnym. Amfoteryczny Zn tworzy również wysoce rozpuszczalne sole kompleksowe (liczba koordynacyjna wynosi 4) z ligandami nieorganicznymi. Osobnym problemem jest obecność substancji organicznych (amin, aminokwasów i związków siarkoorganicznych o charakterze alifatycznym, alicyklicznym, aromatycznym i mieszanym), które mają zdolność tworzenia wiązań koordynacyjnych (chelatowych), szczególnie Cu(II) i Fe(II).

Badania eksperymentalne dotyczyły układu pomiarowego do oceny jakości biogazu (biometanu) w zwartym złożu w warunkach atmosferycznych (mezofilowych — warunki procesu produkcji biogazu). Podstawą oceny produkcji biogazu jest przebieg zmian w zależności od temperatury. Interpretując Rys. 27, wykazano, że przez 6 miesięcy (od grudnia do maja) dla złoża obornika koziego — materiał A, wraz ze wzrostem temperatury z 18,0 °C do 20,5 °C (Rys. 27a) — udział procentowy CH_4 (3÷9)% i CO_2 (3÷9)%. W reaktorze (fotofermentatorze) zaobserwowano klasyczne zjawisko przepuszczalności gazu w zwartym złożu, charakterystyczne dla produkcji biogazu. Podgrzanie powoduje, że mikroorganizmy metanogenne zachowują się odpowiednio do procesu. Istnieje wyraźna tendencja wzrostu produkcji biometanu w warunkach fotofermentacji. Podobna sytuacja jest na Rys. 27b dla osadu obornika koziego — materiał B. Wraz ze wzrostem temperatury z 18,0 °C do 20,5 °C, procent CH_4 (6÷14)% i CO_2 (6÷14)% wzrasta równomiernie. Niewielka różnica to 1,5-krotnie wyższa produkcja % CH_4 i CO_2 , szczególnie w maju (szósty pomiar). Jednak interpretując Rys. 27c, wskazuje on, że przez 6 miesięcy (od grudnia do maja) dla osadu obornika koziego — materiał C — przy wzroście temperatury z 18,0 °C do 20,5 °C, nie było produkcji CH_4 procent wynosi 0. Procent CO_2 zaczyna wzrastać (0,5–1%) dopiero w miesiącach od lutego do maja. Zaobserwowano anomalię w reaktorze (fotofermentatorze) — zjawisko stałego hamowania dla zwartego złoża w kontekście produkcji biogazu. Na tym etapie procesu jest znacznie więcej O_2 (17,6÷18,5)% — w warunkach fotofermentacji zaobserwowano wyraźną tendencję wzrostu zawartości tlenu.

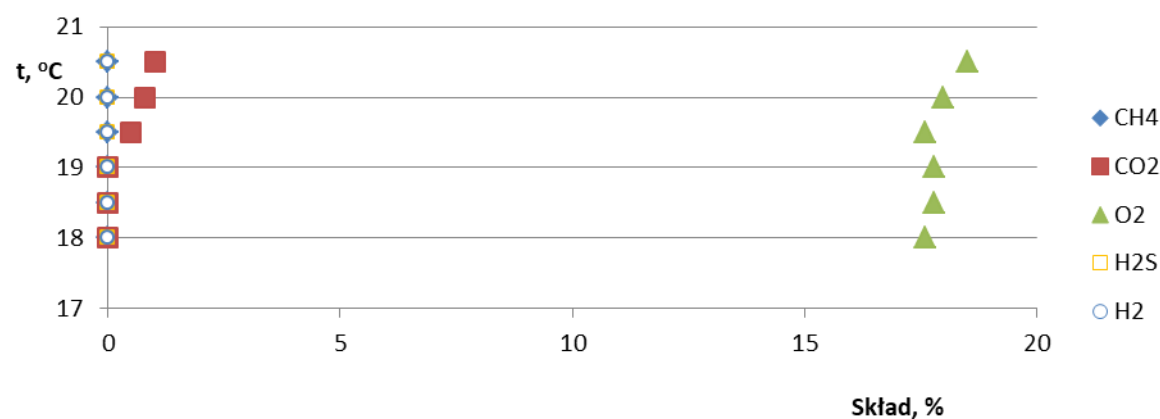
(a)



(b)

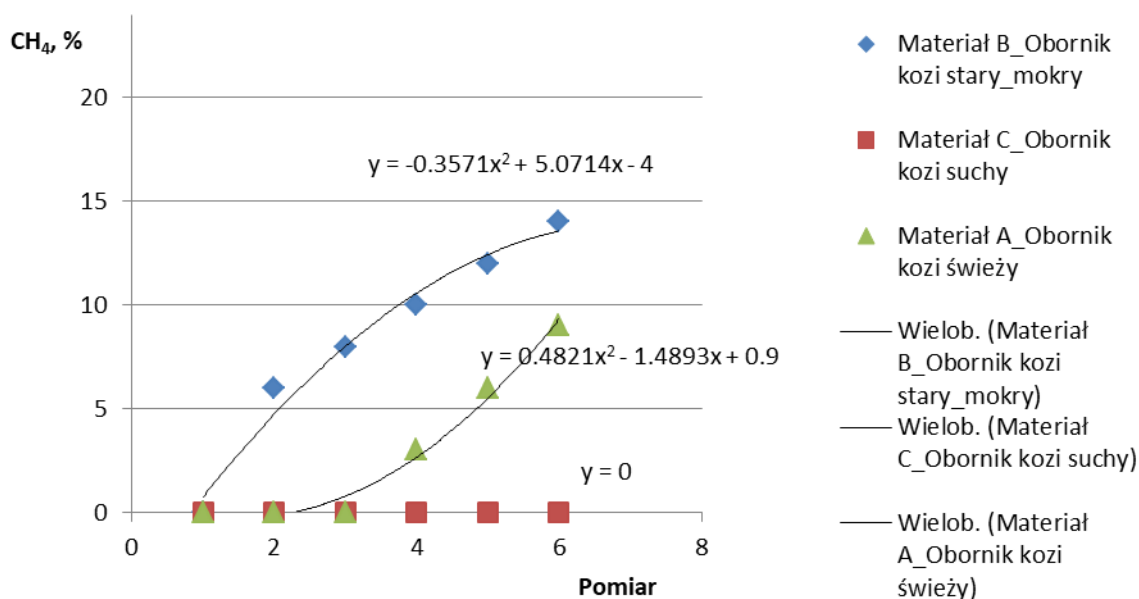


(c)



Rys. 27. Produkcja biogazu (biometanu) w zależności od temperatury dla obornika koziego (opracował G. Wałowski): (a) materiał A; (b) materiał B; (c) materiał C.

Interpretując Rys. 28 wskazano, że przez okres 6 miesięcy (od grudnia do maja), w zależności od złoża i jego stanu ze względu na przepuszczalność gazu, decydujący wpływ ma funkcjonalność mikroorganizmów zawartych w złożu zwartym.



Rys. 28. Produkcja biometanu z obornika koziego dla: materiału A; materiału B; materiału C (opracował G. Wałowski).

W przypadku obornika koziego — materiału A i materiału B — produkcja biometanu zachodzi w większym stopniu niż w materiale C. Na ten stan rzeczy wpływa skład pierwiastkowy złoża zwartego w postaci obornika koziego (Rys. 26). Biorąc pod uwagę zaokrąglone wartości w grupie aktywnej (złoże kompaktowe) dla materiału A i materiału B, należy wskazać, że K 3,4%, Na 0,3%, Ca 1,9% i Mg 1,0% są wartościami niższymi (Rys. 26a-26b) w stosunku do wartości K 4,4%, Na 0,5%, Ca 1,0% i Mg 0,7% w grupie nieaktywnej (złoże kompaktowe), które są wyższe (Rys. 26c) — powodując w ten sposób zahamowanie procesu w warunkach fotofermentacji. Dodatkowo, zaobserwowano inną ciekawostkę naukową, porównując obornik kozi, materiał grupy aktywnej (zwarte złoże) A, należy zauważyć, że K 3,132%, Na 0,266%, Ca 1,909% i Mg 0,993% to niższe wartości (Rys. 26a) w porównaniu do materiału B, przy czym wartości K 3,397%, Na 0,284%, Ca 1,813% i Mg 0,990% są wyższe (Rys. 26b). Jest to niewątpliwie spowodowane obecnością składników odżywczych w złożu, które wspomagają proces produkcji biometanu, Rys. 28. W przypadku grupy aktywnej (zwarte złoże) materiał A wykazuje dynamiczny wzrost produkcji biometanu przy niższych wartościach składników odżywczych. Jednak materiał B, mający wyższy procent składników, wykazuje stabilizację produkcji biometanu po szóstym miesiącu procesu.

4.6. SYNTETYCZNY OPIS PRAC

1) Praca nr O1

W wyniku bezściółkowego systemu hodowli zwierząt w gospodarstwach powstaje gnojowica, która jest cennym źródłem nawozu. Jednak jej nadmierne stosowanie lub niewłaściwe okresy agrotechniczne mogą poważnie zanieczyścić środowisko [Smurzyńska i in., 2016a]. Główne zagrożenia dla środowiska wynikające z hodowli zwierząt na dużą skalę i związanej z nią produkcji gnojowicy są następujące [Kwiecińska, 2016]:

- a) zanieczyszczenie wody - przenawożenie gleby i odpływ z pól do wód gruntowych i powierzchniowych;
- b) eutrofizacja - przenawożenie wód śródlądowych i morskich (zakwity glonów, zmniejszenie bioróżnorodności i modyfikacja ekosystemów wodnych, utrata fauny bentonicznej i brak tlenu);
- c) zanieczyszczenie mikrobiologiczne - zawarte w gnojowicy mikroorganizmy chorobotwórcze stanowią poważne zagrożenie sanitarne (za najbardziej znaczące uważa się *Staphylococcus* sp., paciorkowce kałowe, *Escherichia coli*, rhusiopathia suum, prątki gruźlicy, paciorkowce patogenne, wirus pryszczycy, grzyby i larwy oraz jaja robaków pasożytniczych np. tasiemców);
- d) pośredni i wtórny wpływ na powstawanie kwaśnych deszczów (emisja tlenków azotu i tlenków siarki) oraz wzrost efektu cieplarnianego (emisja gazów cieplarnianych uszkadzających warstwę ozonową) [Baltic Green Belt, 2012].

Przed wszystkim ten ostatni punkt odnosi się do infiltracji azotu do gleb, który w dużych ilościach występuje w gnojowicy. Nadmierna ilość azotu w glebie spływa w postaci azotanów do wód gruntowych i zanieczyszcza je [Burton, 2006; Carpenter i in., 1998]. Dodatkowo wysoki dopływ amoniaku stwarza bezpośrednie ryzyko eutrofizacji wód powierzchniowych na obszarach intensywnej eksploatacji zwierząt [Carpenter i in., 1998; Hao i in., 2005, Mantovi i in., 2006].

Kolejnym zagrożeniem są metale ciężkie, ponieważ jak wykazały badania [Berenguer i in., 2008] w glebach nawożonych gnojowicą mogą występować wysokie stężenia miedzi i cynku. Magazynowanie obornika prowadzi również do emisji gazowych [Bicudo i in., 2002; Smurzyńska i in., 2016b]. Do emitowanych gazów należą m.in. tlenki siarki i azotu, które powodują kwaśne deszcze, smog fotochemiczny i eutrofizację wody [Correll, 1998]. Hodowla zwierząt gospodarskich również generuje emisję gazów cieplarnianych, np. CH₄

powstającego podczas trawienia paszy, zwłaszcza przez przeżuwacze, oraz podczas magazynowania obornika [Martinez i in., 2003]. Innym gazem cieplarnianym o większym wpływie na środowisko ze względu na jego trwałość w atmosferze, która uszkadza warstwę ozonową, jest podtlenek azotu, który uwalnia się głównie podczas stosowania obornika. Inną wadą gnojowicy jest jej wysoka zawartość wody, co powoduje wysokie koszty magazynowania i transportu na pola. Czynniki te ograniczają intensywną produkcję zwierzęcą na rzecz zrównoważonego rolnictwa, które z pewnością nie zastąpi obecnego i prognozowanego popytu na mięso [Adamowicz, 2000].

W celu ochrony środowiska naturalnego proponuje się wiele rozwiązań mających na celu właściwe zagospodarowanie gnojowicy [Smurzyńska i in., 2016c]. Jedną z kluczowych metod zagospodarowania odchodów zwierzęcych jest fermentacja metanowa gnojowicy w biogazowniach rolniczych. Neutralizacja gnojowicy jako substratu poprzez fermentację metanową dodatkowo skutkuje uzyskaniem energii i nawozu o lepszych parametrach w porównaniu do surowej gnojowicy [Boldrin i in., 2016; Kafle i Kim, 2013].

Opisano warunki procesowe produkcji biogazu przy zastosowaniu substratu polidispersyjnego (gnojowica świńska) w publikacji nr **O1**:

Klimek, K.; Kapłan, M.; Syrotyuk, S.; Konieczny, R.; Anders, D.; **Dybek, B.**; Karwacka, A.; Wałowski, G. Production of Agricultural Biogas with the Use of a Hydrodynamic Mixing System of a Polydisperse Substrate in a Reactor with an Adhesive Bed. *Energies* 2021, 14, 3538. <https://doi.org/10.3390/en14123538>

Celem pracy była ocena biogazu rolniczego wytwarzanego w procesie mezofilowej fermentacji metanowej z polidispersyjnego substratu (gnojowicy świńskiej), przy wykorzystaniu złoża adhezyjnego umieszczonego w fermentatorze.

Podjęto próbę określenia warunków hydrodynamicznych dla:

- immobilizacji, która pozwala na zwiększenie powierzchni czynnej dla flory bakterii fermentujących;
- układu mieszania polidispersyjnego substratu, wpływając tym samym na osiągnięcie wysokiej zawartości CH₄ w biogazie i stabilną produkcję ilości biogazu.

Do oceny biogazu rolniczego przyjęto następujące kryteria:

- skład biogazu;
- przebieg zmian średniego dobowego strumienia gazu.

Ilość i skład chemiczny oddzielonego biogazu zależą od składu chemicznego fermentowanych związków, zastosowanej technologii i parametrów procesu [Zamojska-Jaroszewicz i in., 2013]. Fermentacja metanowa, podobnie jak wszystkie procesy biologiczne, jest bardzo wrażliwa na wszelkie zmiany w środowisku. Szybkość i kierunek procesów metabolicznych zachodzących w mikroorganizmach zależą od wielu parametrów: temperatury, ciśnienia parcjalego wodoru, pH, potencjału redoks, czasu retencji hydraulicznej, mieszania, stosunku składników odżywczych (C/N/P), inhibitorów, pierwiastków śladowych, stężenia mikroorganizmów, rodzaju substratu i stopnia jego rozdrobnienia, światła i wielu innych [Deublein i Steinhauser, 2008; Chen i in., 2008]. Głównymi surowcami do produkcji biogazu rolniczego są nawozy naturalne: gnojowica, obornik i gnojowica. Substratami uzupełniającymi mogą być odpady organiczne z przemysłu lub rolnictwa, biomasa leśna lub biomasa z upraw energetycznych [Oniszk-Popławska i in., 2003].

W literaturze istnieje opinia, że wydajność biogazu z gnojowicy jest niska ze względu na niską zawartość suchej masy, w związku z tym, aby zwiększyć wydajność procesu fermentacji, konieczne jest stosowanie dodatkowych substratów. Uważam, że jest to mylące podejście dla przemysłu biogazowego w świetle praktycznych zastosowań gnojowicy świńskiej.

W praktyce rolniczej zdecydowana większość instalacji biogazowych działa w systemie fermentacji mokrej, w którym zawartość suchej masy wynosi (12÷15)% [Głodek i in., 2007]. Jednak w literaturze nie ma danych na temat stosowania wyłącznie polidispersyjnego substratu (gnojowicy świńskiej), którą można łatwo pompować i mieszać w biogazowni. Istnieje bardzo niewiele publikacji na temat stosowania gnojowicy świńskiej, a takie, które wskazują jedynie na laboratoryjne próby uzyskania biogazu, co ma istotne znaczenie dla skali instalacji.

Wielu badaczy przeprowadziło liczne badania w celu optymalizacji wydajności biogazu w procesie fermentacji beztlenowej [Budiyono i in., 2010]. Próbę poprawy wydajności konwersji biomasy i wydajności biogazu podjęło kilku badaczy, w tym:

- Poprzez poprawę kontaktu bakterii z medium poprzez mieszanie [Krylova i in., 1997; Callaghan i in., 1999; Karim i in., 2005];
- Unieruchomienie drobnoustrojów przy użyciu reaktora z membraną stałą [Lo i in., 1984, Vartak i in., 1997] i beztlenowego sekwencjonującego reaktora wsadowego (ASBR) [Ndegwa i in., 2008];

- Poprawa składu substratu poprzez współtrawienie z innymi substratami [Callaghan i in., 1999; Gelegenis i in., 2007; Lehtomaki i in., 2007];

- Kontrola hamowania amoniaku [Nielsen i Angelidaki, 2008].

Ponadto podejmowano wysiłki w celu optymalizacji wydajności biogazu poprzez zastosowanie dwóch reaktorów z ciągłym mieszaniem zbiornikowym (CSTR) połączonych szeregowo [Boe i Angelidaki, 2009; Kaparaju i in., 2009], selektywne zatrzymywanie ciał stałych w reaktorze poprzez utrzymywanie mieszania przed usunięciem ścieków [Kaparaju i in., 2008], wstępną obróbkę obornika poprzez oddzielanie ciał stałych od przefermentowanego materiału w celu poprawy biodegradowalności i dostępności [Liao i in., 1984; Kaparaju i Angelidaki 2008; Møller i in., 2008] oraz poprawę wymagań odżywczych bakterii [Kayhanian i Rich, 1995; Demirci i Demirer, 2004].

W przeciwieństwie do innych badaczy wymienionych wcześniej, podejmowano próby poprawy wydajności CH_4 poprzez zwiększenie zawartości inokulum w biofermenterze [Luengo i Alvarez, 1988; Castillo i in., 1995; Sans i in., 1995; Lopes i in., 2004; Forster-Carneiro, i in. 2008]. Inokulum, ma znaczenie dla tempa produkcji biogazu [Luengo i Alvarez, 1988]:

- ilość wytworzonego CH_4 wydawała się być proporcjonalna dla początkowego obornika bydlęcego jako inokulum [Asam i in., 2011];

- stwierdzono silny wpływ inokulum zwacza bydlęcego na beztlenową biostabilizację fermentowalnej frakcji organicznej stałych odpadów komunalnych [Lopes i in., 2004];

- wyższy procent inokulum skutkował większą produkcją biogazu [Forster-Carneiro, i in. 2008].

W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań eksperymentalnych, które pokazują wyraźny wpływ oporu przepływu w odniesieniu do współczynnika przepuszczalności gazowej złoża. Stwierdzono, że charakterystyczne parametry, takie jak stopień porowatości przepływu gazu i współczynnik przepuszczalności gazowej, determinują skalę przepuszczalności materiału szkieletowego.

W pracy przedstawiono produkcję biogazu w procesie fermentacji z wykorzystaniem gnojowicy świńskiej dla innowacyjnej instalacji.

Wykazano, że:

(1) Zastosowany w fermentatorze układ mieszania zapewnia jednorodność składu masy fermentacyjnej i dostarcza jakościowych składników wspomagających proces fermentacji;

(2) Sposób wykorzystania instalacji znacząco usprawnia proces przetwarzania płynnej biomasy, zwłaszcza gnojowicy świńskiej, na wysokokaloryczny biogaz;

(3) Biogaz można łatwo i niezawodnie produkować w pobliżu budynków inwentarskich.

2) Praca nr O2

W Polsce w latach 60. nastąpił szybki rozwój bezściołowych przemysłowych ferm bydła i trzody chlewnej [Kwiecińska, 2013]. Duże gospodarstwa przemysłowe (wielkoobszarowe) to instalacje wymagające pozwolenia zintegrowanego, a podstawowym kryterium determinującym wielkość gospodarstwa jest ich obsada kadrowa. W przypadku drobiu za duże gospodarstwo przemysłowe uważa się fermę hodowlaną liczącą ponad 40 tys. osobników, a dla świń jest to 2 tys. świni (tuczniaki) o wadze powyżej 30 kg i/lub 750 loch [IPPC, 1996]. W 2008 roku Komisja Helsińska HELCOM [HELCOM, 2020] uznała duże gospodarstwa rolne za punktowe źródła zanieczyszczeń rolniczych. W tym samym czasie za gospodarstwa przemysłowe uznano również hodowle bydła z obsadą odpowiadającą 400 AU (jednostek zwierzęcych). W Polsce zarejestrowano 752 wielkoobszarowe fermi drobiu, 606 ferm i 126 ferm trzody chlewnej [Gungor i Karthikeyan, 2005]. Gospodarstwa typu przemysłowego charakteryzują się dużą koncentracją osobników, jednorodnym żywieniem poszczególnych grup zwierząt, rytmiczną produkcją i równomierną coroczną podażą produktu o jednakowej jakości. Niestety efekty te osiągnięte są kosztem pogorszenia warunków życia zwierząt i zwiększonego zużycia energii. Najbardziej niekorzystny z punktu widzenia ochrony środowiska jest chów w systemie bezściołowym, co wiąże się z powstawaniem ogromnych ilości gnojowicy [Kutera, 1994].

W przypadku opłacalności inwestycji w biogazownię decyduje możliwość sprzedaży lub wykorzystania energii cieplnej pozyskanej z konwersji gnojowicy w instalacjach kogeneracyjnych. Najbardziej zasadne jest promowanie rozwiązań opartych na gospodarstwach indywidualnych, w których rolnicy wykazują chęć i współpracę na rzecz biogazowni o mocy optymalnej 10 kW.

Metody oceny ekonomicznej efektywności inwestycji w biogazownię rolniczą prosumencką zaprezentowano w publikacji nr **O2**:

Klimek, K.; Kapłan, M.; Syrotyuk, S.; Bakach, N.; Kapustin, N.; Konieczny, R.; Dobrzyński, J.; Borek, K.; Anders, D.; **Dybek, B.**; Karwacka, A.; Wałowski, G. Investment Model of Agricultural Biogas Plants for Individual Farms in Poland. *Energies* 2021, 14, 7375. <https://doi.org/10.3390/en14217375>.

Celem pracy była próba opracowania modelu inwestycyjnego biogazowni rolniczej w polskich warunkach dla gospodarstw indywidualnych. W zakresie opracowania ujęto analizę

trzech przykładów (dostępnych w literaturze) inwestycji w budowę i eksploatację biogazowni rolniczych w Polsce w warunkach gospodarstw indywidualnych. Należy podkreślić, że struktura kategorii inwestycji została oparta na biogazowniach o mocy 0,86 MW_e. Opisano zależność stawek z uwzględnieniem wpływu ceny sprzedaży świadectw pochodzenia na NPV i IRR przy stałej cenie sprzedaży energii elektrycznej do sieci oraz wpływ ceny zakupu substratu na NPV i IRR. Przedstawiono model finansowy oparty na obliczeniach własnych i dostępnych materiałach literaturowych - wskazujący na opłacalność biogazowni. Analizując prognozowane przepływy pieniężne oraz wynik finansowy wykazano, że przez cały okres eksploatacji biogazowni - wynik finansowy może być dodatni. Na tej podstawie wskazano poprzez przegląd literatury na potrzebę opracowania modelu inwestycyjnego dla biogazowni, który zakłada: opłacalność inwestycji, ryzyko wrażliwości projektu, przepływ kosztów inwestycji.

Porównując dostępne modele inwestycyjne, na przykład model oceny sukcesu w zarządzaniu projektami, można najwyraźniej zauważyć cechy macierzowe niezbędne do wdrożenia modelu inwestycyjnego. W pracy [Doskočil i in., 2016] przedstawiono ekspercki, rozmyty model oceny powodzenia projektu. Model jest zaimplementowany przy użyciu logiki rozmytej. W pierwszej kolejności wprowadza się podstawowe zasady teoretyczne dotyczące wskaźnika sukcesu projektu, zbiorów rozmytych i logiki rozmytej, a następnie rozmyty model oceny wskaźnika sukcesu projektu, w tym podmodele, w postaci studium przypadku reprezentującego główny cel projektu artykułu. Model rozmyty implementowany jest w środowisku oprogramowania MATLAB za pomocą aplikacji Fuzzy Logic Toolbox, gdzie jest również weryfikowany i dopracowywany. Eksperymentowanie z modelem rozmytym pozwala symulować niepewność, która zawsze występuje w projektach. Studium przypadku zawiera ogólny diagram modelu rozmytego, zmienne wejściowe i wyjściowe wraz z ich atrybutami oraz zasady oceny czterech bloków reguł. Zaproponowany model rozmyty służy do oceny sukcesu projektu przede wszystkim w fazie realizacji, a następnie wielokrotnie po zakończeniu każdej fazy projektu. Daje to kierownikom projektów narzędzie, które pozwala im stosunkowo szybko ocenić powodzenie projektu i w razie potrzeby zastosować odpowiednie środki we właściwym czasie.

Podobnie, analogicznie do hierarchicznego modelu mieszanego z losowym efektem czasu i branży, należy zauważyć, że umożliwia on badanie danych wielopoziomowych, które nie są niezależne [Durana i in., 2021]. Próba obejmuje wskaźniki finansowe ponad 33.000 firm z Europy Środkowej z lat 2015÷2019. Niesekwencyjny model Dickinsona, wiek firmy i trzy modele zarządzania dochodami memoriałowymi wykorzystano jako wskaźniki cyklu życia

firmy i jakości raportowanego zysku. Wnioski i wartość dodana: Zarządzanie dochodami i ryzyko upadłości mają kształt litery U, co wskazuje, że firmy znajdujące się w trudnej sytuacji finansowej zmniejszają raportowany zysk księgowy na początku, spadku i, w mniejszym stopniu, na etapie wzrostu. Firmy słowackie i czeskie w podobnym stopniu manipulują zyskami. Firmy węgierskie w największym stopniu zwiększają zysk księgowy niż kraje badane kontrolując bankructwo – efekt cyklu życia - jednak nie było różnic w manipulacjach księgowych w różnych branżach. Wyniki te sugerują, że start-upy i upadające firmy dostarczają krzywe sprawozdań finansowych w celu uzyskania korzystniejszych transakcji dotyczących zadłużenia, a szacowanie uznaniowych rozliczeń za pomocą podpróbek cyklu życia może poprawić moc predykcyjną modeli zarządzania dochodami memoriałowymi.

Uwzględniając wymienione rozwiązania modelowe oraz przykłady praktyczne, stwierdzić należy, że projekty realizowane z obszaru odnawialnych źródeł energii w branży biogazowej - bez wsparcia (kolorowe świadectwa pochodzenia energii, dotacje, preferencyjne kredyty) po prostu się nie opłacają, bo $NPV < 0$, IRR jest mniejsze od stopy dyskonta.

Również istotną sprawą jest wykonanie bilansu energetycznego pozwalającego w efekcie oszacować ilość wyprodukowanej energii elektrycznej i ciepłej. Jak na razie bardzo niewiele jest projektów, których realizacja przynosi w efekcie produkcję biogazu (biometanu), który będzie po oczyszczeniu i wzbogaceniu wtłoczony do sieci.

Opracowując modele analizy finansowo-ekonomicznej projektów budowy biogazowni rolniczych napotyka się na problemy dotyczące tzw. „jakości energetycznej” substratów. Jest to ważne ponieważ energia chemiczna w procesie fermentacji w końcowej fazie jest wykorzystana do zasilenia układu kogeneracyjnego. W zasadzie dane te są oparte na tabelach opublikowanych w różnego typu publikacjach, lecz są to dane ogólne. Okazuje się, że licząc po przychodach ogółem najbardziej wrażliwą badaną zmienną jest jakość energetyczna substratów. Oznacza to, że wartości zawartości suchej masy w substratach i zawartość suchej masy organicznej w suchej masie może zdecydowanie wpłynąć na efektywność projektu budowy biogazowni. Powinno się przebadać substrat i uwzględnić do przyjęcia w bilansie energetycznym wartości wynikające z wyników tych badań.

Warto również zwrócić uwagę na oszacowanie przychodów z projektu. Generalnie składają się na nie dwie pozycje. Pierwsza - przychody ze sprzedaży energii elektrycznej i ciepłej oraz przychody ze sprzedaży kolorowych świadectw. Druga - podstawa przychodów z certyfikatów potwierdzających wytworzenie „zielonej energii”, czyli zielone świadectwa.

W niewielkiej ilości przypadków można założyć w pozycjach przychodu również opłaty z tytułu utylizacji odpadów, które dla nas są substratami.

Dokonując analizy – uwzględniając, że istnieją przychody z kolorowych certyfikatów w całym okresie trwania życia ekonomicznego projektu biogazowego - dla infrastruktury biogazotwórczej na (18÷21) lat, efektywność inwestycji wzrasta dla modelu zakładającego 100% sprzedaż lub wykorzystanie energii cieplnej. Oczywiście należy przyjąć, że około (25÷30)% ciepła będzie wykorzystane na utrzymanie stabilnej temperatury procesu przemiany mezofilowej w reaktorach (zbiornikach fermentacyjnych), której stabilność w bardzo dużym stopniu determinuje efektywność procesu fermentacji beztlenowej. A więc już na poziomie przygotowywania studium celowości lub studium przed inwestycyjnym chcąc uzyskać maksymalną wartość zdyskontowanych, skumulowanych, wolnych przepływów pieniężnych należy zapewnić sobie 100% wykorzystanie (lub sprzedaż) pozostałej do dyspozycji energii cieplnej. Aby ten warunek był spełniony należy zwiększyć nakłady inwestycyjne poprzez wybudowanie lub rozbudowanie węzła cieplnego. Negatywny jest zakup gotowej biogazowni rolniczej, w której ciepło oprócz części na własne potrzeby nie jest wykorzystane w infrastrukturze gospodarczej.

Obecnie najbardziej rozpowszechnioną metodą analizy inwestycyjnej jest wykonanie analizy wrażliwości oraz oszacowanie progów rentowności i marginesów bezpieczeństwa dla różnych badanych zmiennych. Można tego dokonać za pomocą narzędzi IT, w programie Invest for Excel. Ryzykom miękkim (np. organizacyjnym, prawnym itp.) należy nadać odpowiedni status (wysokie, średnie, niskie) i dokonać opisu samego ryzyka oraz informacji kiedy ono może wystąpić i jakie są możliwości z jego minimalizacji.

Dla realizacji opłacalnego projektu budowy biogazowni rolniczej i podjęcia właściwej decyzji inwestycyjnej przedstawiono uwarunkowania dla powodzenia przedsięwzięcia biznesowego:

- stały, gwarantowany przez minimum (15÷18) lat strumień dostaw substratów;
- bliski dostęp do substratów;
- gwarantowana cena sprzedaży energii elektrycznej (cena aukcyjna).

Natomiast w dotychczasowych, konwencjonalnych rozwiązaniach technologicznych można zaobserwować następujące problemy:

1) Prawidłowe utrzymaniem reżimu technologicznego, który jest ściśle związany z konwersją energii chemicznej zawartej w substratach na energię zawartą w biogazie. Sprawność procesowa powinna być dużo większa niż to zakładano w modelu technologicznym. Łączna cena sprzedaży energii elektrycznej nie pokrywa kosztów pozyskania substratów oraz kosztów operacyjnych i zobowiązań kredytowych.

2) Pozyskanie substratów, często w dużej mierze oparte na kiszonce kukurydzy pierwotne paliwo organiczne przeznaczone do fermentacji jest niedostępne w ilości i jakości zakładanej na początku. Rolnicy są zorientowani na zysk ze sprzedaży kukurydzy i nie są zainteresowani długoterminowymi kontraktami, które zmuszają ich do ciągłych dostaw w określonej cenie.

3) Ceny kolorowych certyfikatów są na bardzo niskim poziomie nie gwarantującym razem ze sprzedażą energii elektrycznej i ciepła pokrycia wszystkich kosztów operacyjnych i spłatę zobowiązań wynikających z pozyskania kapitału obcego (najczęściej kredytów inwestycyjnych).

Budowa biogazowni to niewątpliwie bardzo duża inwestycja. Wymaga od przyszłych inwestorów dużej ilości pieniędzy, dobrej zdolności kredytowej i szerokiej wiedzy z wielu dziedzin przenikających się na etapie planowania i realizacji. Jako jeden ze sposobów na pozyskiwanie zielonej energii, biogazownia może być opłacalnym narzędziem. Analiza modelowa budowy i eksploatacji biogazowni wykazała, że jest to inwestycja opłacalna ekonomicznie.

Jednak bardzo duże ryzyko lokowania środków w tym obszarze jest znaczne. Ryzyko to musi być brane pod uwagę na każdym etapie planowania inwestycji, a także na późniejszym etapie jej eksploatacji. Ponadto rynek biogazu charakteryzuje się wieloma zagrożeniami, które również należy wziąć pod uwagę w całej analizie. Ryzyka można podzielić na: - społeczne, - organizacyjne, - techniczne i technologiczne, - ekonomiczne i prawne.

Ryzyko społeczne charakteryzuje się:

- negatywne postrzeganie przyszłych inwestorów przez mieszkańców terenów, na których planuje się budowę biogazowni;
- obawy przyszłych inwestorów o dużą zmienność sektora;

Ryzyko organizacyjne wyróżnia:

- brak miejscowych planów zagospodarowania przestrzennego;
- brak przygotowania merytorycznego urzędników do prowadzenia inwestycji w sektorze;
- organizacyjne rozdrobnienie sektora w kraju;
- konieczność skorelowania odbioru ciepła z produkcją biogazu, zwłaszcza na obszarach wiejskich, gdzie transfer ciepła jest niemożliwy (obszary wiejskie nie posiadają infrastruktury ciepłowniczej);
- brak krajowych laboratoriów badawczych i ośrodków wsparcia przyszłych inwestorów;
- brak rzetelnego doradztwa inwestycyjnego.

Ryzyko techniczne i technologiczne powstaje poprzez:

- pokusa inwestowania w duże biogazownie, które przynoszą wyższe przychody i pozwalają na wyższe stopy zwrotu z zaangażowanego kapitału.

Ryzyko ekonomiczne i prawne to:

- brak stabilnego wsparcia OZE w ustawodawstwie;
- wysokie bariery kapitałowe w budowie biogazowni;
- silna pozycja firm energetycznych na rynku i konieczność dostosowania się do ich wymagań, często zbyt wysoka dla rolników, którzy chcieliby rozpocząć działalność w tej dziedzinie;
- biurokracja przy ubieganiu się o wsparcie publiczne;
- długi okres zwrotu.

Polska ma bardzo duży potencjał biogazowy – kraj posiada około 12% zasobu energetycznego biomasy w całej Europie [Faber, 2008]. Jednak nadal nie wiemy, jak skutecznie z niego korzystać. Brak wsparcia technologicznego ze strony czołowych ośrodków naukowych w Polsce pogłębia lukę w tej dziedzinie. Dużą rolę odgrywa kapitałochłonność. Wysokie nakłady finansowe w połączeniu z długim okresem zwrotu mogą się zmienić tylko wtedy, gdy produkcja poszczególnych komponentów do budowy biogazowni będzie prowadzona w Polsce na większą skalę. W dłuższej perspektywie również nie są określone korzyści dla przyszłego inwestora. Choć opracowane przez Ministerstwo Gospodarki dokumenty w postaci poradnika dla inwestorów zainteresowanych budową biogazowni rolniczych [MOE, 2010] rozwiały wiele wątpliwości, nadal istnieje luka na rynku, gdyż jest to znacząca pomoc, ale nie dostarcza gotowych rozwiązań. Niezbędne są dalsze próby i wypracowanie w praktyce modeli funkcjonowania takich innowacyjnych rozwiązań. Ostatnio w literaturze można dostrzec próby rozwiązań dla biogazowni [Voytovych i in., 2020].

Przyszłe badania powinny dotyczyć rentowności projektu, który powinien być opłacalny zarówno dla inwestora jak i dla kapitału własnego. Z punktu widzenia zaangażowania kapitału własnego, w kontekście szacowanych wskaźników efektywności finansowej dla innych technologii stosowanych w branży biogazowni rolniczych –oczekiwana jest stopa zwrotu z kapitału własnego przy założeniu krótko terminowego (kilka lat) operacyjnego wsparcia ze sprzedaży energii elektrycznej z zastosowaniem rocznej progresji, zwłaszcza dla biogazowni rolniczych przy gospodarstwach indywidualnych.

Wpływ pracy na społeczeństwo jest znamieny, ponieważ kluczowymi dla rentowności biogazowni są wysokość nakładów inwestycyjnych i stawki dopłat do energii elektrycznej.

Sugestia ta nie jest odkrywcza, lecz wskazuje na wartość poznawczą rozpatrywanego problemu jakim jest uniwersalność zastosowania modelu inwestycyjnego.

Gwarancją opłacalności biogazowni rolniczych jest trwałość i kształt przyszłych mechanizmów wsparcia, zarówno w formie premii dla produkcji energii ze źródeł odnawialnych, jak i wsparcia w formie dotacji. Obniżenie nakładów inwestycyjnych może odbywać się również dzięki innym mechanizmom, np. powszechność wdrożeń może zainicjować obniżanie kosztów ze względu na efekt skali stosowanych w praktyce biogazowni przy gospodarstwach indywidualnych.

Sektor biogazowy w Polsce w warunkach gospodarstw indywidualnych oczekuje opracowania modelu inwestycyjnego, który wykaże wyliczoną opłacalność inwestycji. Obecnie istnieje wiele niewiadomych, gdyż większość modeli zapożyczono z biogazowni przemysłowych i w zasadzie takie działanie jest niewystarczające dla dalszego rozwoju tego bardzo innowacyjnego sektora. Praca omawia przykładowe rozwiązania, pozwalające czytelnikowi zapoznać się z różnymi metodami i propozycjami dotychczas realizowanych inwestycji. Może się to wydawać chaotyczne, ale tak właśnie wygląda scharakteryzowany rynek biogazu w kontekście realizacji projektów biogazowych. Praca podaje wskazówki, jak zrozumieć inwestowanie w ten wrażliwy sektor rolnictwa indywidualnego, dlatego tym bardziej liczą na zrozumienie i uznanie w jakikolwiek sposób usystematyzowania – stale zmieniającego się rynku energii odnawialnej.

Rozważania zawarte w pracy przedstawiają model inwestycyjny dla biogazowni rolniczej:

- 1) Opracowano strukturę kategorii inwestycyjnych dla biogazowni;
- 2) Przedstawiono zależności wskaźników wpływu ceny sprzedaży świadectw pochodzenia na NPV i IRR przy stałej cenie sprzedaży energii elektrycznej do sieci oraz wpływ ceny zakupu substratu na NPV i IRR.
- 3) Opracowano model biznesowy dla biogazowni w oparciu o opłacalność inwestycji.
- 4) Dokonano interpretacji wyniku finansowego i przepływów pieniężnych.
- 5) Przedstawiono koszty, zyski i oszczędności inwestycji biogazowych dla wskaźników ekonomicznych i wariantów infrastruktury energetycznej biogazowni.

Wykazano, że na polskim rynku wciąż brakuje kompletnej i sprawdzonej oferty technologicznej mikrobiogazowni, w tym w szczególności najprostszych w budowie małych biogazowni kontenerowych. Dlatego istnieje potrzeba opracowania uproszczonego „modelu biznesowego” biogazowni rolniczych dla gospodarstw indywidualnych.

3) Praca nr O3

Gaz biologiczny powstaje w wyniku fermentacji metanowej substancji biodegradowalnych. Głównymi surowcami w procesie fermentacji są odpady i ścieki z gospodarstw hodowlanych, osady ściekowe z komunalnych oczyszczalni ścieków i przemysłu spożywczego, odpady organiczne składowane na wysypiskach, a także rośliny energetyczne, przede wszystkim kukurydza, uprawiana w celu wykorzystania jej jako substratu w tzw. biogazowniach NaWaRo (Nachwachsende Rohstoffe) oraz odpady z produkcji rolnej, w tym m.in. gnojowica świńska [Smolinski i in., 2021]. Produkcja biogazu znacząco rośnie, a w Polsce buduje się coraz więcej biogazowni, przede wszystkim rolniczych [Wałowski i in., 2019]. Tym samym wzrasta znaczenie tego paliwa w bilansie energetycznym kraju [Wałowski i in., 2019; Aleksandrow i Michalak, 2013]. Produkcja biogazu rolniczego dywersyfikuje źródła energii elektrycznej i ciepła w kontekście wymagań układów skojarzonego wytwarzania ciepła i energii (CHP) w odniesieniu do siarkowodoru (H_2S) [Żarczyński i in., 2015]. Wykorzystanie biogazu wymaga jego odpowiedniego przygotowania w zależności od przeznaczenia i początkowego składu (główne składniki i zanieczyszczenia) [Kowalski i Smerkowska, 2012]. Zawartość poszczególnych składników biogazu rolniczego nie jest stała, lecz zależy od charakterystyki prowadzonego procesu technologicznego i rodzaju materiału wsadowego. Szczególne znaczenie ma zawartość metanu (CH_4) w biogazie, która decyduje o wartości opałowej tego paliwa. Istotnym parametrem jest również stężenie H_2S , który jest zanieczyszczeniem biogazu i utrudnia jego wykorzystanie [Piskowska-Wasiak, 2014; Kuo-Ling i in., 2013; Zajac i in., 2013; Zdeb, 2013; Frare i in., 2015; Ermich i Pruszyńska, 2008].

Siarkowodor jest bezbarwnym, łatwopalnym gazem o nieprzyjemnym zapachu i jest silnie toksyczny dla organizmów żywych, oddziałując na układ nerwowy i oddechowy. Wysokie stężenie H_2S w biogazie powoduje korozję bloków cieplnych i kotłów. Dlatego H_2S jest uważany za niepożądany składnik biogazu i musi zostać usunięty. Usuwanie siarkowodoru (odsiarczanie) jest jednym z najważniejszych procesów w oczyszczaniu biogazu [Paprotka, 2011]. W przypadku, gdy biogaz ma być wtryskiwany do rurociągu lub wykorzystywany jako paliwo do silników, konieczne jest również usunięcie CO_2 , pary wodnej, siloksanów i innych zanieczyszczeń [Kowalski i Smerkowska, 2012; Piskowska-Wasiak, 2014; Kociołek-Balawejder i Wilk, 2011; Zawadzka i Imbierowicz, 2010; Cebula, 2012; Pomykała i Łyko, 2013].

Wkładem badawczym w literaturze było opracowanie odsiarczacza [Steppa, 1992], który został zmodyfikowany i dostosowany do instalacji do produkcji biogazu z nawozów naturalnych, zwłaszcza obornika, z systemem oczyszczania biogazu H₂S [Romaniuk i Biskupska, 2014]. Interesujące rozwiązanie znajduje się również w patencie [Aleszczyk, 2021] udzielonym na zbiornik odsiarczająco-odwadniający biogaz, zawierający wymienniki ciepła umieszczone pomiędzy ścianami chłodnicy a ścianami zbiornika.

Zagadnienie odsiarczania surowego biogazu rolniczego zostało podjęte przez Instytut Technologiczno-Przyrodniczy – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Energii Odnawialnej w Poznaniu podczas eksploatacji biogazowni, która została wdrożona [Wdrożenie, 2019] w gospodarstwie rolnym w Ocieszynie w ramach projektu BIOGAS i EE finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, realizowanego w ramach programu BIOSTRATEG 1.

Sposoby pomiaru i metod oceny uzdatniania biogazu zaprezentowano w publikacji nr **O3**:

Kaplan, M.; Klimek, K.; Syrotyuk, S.; Konieczny, R.; Jura, B.; Smoliński, A.; Szymenderski, J.; Budnik, K.; Anders, D.; **Dybek, B.**; Karwacka, A.; Wałowski, G. Raw Biogas Desulphurization Using the Adsorption-Absorption Technique for a Pilot Production of Agricultural Biogas from Pig Slurry in Poland. *Energies* 2021, 14, 5929. <https://doi.org/10.3390/en14185929>.

Celem pracy była ocena odsiarczania biogazu rolniczego, wytwarzanego w procesie mezofilowej fermentacji metanowej z polidispersyjnego substratu, z wykorzystaniem złoża adhezyjnego umieszczonego w fermentatorze.

Poprzez adsorpcję na złożu węgla aktywnego, H₂S jest usuwany z biogazu [Hagen i in., 2001]. Ta metoda jest powszechnie stosowana do oczyszczania szerokiego zakresu zanieczyszczeń z przemysłowego powietrza wylotowego, takich jak lotne związki organiczne (LZO), oraz do usuwania H₂S i zapachów z miejskich systemów kanalizacyjnych [TAPC, 2024]. Oczyszczony gaz może być wstępnie filtrowany, suszony lub chłodzony w celu wspomaganie procesu adsorpcji. Węgiel zwykle występuje w postaci małych granulek lub wyłaczanych kawałków. Można osiągnąć bardzo wysoki stopień adsorpcji, dzięki czemu oczyszczone powietrze wylotowe jest zasadniczo wolne od LZO i/lub H₂S. Chociaż mechanizmy te nie są jeszcze dobrze poznane [Siefers, 2010], powszechnie przyjmuje się, że usuwanie zanieczyszczeń odbywa się zarówno za pomocą środków fizycznych, jak i chemicznych. Najczęstszym zastosowaniem adsorpcji na węglu aktywnym jest brak

regeneracji węgla [Hagen i in., 2001]. Jednak koszt wymiany węgla aktywnego może być znaczny, dlatego stosuje się systemy regenerowalne, w których złożę węgla aktywnego adsorbuje zanieczyszczenia, podczas gdy złożę rezerwowe jest regenerowane przez stripping parą [TAPC, 2024]. Złożę węgla aktywnego można regenerować w sposób ciągły przy użyciu tlenu atmosferycznego, co prowadzi do utleniania biologicznego podobnego do procesu opisanego w [Hagen i in., 2001]. Węgiel aktywny można również domieszkować lub impregnować różnymi związkami, takimi jak jodek potasu, w celu zwiększenia szybkości reakcji poprzez połączenie fizycznych ścieżek sorpcji i reakcji chemicznych [Siefers, 2010; Wellinger i Linberg, 2005; Abatzoglou i Boivin, 2009]. Obróbka węglem aktywnym może być potencjalnie stosowana do otrzymania lepszej jakości biogazu po etapie wstępnego oczyszczania. Jednakże mało prawdopodobne jest, aby był szeroko stosowany jako pojedynczy etap obróbki biogazu w chlewniach ze względu na wysokie koszty wymiany partii i złożoność opcji regeneracji [Skerman, 2016].

Według [Pourzolfaghar i in., 2004] adsorbenty stosowane w odsiarczaniu są zazwyczaj wybierane na podstawie ich zdolności adsorpcji H_2S [Okoro i Sun, 2019], kinetyki procesu adsorpcji, trwałości odzwierciedlonej we właściwościach mechanicznych i stabilności właściwości chemicznych. Zawartość H_2S w gazie można zmniejszyć do niskich stężeń resztkowych <1 ppm [TVT, 2012]. Techniki adsorpcyjne skutkują wysoką wydajnością odsiarczania, szczególnie przy użyciu adsorbentów węglowych [Kwaśny i in., 2016]: węgla aktywnego RGM1, dla którego stężenie zaadsorbowanego gazu wynosi $27,15 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$, i węgla aktywnego RBAA1, dla którego stężenie zaadsorbowanego gazu wynosi $20,43 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$. Jednak przy stosowaniu adsorbentów ważne jest ustalenie maksymalnego stężenia H_2S , przy którym proces odsiarczania jest opłacalny.

Jeśli chodzi o metody wykorzystujące tanią rudę darniową [Żarczyński i in., 2014], zakres wydajności odsiarczania biogazu wynosi do 90% [Huynh i in., 2011], a w przypadku węgla modyfikowanego aktywną substancją [Żarczyński i in., 2015], zakres wydajności odsiarczania biogazu wynosi do 95% [Cebula, 2012], co stanowi wyniki o istotnym znaczeniu ekonomicznym.

W badaniu [Pham i in., 2018] wydajność usuwania H_2S wynosiła prawie 100% przy wszystkich szybkościach przepływu gazu dla gleby alofanowej, gleby brunatnej i czarnego piasku, a następnie typowego piasku (90÷100)%. Badanie to wykazało, że wybrane gleby Nowej Zelandii o wysokiej zawartości żelaza mogłyby potencjalnie zostać wykorzystane do budowy prostych i niedrogich złóż adsorpcyjnych H_2S w celu poprawy jakości biogazu. Wydajność usuwania H_2S z używanych materiałów glebowych można zwiększyć,

wystawiając je na działanie atmosfery. W procesie absorpcji, kilka komercyjnych nośników zostało zaoferowanych jako ulepszone alternatywy dla gąbki żelaznej do stosowania w usuwaniu H_2S w wielu gałęziach przemysłu [Zicari, 2021]. Takie produkty komercyjne mają powłoki żelazne na różnych strukturach nośnych, takich jak suszony obornik, kulki ceramiczne, ziemia krzemkowa lub nieokreślone zastrzeżone materiały [Cherosky i Li, 2013], lub składają się z granulowanego bogatego w tlenek żelaza podłoża, takiego jak czerwony muł, który jest produktem odpadowym z produkcji aluminium [Wellinger i Linberg, 2005]. Przy wysokich stężeniach H_2S (1.000÷4.000) ppm oczekuje się, że 100 g peletów czerwonego mułu zwiąże 50 g siarczku; jednak takie peletki prawdopodobnie będą droższe niż zrębki drzewne [Krich i in., 2005]. Długoterminowe badania sorpcji H_2S z biogazu przeprowadzone w warunkach wybranej oczyszczalni ścieków pozwoliły na wyznaczenie linii trendu opisującej spadek skuteczności jego usuwania przez badaną masę odsiarczającą w funkcji czasu. Uzyskana zależność umożliwia prognozowanie czasu wymiany badanego sorbentu. Pojemność sorpcyjna badanego sorbentu, stworzonego na bazie darniowego żelaza i aktywatorów alkalicznych, wykazała, że przeciętne całoroczne warunki pracy oczyszczalni ścieków wynoszą 36% chłonności określonej w warunkach laboratoryjnych. Może to wynikać z trudności utrzymania optymalnych parametrów pracy odsiarczaczy w warunkach rzeczywistych, takich jak: pH, temperatura i wilgotność. Czas wyczerpywania się złoża określony w warunkach rzeczywistych wynosi 52% czasu wynikającego ze stechiometrii reakcji chemicznej (bez uwzględnienia udziału aktywatorów). Uzyskany doświadczalnie wskaźnik zużycia masy odsiarczającej wynosi 3,3 kg na 1.000 m^3 , a jednostkowe koszty jej zakupu wynoszą ok. 9 PLN na 1.000 m^3 . Oczyszczanie biogazu z wykorzystaniem badanej masy odsiarczającej pozwala na obniżenie stężenia H_2S poniżej wymaganej wartości technicznej $200\text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. Wyniki potwierdziły, że w warunkach badanej oczyszczalni ścieków wystarczająca jest wymiana złoża co pół roku [Cybulska, i in., 2021].

Recykulacja biogazu z absorpcją siarkowodoru okazała się skuteczną metodą redukcji zawartości siarkowodoru w biogazie [Gróf i in., 2020]. Podczas recykulacji uzyskano obniżenie stężenia siarkowodoru i poprawę jakości biogazu. Najwyższa zawartość CH_4 wyniosła odpowiednio 78,7% i 83%. Biorąc pod uwagę zawartość siarkowodoru, przedłużona praca recykulacji doprowadziła do wysokiej efektywności jego usuwania z biogazu. Po wyłączeniu recykulacji stężenie siarkowodoru w biogazie wzrosło do 19.960 ppm. Po wyłączeniu recykulacji biogazu stężenie siarkowodoru w reaktorze wzrosło do $4,18\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$. Po ponownym uruchomieniu recykulacji zaobserwowano spadek stężenia siarczków ($0\text{ mg}\cdot\text{l}^{-1}$), co sugeruje, że hamujący wpływ siarczków został częściowo stłumiony [Gróf i in., 2020].

Biorąc pod uwagę powyższe badania, a także efekty zastosowanych złóż, należy wskazać na oryginalność zastosowanej techniki adsorpcyjno-absorpcyjnej dla innowacyjnego złoża. Wadą proponowanej metody może być medium (złoże) wykorzystywane do usuwania siarkowodoru w procesie produkcji surowego biogazu w procesie fermentacji beztlenowej. Medium adsorpcyjne jest regenerowane lub wymieniane na nowe; jest to istotna cecha ze względu na uciążliwy charakter wykonywanych czynności regeneracyjnych. Dodatkowo wykorzystanie węgla aktywnego w modyfikacji złoża odsiarczającego może stanowić problem ekonomiczny. Wadą może być cena w porównaniu do innych złóż odsiarczających dostępnych na rynku, ale przy doskonałej skuteczności adsorpcji H₂S jednocześnie czas użytkowania kogeneratorsa powinien być dłuższy, co pozwoli nam opóźnić wymianę zużytych podzespołów kogeneratorsa.

W pracy przedstawiono wstępne wyniki badań eksperymentalnych nad odsiarczaniem biogazu rolniczego jako przykład średniej dziennej produkcji biogazu rolniczego oraz składu jakościowego biogazu rolniczego produkowanego z gnojowicy świńskiej. Wyniki pomiarów pokazują wyraźny wpływ odsiarczania surowego biogazu na ocenę przepływu biogazu przy użyciu autorskiej techniki adsorpcyjno-absorpcyjnej w kontekście oczyszczania biogazu rolniczego. Wykazano, że:

- (1) Zastosowana technika odsiarczania surowego biogazu rolniczego znacząco przyczynia się do oczyszczania oczyszczonego biogazu;
- (2) Metoda wykorzystania złoża granulowanego w odsiarczaczach znacząco usprawnia proces odsiarczania surowego biogazu, w przypadku biogazu wysokokalorycznego w 100% odsiarczonego oraz w kogeneracji na energię elektryczną i ciepło;
- (3) Surowy biogaz można łatwo i niezawodnie oczyścić i wyprodukować w pobliżu budynku inwentarskiego.

4) Praca nr O4

Ciągle zmiany środowiskowe na świecie są spowodowane spalaniem paliw kopalnych i nadmierną eksploatacją zasobów naturalnych. Globalna urbanizacja, rozwój gospodarczy i przemysłowy tworzą odpady stałe, z którymi Ziemia nie może sobie poradzić [Montt i in., 2018; Abdel-Shafy i Mansour, 2018]. Ciągły wzrost produkcji odpadów stałych, w tym osadów ściekowych, jest alarmującym problemem, a jego rozwiązanie stało się priorytetem politycznym i środowiskowym. Przewiduje się, że populacja ludzka osiągnie 9,7 miliarda do 2050 roku, co wskazuje na ciągły wzrost zapotrzebowania na żywność, wodę i energię [Baus, 2017]. Odnawialne źródła, takie jak energia słoneczna, wiatrowa, wodna i biogaz, są potencjalnymi kandydatami do zaspokojenia globalnego zapotrzebowania na energię w sposób zrównoważony. W odpowiedzi na problem rosnących osadów odpadów organicznych i potrzebę nowych odnawialnych źródeł energii opracowano szereg inicjatyw naukowych mających na celu zbadanie potencjału energetycznego bioodpadów do produkcji biogazu [Baus, 2017; Deng i in., 2014b; Surendra i in., 2014]. Ponowne wykorzystanie biomasy, takiej jak osady ściekowe, odpady rolnicze i przemysłowe, jest bardzo korzystne i zmniejsza zanieczyszczenie składowisk i gleby.

Odnawialne źródła energii są ważnym elementem bilansu energetycznego kraju, będąc charakterystyczną wartością innowacyjnej gospodarki. Przemysłowe zakłady biogazowe budowane są w Europie Zachodniej od lat 80. XX wieku, ale nagły wzrost liczby instalacji nastąpił dopiero w ostatnich latach. Jest to wynik zobowiązań podjętych przez kraje UE w celu ograniczenia emisji gazów cieplarnianych i upowszechnienia odnawialnych źródeł energii [Ignatowicz i in., 2021; Uliasz-Misiak, 2011; Szurlej i Janusz, 2013; Kogut i in., 2014]. Całkowita energia elektryczna wytworzona z biogazu osiągnęła w 2017 r. 0,088 GWh, z czego 40% zostało wygenerowane w Niemczech [Refai, 2016]. W Polsce pierwsza biogazownia została uruchomiona w 2005 roku, natomiast do połowy 2020 roku działało 310 biogazowni o łącznej mocy elektrycznej 245.148 MW_e, w tym tylko 120 biogazowni rolniczych (w 2021 roku 128) o łącznej mocy 101,3 MW_e. Potencjał biogazu szacuje się na ok. (13÷15) mld m³ rocznie, przy czym biometanu rocznie jest (7÷8) mld m³. Dla porównania Polska zużywa ok. 14 mld m³ gazu ziemnego rocznie [Ignatowicz i in., 2021]. Biorąc pod uwagę światowy kryzys energetyczny, bez wątpienia zasadne jest budowanie coraz większej liczby biogazowni, zarówno rolniczych, jak i utylizacyjnych. Dzięki technologii fermentacji metanowej możliwe jest wytwarzanie biogazu z różnych odpadów [Nielsen i in., 2009; Abbasi i in., 2012; Gao i in., 2019; Ahmed i in., 2021c; Thiruselvi i in., 2020].

Odpady te mogą być pochodzenia rolniczego, komunalnego lub przemysłowego. Najczęstszymi rodzajami odpadów wykorzystywanymi do produkcji energii są odpady rolnicze, komunalne osady ściekowe, odpady drzewne, uprawy energetyczne, obornik zwierzęcy, surowiec z alg, odpady mleczarskie, osady z oczyszczalni ścieków mleczarskich, ścieki z tłoczni oleju palmowego itp. W Europie biogaz powstaje głównie w wyniku beztlenowego rozkładu odpadów rolniczych, obornika i upraw energetycznych. Ponadto możliwymi źródłami surowca są osady z oczyszczalni ścieków, frakcja organiczna stałych odpadów komunalnych lub odpady stałe składowane na wysypiskach [Sarker i in., 2019; Stolze i in., 2017; Heerenklage i in., 2019]. Dzięki zastosowaniu odpowiedniej technologii i optymalizacji procesu możliwa jest wydajna produkcja biogazu. Różne warunki rozruchu i pracy biogazowni mają znaczący wpływ na potencjał produkcji biogazu. Aby uzyskać optymalną wydajność biogazu przy najniższych kosztach, należy kontrolować kilka parametrów zmiennych niezależnych, w szczególności: temperaturę, wartość pH, czas retencji i szybkość ładowania materii organicznej, które bezpośrednio wpływają na aktywność mikrobiologiczną. Z drugiej strony właściwości fizyczne surowca mogą się różnić pod względem zawartości substancji toksycznych, co może również wpływać na aktywność mikrobiologiczną [Nsair i in., 2020; Lenort i in., 2017]. Badania nad produkcją biogazu wykazały, że dodanie współfermentacji mieszanego substratu może dać znacznie wyższe plony produkcji niż sam obornik. Dlatego powszechną praktyką wśród firm, które wykorzystują biogaz do produkcji energii, jest stosowanie obornika i gnojowicy lub innych składników, takich jak rośliny energetyczne, kiszonka z traw, kiszonka z kukurydzy itp., w różnych kombinacjach i proporcjach. Aby zidentyfikować stan wiedzy w zakresie wyników badań dotyczących najpopularniejszych substratów stosowanych do produkcji biogazu, przeprowadzono analizę literatury (metodologia oparta jest na 79 publikacjach cytowanych w głównych czasopismach naukowych w branży, a bazy danych zawarte w tych czasopismach zostały wykorzystane), skupiając się na eksperymentach przeprowadzonych w dużej, pilotażowej instalacji.

Efektywność fermentacji metanowej i rzeczywistą produkcję energii dla modeli opartych na różnych rodzajach substratów przedstawiono w publikacji nr **O4**:

Ignatowicz, K.; Filipczak, G.; **Dybek, B.**; Wałowski, G. Biogas Production Depending on the Substrate Used: A Review and Evaluation Study—European Examples. *Energies* 2023, 16, 798. <https://doi.org/10.3390/en16020798>.

Celem pracy było dokonanie przeglądu obecnego stanu technologii stosowanych w produkcji biogazu na wybranych europejskich przykładach pod kątem wydajności fermentacji metanowej i rzeczywistej produkcji energii.

Uprawy rolne - do produkcji biogazu można wykorzystać wszystkie rodzaje surowców rolnych i materiałów reszkowych, nawet międzyplony, kiszonki z całych roślin i buraki energetyczne są w stanie zapewnić dobre plony przy zastosowaniu odpowiedniej technologii.

Podkówka [Podkówka, 2006] w swojej pracy omówił wydajność produkcji biogazu przy użyciu różnych roślin energetycznych, skupiając się na kiszonce z kukurydzy. Stwierdził, że z tej uprawy można uzyskać 15,906 MWh/ha energii. Zauważył również, że dobre wyniki w produkcji i jakości biogazu uzyskuje się, gdy kiszonkę kukurydzianą miesza się z obornikiem świńskim.

Inne porównanie wydajności energetycznej różnych źródeł organicznych opisał Gissen, kompilując dane zebrane dla konopi, buraków cukrowych, kukurydzy, pszenżyta, trawy i pszenicy ozimej. Thorina i in. [Thorin i in., 2012] zbadali wpływ obróbki surowców na zwiększenie szybkości fermentacji, zmniejszenie balastu materii organicznej w strumieniu wody poddanej recyklingowi w trakcie procesu i wykorzystanie pozostałości biogazu w gospodarstwie, takich jak bioodpady i kiszonka z nasion oleistych. Odkryli możliwość zwiększenia wydajności biogazu z procesu nawet o ponad 30% poprzez wstępne przetworzenie surowca i włączenie filtracji membranowej do procesu. Ponadto wykazali potencjał pozostałości biogazu jako nawozów. Ta sama grupa potwierdziła wzrost produkcji biogazu o 59% i 43% po mechanicznym wstępnym przetworzeniu substratu.

Produkcja biogazu osiągnęła 350 Nml/g VS dla pierwszej technologii, a analiza energetyczna przeprowadzona przez Lindmarka [Lindmark i in., 2012] wykazała, że można osiągnąć wydajność energetyczną na poziomie 40%, co skutkuje dodatnim bilansem energetycznym, ponieważ produkcja energii byłaby (8÷11) razy wyższa niż zastosowana obróbka substratu.

Nges i in. [Nges i in., 2012] przedstawili wyniki pilotażowej operacji beztlenowego trawienia kiszonki z kukurydzy i buraków cukrowych z ciągłym mieszaniem. Zbadali również wpływ dodania składnika odżywczego w celu przetestowania właściwości przefermentowanego materiału jako biofertilizatora. Zaowocowało to dobrą wydajnością CH₄ i produkcją biogazu na poziomie 318 m³/tonę. Eksperyment trwał 13 miesięcy, a wyniki były porównywalne z najwyższą wydajnością produkcji CH₄ w skali laboratoryjnej.

Inną uprawą testowaną pod kątem produkcji biogazu jest słoma pszeniczna. Słoma składa się głównie z ligniny, która jest uważana za główną przeszkodę w biodegradacji substratów lignocelulozowych. Ogólna strategia zwiększania biodegradowalności takich związków

polega na degradacji ligniny, zmniejszając krystaliczną naturę celulozy, a tym samym zwiększając porowatość substratów lignocelulozowych. Dzięki tej zmianie struktury dostępność enzymów i mikroorganizmów podczas produkcji biogazu jest wyższa i może wystąpić degradacja. Novacovic i in. [Novakovic i in., 2020] zastosowali enzymatyczną sacharyfikację i detoksykację słomy pszennej i poprawili wydajność produkcji biogazu w procesie fermentacji beztlenowej. Osiągnęli produkcję biogazu wynoszącą $1,06044 \text{ m}^3$ dziennie.

Ciccoli i in. [Ciccoli i in., 2017] zbadali produkcję biogazu i skład populacji mikrobiologicznej w pilotażowej biogazowni zasilanej wyłącznie nadziemną biomasą (AGB) słonecznika bulwiastego (JA). Testy biochemicznego potencjału metanu (BMP) przeprowadzone na świeżej, suszonej na powietrzu i kiszanej nadziemnej biomacie JA wykazały, że suszona na powietrzu biomasa JA dała najwyższą produkcję biogazu, podczas gdy kiszona biomasa dała najniższą. Proces beztlenowy przeprowadzono w fermentatorze przepływowym (ETEcoinnovative Technologies Srl) o objętości roboczej $1,5 \text{ m}^3$ w warunkach mezofilowych ($36\div 38$) °C. Jak widać, suszony na powietrzu JA dał najwyższą produkcję biogazu, z dodatkiem $0,000676 \text{ m}^3 \text{ g}^{-1} \text{ TS}$, podczas gdy kiszony JA wykazał najniższą produkcję, z dodatkiem odpowiednio $0,000567 \text{ m}^3$ i $0,000476 \text{ m}^3 \cdot \text{g}^{-1} \text{ TS}$ dla kiszzonego JA w wieku czterech i sześciu miesięcy [Ciccoli i in., 2017].

Odpady komunalne i osady ściekowe - zgodnie z zasadami ochrony środowiska odpady należy również traktować jako potencjalne źródło energii odnawialnej. Jedną z form tej energii jest biogaz. Można go uzyskać ze składowisk odpadów, które zgodnie z prawem powinny mieć instalację do jego wychwytywania, a także produkować z odpadów komunalnych. Obiekty fermentacyjne z odpadów komunalnych mogą produkować biogaz w sposób zorganizowany i kontrolowany. Produktem tego procesu, oprócz energii elektrycznej, ciepła i ewentualnie biometanu, jest również poferment, stosowany jako nawóz. W 2018 r. działało 286 składowisk odpadów komunalnych. Spośród nich 258 było wyposażonych w instalacje odgazowujące, z czego 23 były wyposażone w instalacje odgazowujące z odzyskiem energii cieplnej, a 68 w instalacje odgazowujące z odzyskiem energii elektrycznej [Banasik i in., 2022]. W 2018 r. składowanie gazu składowiskowego wytworzyło $23,57 \text{ GW}_h$ energii cieplnej i $105,356970 \text{ GWh}$ energii elektrycznej w obiektach odgazowujących. Gospodarka odpadami komunalnymi może być jeszcze trudniejsza niż gospodarka odpadami rolniczymi. Ostatnio wielu badaczy skupiło się na znalezieniu sposobu na ich ponowne wykorzystanie, dając im możliwość pełnego wykorzystania ich potencjału energetycznego [Banasik i in., 2022].

Ścieki z młynów oleju palmowego (POME) to ścieki wytwarzane przez działalność związaną z młynami oleju palmowego. Odpady te wymagają nadmiernego oczyszczania przed odprowadzeniem do cieków wodnych, ponieważ są silnie zanieczyszczone i niebezpieczne dla środowiska. Wykorzystanie POME w produkcji biogazu zostało ocenione przez Abdurahmana i in. [Abdurahman i in., 2013] na małą skalę pilotażową. Aby uzyskać wyższą zawartość CH_4 w wytwarzanym gazie, osiągnął zawartość CH_4 na poziomie 79%, stosując ultradźwiękowy system czyszczenia membran, a produkcja biogazu odnotowana w tym badaniu wyniosła 26 790 ($\text{mLCH}_4/\text{L POME}$).

Nazmus i Mamunur [Nazmus i Mamunur, 2022] osiągnęli szybkość produkcji biogazu na poziomie 0,0038 $\text{m}^3/\text{dzień}$, przeprowadzając staranną optymalizację procesu w celu uzyskania biogazu z POME, dostosowując pH, szybkość ładowania organicznego i stosunek węgla do azotu.

Park [Park, 2020; Lozowicka i in., 2016] udowodnił również potencjał tych odpadów do produkcji biogazu, wykorzystując POME i EFB (puste wiązki owoców, inny produkt uboczny przemysłu oleju palmowego) jako substraty dla zakładu fermentacji beztlenowej, stosując alkaliczne wstępne przetwarzanie roztworem żelaza EDTA. Uzyskana jakość gazu była stosunkowo dobra, głównie przy zawartości CH_4 wynoszącej 54%, a produkcja osiągnęła do 0,24 kg CH_4 na kg przetworzonego ChZT. Idąc o krok dalej, zaproponował metodę wzbogacania gazu na paliwo CNG, łącząc ją z jednostką separacji membranowej, uzyskując 98% CH_4 z 90% odzyskiem CH_4 .

Biogaz wytwarzany przez fermentację osadów ściekowych ma stosunkowo stabilną zawartość CH_4 , co przekłada się na stosunkowo wysoką wartość opałową w porównaniu z biogazem rolniczym lub składowiskowym. Gospodarkę biogazem w oczyszczalniach ścieków można postrzegać jako element wpisujący się w koncepcję gospodarki o obiegu zamkniętym UE, ponieważ pozwala ona na zagospodarowanie odpadów (osadów ściekowych) przy jednoczesnym odzyskiwaniu energii, co zmniejsza potrzebę mniej pożądaną utylizacji odpadów poprzez składowanie na wysypiskach [Ignatowicz i in., 2021; Park, 2020]. W 2018 r. około 72 MW_e mocy elektrycznej pochodziło z biogazu z oczyszczalni ścieków 31,86% (wartości dotyczą Polski), w porównaniu do około 102 MW_e pochodzących z biogazu z innych źródeł (głównie biogazu rolniczego i spożywczego) i około 52 MW_e pochodzących z biogazu składowiskowego 23%. Powyższa moc wytwórcza wygenerowała około 337 GWh energii elektrycznej z biogazu z oczyszczalni 28,83%, w porównaniu do około 622 GWh pochodzących z biogazu z innych źródeł (głównie biogazu rolniczego i spożywczego) i około 170 GWh pochodzących z biogazu składowiskowego 14,5%. Produkcja ciepła

z przetworzonego biogazu w Polsce wyniosła ok. 44,48 GW_h 16,4%, w porównaniu do ok. 218,23 GW_h z biogazu z innych źródeł (głównie biogazu z przemysłu rolno-spożywczego) i ok. 8,61 GW_h z biogazu składowiskowego 3,2% [Ignatowicz i in., 2021; Banasik i in., 2022; PIBNASC, 2022].

Obecnie oczyszczanie ścieków komunalnych i obróbka osadów powinny być prowadzone w bardziej ekonomicznych i mniej energochłonnych warunkach, sugerując pracę w naturalnych warunkach otoczenia do 30 °C. Ostatnio, aby pokonać tę przeszkodę, technologia beztlenowego bioreaktora membranowego (AnMBR) została wykorzystana do oczyszczania ścieków komunalnych o niskim ChZT w niskich temperaturach, jak podali Kong i in. [Kong i in., 2020]. Stosując tę technologię na dużą skalę pilotażową, osiągnęli produkcję biogazu $(0,000025 \div 0,000027) \text{ m}^3 \cdot \text{g}^{-1}$ usuniętego ChZT, pracując w temperaturze 25 °C. Porównywalne wyniki uzyskali w swojej pracy Chen i in. [Chen i in., 2020], uzyskując wydajność CH₄ wynoszącą 0,000024 m³ CH₄ (STP)/g usuniętego ChZT w temperaturze mezofilowej i 0,000021 m³ CH₄ (STP)/g usuniętego ChZT w niskiej temperaturze, pomiędzy (5÷15) °C. Inne podejście do rozwiązania problemu niskiej produktywności biogazu z odpadów komunalnych przedstawili Zahedi i in. [Zahedi i in., 2021] w swojej pracy, w której wykorzystali osmozę postępową jako podproces oczyszczania w celu zagęszczenia ścieków. Baba i in. [Baba i in., 2013] wykorzystali surową glicerynę i nadmiar osadu jako źródło N₂ w substratach do produkcji CH₄. Instalacja pilotażowa była reaktorem ciągłym o objętości roboczej 30 m³, który działał przez 1,5 roku przy optymalnym obciążeniu surowym glicerolu wynoszącym 0,0030 m³ dziennie i obciążeniu osadem organicznym (m³/30 m³ osadu na tydzień fermentacji). Stwierdzono, że maksymalna wydajność CH₄ (lub biogazu) wynosiła (141,3 m³ CH₄/30 m³ tydzień) ChZT. Ponadto przy tym współczynniku obciążenia uzyskano wydajność energetyczną wynoszącą 106% energii wejściowej w ciągu jednego roku. Ponadto przetworzony osad zawierał składniki nawozowe, które po zastosowaniu na polach trawiastych zwiększyły plony trawy o 1,2 raza, stąd surowy glicerol jest atrakcyjnym źródłem biologicznym, które może być wykorzystywane zarówno jako surowiec do produkcji CH₄, jak i jako płynny nawóz.

Ebunilo i in. [Ebunilo i in., 2015] zbadali dwie różne próbki odpadów domowych po pocięciu ich na kawałki w celu zwiększenia ich powierzchni, a następnie wymieszaniu ich z wodą w stosunku 1:2, które załadowano do reaktor pilotażowy biogazu. Stwierdzono, że praca reaktora w warunkach mezofilowych prowadzi do szybszego rozkładu substratu w fermentatorze, w którym powstaje biogaz o maksymalnej wydajności CH₄ wynoszącej około 67%.

Ważnym aspektem produkcji biogazu z osadów ściekowych jest proces rozruchu instalacji. Badania w warunkach rzeczywistych przeprowadzili Ignatowicz, Piekarski i Kogut [Ignatowicz i in., 2021], określając wpływ dawkowania wybranych substratów na proces rozruchu biogazowni w warunkach rzeczywistych. Na podstawie wyników analizy przeprowadzonej podczas rozruchu przemysłowej biogazowni z wykorzystaniem wody, gnojowicy, kiszonki kukurydzianej i zaszczepionego osadu można wnioskować, że dawkowanie substratów w postaci kiszonki kukurydzianej jako źródła białka i węglowodanów, stanowiących pożywkę dla bakterii metanogennych zlokalizowanych w zaszczepionym osadzie, powoduje przyspieszenie procesu fermentacji i szybsze osiągnięcie odpowiednich parametrów biogazu. Wraz ze wzrostem masy dozowanej kiszonki kukurydzianej wzrastała szybkość produkcji biogazu. Stężenie CH₄ ustabilizowało się na poziomie (54÷62)%.

Produkcja biogazu jest jedną z najważniejszych i najbardziej obiecujących alternatyw dla zastępowania paliw kopalnych w sposób przyjazny dla środowiska. Wraz z wieloma dostępnymi odnawialnymi źródłami energii, produkcja biogazu zajmuje niezastąpioną pozycję ze względu na niezaprzeczalną dostępność biomasy i konieczność gospodarowania odpadami agro-komercyjnymi. Dlatego naukowcy na całym świecie prowadzą szeroko zakrojone badania w celu opracowania taniej i zrównoważonej produkcji biogazu, która może być wykorzystywana do transportu, wytwarzania energii elektrycznej i ciepła. Sukces tego przedsięwzięcia przyniósłby korzyści środowisku, gospodarce i zrównoważonemu rozwojowi krajów na całym świecie. Badania zidentyfikowały różne zasoby jako surowce do produkcji biogazu, które wykazują wysoki potencjał energetyczny, takie jak obornik i gnojowica, uprawy energetyczne, odpady komunalne i inne. Liczba działających biogazowni rośnie z roku na rok, dając nadzieję, że cel wyznaczony przez rządy zostanie osiągnięty. Jednocześnie stale pojawiają się nowe podejścia w celu znalezienia rozwiązania idealnej technologii dla ekonomicznej i zrównoważonej produkcji biogazu, jej rafinacji i ostatecznie jej eksploatacji. Droga do doskonałości jest jeszcze daleka, ale z pewnością kroki, które już zostały podjęte, są znaczące.

Zgodnie z przyjętą metodologią zawartą w pracy należy wskazać na:

- 1) Udział zużycia substratów do produkcji biogazu rolniczego w 2021 r.: wywar gorzelniczny 18,98%, obornik 16,41%, odpady przemysłu rolno-spożywczego 16,61% oraz pozostałości z przetwórstwa owoców i warzyw 16,20%;

- 2) Produkcja energii elektrycznej z wykorzystaniem biogazu z oczyszczalni ścieków 31,86% (wartości dotyczą Polski w 2018 r.), w porównaniu do biogazu z pozostałych źródeł (głównie biogazu z przemysłu rolno-spożywczego) i biogazu składowiskowego 23%;
- 3) Moce wytwórcze wytworzyły ok. 337 GWh energii elektrycznej z biogazu z oczyszczalni 28,83%, w porównaniu do ok. 622 GWh z biogazu z innych źródeł (głównie biogazu rolno-spożywczego) i ok. 170 GWh z biogazu składowiskowego 14,5%;
- 4) Produkcja ciepła z oczyszczonego biogazu w Polsce, która wyniosła ok. 44,48 GW_{th} 16,4%, w porównaniu do ok. 218,23 GW_{th} z biogazu z innych źródeł (głównie biogazu rolno-spożywczego) i ok. 8,61 GW_{th} z biogazu składowiskowego 3,2%.

5) Praca nr O5

Rośliny, jako główni producenci tlenu (O_2) i rozkładający ditlenek węgla (CO_2) na O_2 i związki organiczne, są niezbędne do istnienia wszystkich rodzajów flory na Ziemi. Tworzą naturalne siedliska dla większości zwierząt, zarówno na lądzie, jak i w środowisku wodnym. Ważną rolą roślinności jest ochrona powierzchni gleby przed bezpośrednim działaniem deszczu i gradu, które rozbijają agregaty glebowe i zmywają i unoszą cząstki gleby (erozja wodna), a także przed wiatrem (erozja wietrzna). Ponadto korzenie roślin pobierają składniki odżywcze i przenoszą je z głębszych warstw do górnych warstw gleby [Tomicka, 1995].

Jednym z niezwykłych aspektów współczesności jest powrót do technologii związanej z epoką pierwotną. Jest to związane z wykorzystaniem roślin jako źródeł energii. Obecna sytuacja na rynku paliw kopalnych doprowadziła do poważnych problemów środowiskowych wynikających z zanieczyszczenia powietrza. Dodatkowymi elementami zwracającymi uwagę na alternatywne źródła energii są malejące rezerwy tych paliw dostępne dla działalności człowieka i związane z tym rosnące koszty ich eksploatacji. Dużą zaletą roślin jako źródeł energii jest ich rozwój związany z wykorzystaniem CO_2 do wzrostu i uwalnianiem O_2 . Z tego wynika, że rośliny mogą być nie tylko źródłem materiałów energetycznych, ale mogą również wykorzystywać CO_2 uwalniany podczas produkcji energii. Problemem jest dobór roślin, które wykazują szybką produkcję biomasy wykorzystywanej w późniejszych etapach przetwarzania na produkcję energii.

Te rośliny mogą być uprawiane na obszarach, gdzie gleba jest poważnie zdegradowana z dwóch głównych powodów: po pierwsze, ponieważ nie są hodowane w celu spożycia, a po drugie, ponieważ wykazują szybszy wzrost biomasy i mają niskie wymagania glebowe.

Biomasa jest najstarszym i najszerzej stosowanym odnawialnym źródłem energii, które obejmuje całą istniejącą materię organiczną na Ziemi, taką jak wszystkie substancje pochodzenia roślinnego lub zwierzęcego — biodegradowalne. Biomasa to również pozostałości z produkcji rolnej, pozostałości leśne oraz odpady przemysłowe i komunalne [Widrex, 2021].

Biomasa jest trzecim co do wielkości naturalnym źródłem energii na świecie. Zgodnie z definicją Unii Europejskiej biomasa to biodegradowalne frakcje produktów, odpadów i pozostałości z rolnictwa (w tym substancji roślinnych i zwierzęcych), leśnictwa i pokrewnych gałęzi przemysłu, a także biodegradowalne frakcje odpadów przemysłowych i komunalnych [Directive, 2001]. Każdą roślinę można suszyć i palić, jednak nie każda należy do grupy roślin energetycznych. Rośliny energetyczne to takie, których spalanie jest

opłacalne. Uprawa tych roślin nie powinna być skomplikowana ani kosztowna, gdyż energia z nich wytworzona byłaby zbyt droga. Plantacje roślin energetycznych muszą uzyskiwać wysokie plony przy niskich kosztach [Green, 2021]. Podobnymi cechami charakteryzują się rośliny energetyczne. Wyróżnia je szybki wzrost i wysoki plon biomasy, w tym gatunki jednoroczne i wieloletnie [Bartnikowska i Frankowski, 2017]. Rośliny energetyczne przetwarzane są głównie na biopaliwa stałe i biokomponenty, a wysoka wartość kaloryczna sprawia, że są bardzo atrakcyjnym surowcem do produkcji energii elektrycznej i ciepła [Artyszak, 2015]. Rośliny energetyczne mają szereg wymagań co do warunków glebowych. Jedną z najważniejszych rzeczy, które należy sprawdzić przed zainwestowaniem w plantację, jest odczyn pH gleby. Wartość pH powinna mieścić się w przedziale (5,5÷7,5). Ponadto rośliny energetyczne wymagają również odpowiedniego nawadniania gleby. Oba te czynniki znacząco wpływają na wydajność i ogólny stan plantacji. Omawiana grupa roślin polecana jest również na gleby zanieczyszczone metalami ciężkimi. Gromadząc zanieczyszczenia w systemie korzeniowym, oczyszczają glebę z niepożądanych elementów. Zebrane szkodliwe związki nie wnikają do zielonej części rośliny, dzięki czemu podczas procesu spalania zanieczyszczenia nie przedostają się do środowiska naturalnego [Stańczyk i Ludwik, 2003]. Biomasa pochodząca z roślin energetycznych jest powszechnie uważana za alternatywne źródło energii [Frankowski, 2017a]. Uważa się, że jej wykorzystanie na cele energetyczne stanowi znacznie mniejsze obciążenie dla środowiska w porównaniu z paliwami kopalnymi. Chociaż do jej produkcji i przetwarzania na biopaliwo wymagana jest energia, szacuje się, że negatywny wpływ jest znacznie mniejszy niż w przypadku wydobywania i późniejszego rafinowania ropy naftowej lub eksploatacji złóż węgla kamiennego. Wynika to głównie z absorpcji CO₂ przez rośliny w trakcie ich wzrostu. Eliminuje to ogólną równowagę wpływu jej późniejszego wykorzystania na ekosystem. Szybki wzrost biomasy, zwłaszcza zielonej masy roślin energetycznych, sprawia, że jest ona odnawialnym zasobem w porównaniu z paliwami kopalnymi [Kuś i Matyka, 2010; Wałowski, 2020]. Wskazując na lukę badawczą (kryteria oceny), zaproponowano przedstawienie aktualnej sytuacji, problemów i perspektyw pozażywnościowego rolnictwa energetycznego.

Mechanizmu wpływu parametrów produkcji upraw energetycznych zaprezentowano w publikacji nr **O5**:

Dybek, B.; Anders, D.; Hołaj-Krzak, J.T.; Hałasa, Ł.; Maj, G.; Kapłan, M.; Klimek, K.; Filipczak, G.; Wałowski, G. Assessment of the Prospects of Polish Non-Food Energy

Agriculture in the Context of a Renewable Energy Source. *Energies* 2023, 16, 3315.
<https://doi.org/10.3390/en16083315>.

Celem pracy była ocena perspektyw polskiego rolnictwa energetycznego nieżywnościowego w kontekście odnawialnych źródeł energii. Podjęto próbę ustalenia warunków produkcji i opłacalności materiałów pochodzenia biologicznego do spalania w podziale na trzy grupy:

- I. Materiały odpadowe;
- II. Materiały będące produktami ubocznymi;
- III. Produkty roślinne celowo uprawiane na cele energetyczne.

W pracy opisano:

- Drewnio odpadowe;
- Słoma;
- Zboża (kukurydza – szczegółowo przykład opisano w O5, sorgo, owies, żyto);
- Rośliny energetyczne (słonecznik bulwiasty – szczegółowo przykład opisano w O5, rdestowiec sachaliński, śláz pensylwański, miskant, spartina preriowa, kanar trzciniowy, proso rotacyjne, perz zwyczajny).

Do oceny perspektyw polskiego rolnictwa energetycznego przyjęto następujące kryteria:

- Pochodzenie biologiczne;
- Właściwości fizykochemiczne materiałów (popiół, wilgotność, substancje łatwopalne, substancje lotne);
- Bilans zasobów (plon, warianty nawożenia);
- Charakterystyka energetyczna surowców (zawartość energii, produkcja energii, wartość energetyczna, ciepło spalania, wartość opałowa, zużycie paliwa);
- Zależność terytorialna wpływająca na produkcję biomasy.

Zboża to grupa roślin zajmująca największe arealy gruntów ornych na świecie. Są podstawowym źródłem pożywienia dla większości ludzi. Termin „zboża” jest używany do opisywania gatunków należących do rodziny wiechlinowatych. Ich nasiona charakteryzują się wysoką zawartością skrobi. Najpopularniejszymi produktami przetwórstwa ziaren zbóż są mąki, kasze, oleje i syropy. Są one również wykorzystywane w różnych gałęziach przemysłu, takich jak browarnictwo, gorzelnictwo, farmaceutyka i produkcja pasz [Frankowski, 2017b]. Kukurydza zwyczajna *Zea mays* L. to roślina pochodząca z Ameryki Środkowej [Guzenda i Świgoń, 1997]. Kukurydza pozostaje dominującym źródłem pożywienia w wielu częściach świata. Dostarcza pożywienia 1,2 miliarda ludzi, głównie z krajów Ameryki Łacińskiej

i Afryki. W innych miejscach, np. w USA, tylko około (2÷3)% produkcji tej rośliny jest przeznaczone do bezpośredniego spożycia przez ludzi.

Na całym świecie około 116 milionów Mg kukurydzy jest wykorzystywane do bezpośredniego spożycia przez ludzi, z czego 30% w Afryce i 21% w krajach subsaharyjskich. Najwyższe spożycie na mieszkańca występuje w Lesotho (kraj Afryki Południowej) i wynosi $174 \text{ kg} \cdot \text{rok}^{-1}$ na osobę. Kukurydza stanowi (15÷20)% całkowitej dziennej liczby kalorii w diecie 20 krajów rozwijających się, położonych głównie w Ameryce Łacińskiej i Afryce.

Jako główne źródło skrobi, oleju jadalnego i glutenu, kukurydza jest wykorzystywana w wielu potrawach poprzez gotowanie lub smażenie oraz we wszelkiego rodzaju procesach produkcji żywności. Kukurydza zapewnia 90% zapotrzebowania na skrobię w USA [Corn, 2021].

Kolby zbiera się w stanie tzw. dojrzałości mlecznej, gdy nasiona są miękkie i zawierają więcej cukrów. Okres zbiorów trwa od sierpnia do września. Kolby łatwo odrywają się od łodygi, a liści nie należy usuwać z kolb. Tylko odmiany Puławska, Ryzowa i Bąkowska, które są odmianami kukurydzy pękającej, zbierane są w pełni dojrzałe (tzw. woskowe). Następnie są suszone, a nasiona obierane z kolby.

Kukurydza najlepiej rośnie na piaszczystych glinach lub piaskach gliniastych. Nie sprawdza się na glebach ciężkich, podmokłych i piaskach. Gleby o pH poniżej 6 wymagają wapnowania [Działkowiec, 2021].

Odmiany wyhodowane na przestrzeni wieków najczęściej klasyfikuje się według kształtu ziarna. Ze względu na przewagę form mieszańcowych w uprawie często nie reprezentują one czystej formy pierwotnej, lecz są typami pośrednimi. Na cele energetyczne wykorzystuje się głównie mieszańce kukurydzy szklistej, tj. flint i końskiego zęba, tj. dent [Kołodziej i Matyka, 2012].

Wszystkie odmiany tego gatunku są dwupienne i jednopienne. Wytwarzają silne, grube łodygi dochodzące do 3 m wysokości. Zwieńczone są wiechą, która jest męskim kwiatostanem. Kwiatostan żeński ma kształt kolby. Rozwija się mniej więcej w środku łodygi, na końcu skróconego bocznego rozgałęzienia, zwanego dobotem. Kukurydza zwykle nie rozmnaża się, ponieważ jest to niepożądana cecha w uprawie, co utrudnia wykonywanie zabiegów agrotechnicznych [Czeczko, 2023]. Jako roślina z fotosyntezą C4 [Frankowski, 2017b] gospodaruje wodą dość oszczędnie. Jednak ze względu na dużą produkcję biomasy ma duże zapotrzebowanie na wodę. Okres kwitnienia roślin jest pod tym względem szczególnie krytycznym momentem [Burczyk, 2012].

W Polsce głównym czynnikiem wpływającym na efektywność uprawy kukurydzy są warunki wilgotnościowe. Kształtują się one wyłącznie pod wpływem ilości opadów i ich rozkładu w okresie wegetacji, ponieważ plantacje nie są nawadniane. Jest to jednak zmienne, niezależne od rolnika, wysokie wymagania termiczne kukurydzy można łatwo zminimalizować, dobierając odpowiednie odmiany. Na uwagę zasługują odmiany o większej odporności na zimno i krótkim okresie wegetacji [Kołodziej i Matyka, 2012; Podkówa i Podkówa, 2010; Podkówa, 2007].

Ze względu na zróżnicowane warunki środowiskowe panujące w Polsce istnieje region uprawy kukurydzy. Duża liczba dostępnych odmian powoduje, że w celu uzyskania optymalnych plonów dla danego miejsca i celu uprawy odmiany dobiera się na podstawie ich numeru FAO, czyli klasy wczesności [Czeczko, 2023].

Liczba FAO mieści się w przedziale (100÷1.000). Im niższa ta liczba, tym dana odmiana jest wcześniejsza, czyli jej okres wegetacji od siewu do zbioru na ziarno jest krótszy [Lipski, 2016]. Na Dolnym Śląsku, w Wielkopolsce, na Mazowszu i Lubelszczyźnie pełną dojrzałość ziarnistą osiągają odmiany wczesne, średniowczesne i średniopóźne (250÷290) FAO. W południowej części kraju uprawia się również późne odmiany FAO (300÷350) na potrzeby biogazowni [Michalski, 2008]. Na podstawie doświadczeń przeprowadzonych w okolicach Rawicza w Stacji Doświadczalnej Stary Sielec Instytutu Włókien Naturalnych i Roślin Zielarskich stwierdzono, że kukurydza średniowczesna odmiany „Opoka”, uprawiana w plonie wtórnym na cele potoczne, jest również wydajna i opłacalna. Kilkuletnie badania terenowe wykazały, że w ten sposób można uzyskać 26 Mg·ha⁻¹ suchej masy (s.m.) kukurydzy przy wydajności biogazowej ok. 11.000 m³·ha⁻¹ [Burczyk, 2012]. Na cele energetyczne stosuje się dwie technologie uprawy kukurydzy: kiszonkową lub zbożową. Kiszonkę z całych roślin uzyskuje się w technologii kiszonkarskiej. Dlatego kukurydzę zbiera się zazwyczaj w jednym etapie, a biomasa rozdrabnia się na drobne kawałki. Po zakiszeniu staje się substratem do produkcji biogazu. Z drugiej strony, stosując technologię zbożową, można uzyskać kilka produktów: ziarno suche lub kiszonkowe, kiszonkę zbożową z dodatkiem rdzeni kolb (CCM, mieszanka kolb kukurydzy), kiszonkę z rozdrobnionych kolb właściwych, kiszonkę z kolb zebranych z okrywową warstwą liści (LKS, z niemieckiego Lieschkolben Schrott) [Michalski, 2002; Michalski, 2007].

Z 1 Mg kukurydzy można wyprodukować średnio ok. 400 l etanolu. Ponadto ta sama ilość słomy stanowi substrat do produkcji do 700 m³ biogazu, w tym do 450 m³ CH₄. Rdzenie można również wykorzystać na cele energetyczne, ponieważ ich wartość kaloryczna jest

zbliżona do parametrów słomy. Z tego powodu kukurydza jest dobrym surowcem do przetwarzania jej energii [Frankowski i Burczyk, 2016].

Kukurydza ma jedną z najwyższych wartości ekstrakcji gazu w przeliczeniu na Mg. Odmiany o wysokiej zawartości suchej masy mogą dać 60 Mg świeżej masy z hektara i 6.000 m³ CH₄ z hektara, wykorzystywanego głównie do produkcji energii [Wałowski, 2020].

Plony roślin energetycznych są bardzo zróżnicowane i wahają się od kilku do kilkudziesięciu Mg suchej masy z hektara rocznie [Szczukowski i in., 1998]. Szacuje się, że w warunkach polskich możliwe jest uzyskanie około 10 Mg roślin energetycznych z hektara gruntów ornych. Według Stankiewicza [Stankiewicz, 2010] wartość energetyczna z takiej ilości biomasy jest porównywalna z wartością 5 Mg węgla kamiennego. Przed zainwestowaniem w plantację istotne jest dokonanie właściwego doboru gatunków roślin, które będą uprawiane. Faber i in. [Faber i in., 2009] proponuje dowiedzieć się o optymalnych warunkach glebowo-klimatycznych, technologii uprawy danej rośliny oraz aktualnych wymaganiach elektrowni co do jakości biomasy.

Karczoch zwyczajny *Helianthus tuberosus* L., potocznie zwany słonecznikiem bulwiastym, należy do rodziny astrowatych. Roślina ta wyróżnia się spośród innych roślin energetycznych właściwościami, które pozwalają na bardziej efektywne wykorzystanie energii promieniowania słonecznego, przekształcając ją w substancję organiczną [Góral, 1999]. W trakcie wzrostu osiąga wysokość około 4 m. Roślina ta ma szerokie zastosowanie. Bulwy słonecznika bulwiastego wykorzystywane są m.in. do produkcji bioetanolu. Szacuje się, że ze 100 kg bulw można uzyskać około 10 l spirytusu [Bartnikowska i Frankowski, 2017]. Najczęściej jednak wykorzystuje się go w przemyśle spożywczym ze względu na wysoką zawartość inuliny. Składnik ten jest dobrym substratem do produkcji słodyczy i syropów. Słonecznik bulwiasty był jednym z pierwszych źródeł pożywienia dla ludzi i zwierząt. Roślina ta, w trakcie uprawy, wpływa również pozytywnie na środowisko. Posiada właściwości umożliwiające rekultywację zdegradowanych terenów. Jest również wykorzystywana jako substrat do produkcji biopaliw stałych. Słonecznik bulwiasty jest często rośliną z wyboru ze względu na bardzo niskie wymagania klimatyczne. Charakteryzuje się wysokim plonem: dla łodyg plon wynosi (10÷20) Mg s.m.·ha⁻¹, a dla bulw plon sięga 40 Mg s.m.·ha⁻¹ [Rokosz, 2010]. Najlepszy czas na założenie plantacji to jesień lub wczesna wiosna. Ze względu na wysoką zawartość inuliny słonecznik bulwiasty dobrze znosi niskie temperatury [Mystkowska i in., 2015]. Bulwy należy sadzić głęboko (5÷10) cm w zależności od pory roku – głębiej jesienią, zachowując wymagany odstęp między rzędami wynoszący

(0,7÷1,0) m. Odległość między sadzeniakami w danym rzędzie powinna wynosić (0,5÷0,6) m [Ochmańska i Jaroszewski, 2009].

Byliny, których części nadziemne zasychają po zakończeniu sezonu wegetacyjnego, charakteryzują się wysoką zawartością suchej masy bez konieczności ich suszenia. Cecha ta dotyczy również słonecznika bulwiastego i jest jedną z jego zalety. Próbkę części nadziemnych pobrane po zakończeniu wegetacji i wysuszone w stanie naturalnym charakteryzowały się wilgotnością (20÷25)%, przy wilgotności 9,6% w stanie analitycznym. Wilgotność ta, określana jako powietrznosucha, charakteryzuje biomasę przechowywaną w pomieszczeniu, przeznaczoną do spalania lub wstępnego przetworzenia w granulaty brykiety lub pelety [Kowalczyk-Juśko i Cholewińska, 2023].

Ciepło spalania biomasy topinamburu w stanie analitycznym wynosiło $15,64 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Wartość opałowa i ciepło spalania zależą przede wszystkim od składu chemicznego i wilgotności materiału. Wartość opałowa suchej słomy mieści się w sto-sunkowo wąskim przedziale ($14\div 15$) $\text{MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ i zależy przede wszystkim od rodzaju rośliny. Dla porównania wartość opałowa węgla waha się od $18,8 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ do $29,3 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ [Grzybek i in., 2001]. W badaniu Sawickiej [Sawicka, 2010] średnia wartość ciepła spalania słonecznika bulwiastego wynosiła $15,6 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, przy wahaniach od $14,8 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ do $16,4 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$. Z kolei Majtkowski [Majtkowski, 2007] określił ciepło spalania biomasy słonecznika bulwiastego o wilgotności 20% na ok. $15 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$, natomiast Kościk [Kościk, 2007] uzyskał wartość $14,9 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ (w stanie mokrym), a $18,0 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ w stanie suchym. Wartość opałowa biomasy topinamburu o wilgotności 15% określona przez Piskra [Piskier, 2006] wynosiła $15,9 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Biorąc pod uwagę materiały biologiczne przeznaczone do spalania, wskazano:

- 1) W obrębie pierwszej grupy materiałów występuje duże zróżnicowanie pod względem przydatności energetycznej i stopnia trudności przetworzenia na cele spalania. Liście, igły i trawa z trawników, mimo że mają stosunkowo wysoką wartość energetyczną, są często bardzo zanieczyszczone. Ich wilgotność jest również zmienna, ale zazwyczaj bardzo wysoka. Grupa I jest wolna od potencjalnych obaw związanych z ograniczeniami ich wykorzystania na cele energetyczne. Leśnicy starają się jednak zwiększyć ich udział w dopływie biomasy do gleb leśnych. Wartość energetyczna zrębków drzewnych po wysuszeniu wynosi około $17 \text{ MJ}\cdot\text{kg}^{-1}$ [Kaszkowiak i Kaszkowiak, 2016]. Koszt pozyskania liści zależy od stopnia zmechanizowania ich zbioru i wzrasta wraz z zaangażowaniem bardziej technicznych środków. Zawartość kaloryczna liści jest

zróżnicowana w zależności od gatunku i stopnia zanieczyszczenia i waha się od 10 do 17 MJ·kg⁻¹ [Szul, 2013].

- 2) Drugą grupę surowców stanowi głównie słoma zbożowa i rzepakowa. Materiały te są wykorzystywane zarówno do spalania w niskiej gęstości (kostki z pras tradycyjnych), głównie przez gospodarstwa indywidualne, jak i w postaci bel walcowych i wielkogabarytowych bel kwadratowych. Przeprowadzone badania i doświadczenia producentów [Kaszkowiak i Kaszkowiak, 2016] wskazują na celowe stosowanie uproszczonych, niskokosztowych technologii z ograniczonym nawożeniem i ograniczonym stosowaniem środków ochrony roślin. Dzięki temu sposób uprawy na glebach lekkich można uznać za korzystny, gdyż plon słomy rzepakowej z 1 ha powinien mieścić się w granicach (2÷5) Mg·ha⁻¹ — realne wydaje się przyjęcie wartości 2,5 Mg·ha⁻¹. Przy założonej wydajności i pracy dwuzmianowej wydajność linii peletyzującej lub brykietującej powinna wynosić ok. 500 kg·h⁻¹. Parametry peletów i brykietów ze słomy traw i trocin wykazują dużą stabilność właściwości. Zazwyczaj wartość kaloryczna oscyluje w granicach (15÷20) MJ·kg⁻¹, a wilgotność mieści się w granicach (6÷10)%. W polskich warunkach klimatycznych możliwe jest wykorzystanie tych materiałów na cele energetyczne, natomiast pozostała słoma kukurydziana pozostaje po uprawie kukurydzy na ziarno, której wykorzystanie na cele paszowe jest nieefektywne. Duża masa słomy kukurydzianej (10 Mg DM·ha⁻¹) i jej stosunkowo wysoka wartość energetyczna (ok. 15 MJ·kg⁻¹ [GUS, 2013]) sprawiają, że jest ona atrakcyjnym surowcem energetycznym.
- 3) Do trzeciej grupy surowców zalicza się wyżej wymienione uprawy, w szczególności zboża przeznaczone do spalania w postaci całych roślin lub części plonu, np. samo ziarno, plewy, łuski i słoma z domieszką zebranych chwastów. Metoda ta jest szczególnie przydatna w przypadku ziarna niskiej jakości, produkowanego w uprawach niskonakładowych. Uprawa zbóż na cele energetyczne może być alternatywą dla ugorów, podobnie jak uprawa specjalistycznych roślin energetycznych. Ich uprawa w Polsce na ogół nie ma tradycji, a producenci nie mają specjalistycznego sprzętu do ich zbioru i uprawy ani doświadczenia w ich uprawie. Często rośliny te nie są również w pełni tolerancyjne na polski klimat. Uprawa roślin na cele energetyczne może być bezpieczna. Spalanie całych zbóż jest problematyczne technicznie, ponieważ podobnie jak słoma są to materiały o niskiej gęstości. Wyjątkiem jest ziarno, którego gęstość zmienia się stosunkowo mało podczas brykietowania lub peletowania. Ziarno można spalać zarówno w małych piecach zaadaptowanych z pieców na ekogroszek, jak i w postaci zagęszczonej.

- 4) Wykorzystanie odnawialnych źródeł energii znacząco ogranicza szkodliwy wpływ energetyki na środowisko naturalne, głównie poprzez redukcję emisji szkodliwych substancji, zwłaszcza gazów cieplarnianych [Portal, 2023]. W latach 2011÷2019 nastąpił bardzo łagodny spadek ilości produkowanej energii w UE.
- 5) Najwyższe wskaźniki ilości energii pozyskiwanej z biogazowni na jednostkę powierzchni w Polsce odnotowano w województwach: warmińsko-mazurskim, wielkopolskim, zachodniopomorskim i mazowieckim.
- 6) W skali Polski problemem jest nieefektywne wykorzystanie potencjalnie dostępnych gruntów pod uprawę w celu pozyskania biomasy.

6) Praca nr O6

Układy kogeneracyjne oparte na produkcji ciepła i energii elektrycznej są standardowym wyposażeniem instalacji biogazowych, w których oprócz produkcji energii elektrycznej z biomasy występuje również zapotrzebowanie na ciepło procesowe [Thilak Raj i in., 2011]. W przypadku układów konwencjonalnych produkujących wyłącznie energię elektryczną możliwe jest uzyskanie jedynie (30÷35)% energii dostarczonej w paliwie. W przypadku układów konwencjonalnych produkujących wyłącznie energię elektryczną możliwe jest uzyskanie jedynie (30÷35)% energii dostarczonej w paliwie. Cykl Braytona, znany również jako cykl Joule'a, został opracowany po raz pierwszy do zastosowania w silniku tłokowym z wtryskiem paliwa około 1870 roku. Obecnie jest jednak szeroko stosowany jedynie w silnikach turbinowych o obiegu otwartym i zamkniętym. Gaz turbinowy zazwyczaj pracuje w obiegu otwartym ze świeżym powietrzem o temperaturze atmosferycznej w warunkach ssania sprężarki. Jednak gazy spalinowe opuszczają turbinę gazową (zamiast do niej wracać) i przedostają się do atmosfery. Obieg otwarty turbiny gazowej można modelować jako obieg zamknięty turbiny gazowej, w którym substancją roboczą jest powietrze zasysane do sprężarki. Spaliny opuszczające turbinę gazową ogrzewają wymiennik, gdzie oddają ciepło do powietrza atmosferycznego, osiągają warunki początkowe i są ponownie wprowadzane do obiegu w następnym cyklu. Taki idealny cykl, w którym substancja robocza (powietrze) przepływa w zamkniętej pętli, nazywany jest idealnym cyklem Braytona. Stąd cykl Braytona jest idealnym cyklem energetycznym składającym się z turbiny gazowej składającej się z dwóch procesów izentropowych i dwóch procesów izobarycznych. Cykl Rankine'a z drugiej strony jest idealnym cyklem energetycznym składającym się z turbiny parowej — powszechnie stosowanej we wszystkich elektrowniach parowych. Cykl wykorzystuje wodę jako substancję roboczą, zmieniając jej fazę z cieczy w parę i z pary w ciecz w trakcie cyklu. Dlatego cykl ten jest również znany jako cykl zasilania parą. Idealny system cyklu Rankine'a składa się z czterech podstawowych elementów (urządzeń): kotła, turbiny parowej, skraplacza i pompy. Idealny cykl Rankine'a składa się z czterech różnych procesów, mianowicie dwóch procesów izentropowych i dwóch procesów izobarycznych [Luintel, 2016; Cengel i Boles, 2018; Kumar, 2009; Rajput, 2010]. Odzysk ciepła oznacza, że potencjał układu pozwala na odzyskanie 80% energii zawartej w paliwie, (30÷35)% energii elektrycznej i (45÷50)% energii cieplnej. Straty energii w tym przypadku ograniczają się do (15÷20)%. Sprawność elektryczna jest definiowana jako iloraz wytworzonej energii elektrycznej podzielonej przez ilość energii zawartej w paliwie. Z kolei

sprawność energetyczna układu kogeneracyjnego to iloraz sumy ilości wytworzonej energii elektrycznej i ciepła do energii zawartej w paliwie [Onowwiona i Ugursal, 2006].

Metodę energetyki prosumenckiej dla jednostki kogeneracyjnej zasilanej biogazem, umożliwiając efektywny tryb pracy mikroinstalacji zaprezentowano w publikacji nr **O6**:

Jarosz, Z.; Kapłan, M.; Klimek, K.; **Dybek, B.**; Herkowiak, M.; Wałowski, G. An Assessment of the Development of a Mobile Agricultural Biogas Plant in the Context of a Cogeneration System. Appl. Sci. 2023, 13, 12447. <https://doi.org/10.3390/app132212447>

Celem pracy było przedstawienie przykładów układów kogeneracyjnych, które są standardowym wyposażeniem instalacji biogazowych, opartych na produkcji ciepła i energii elektrycznej. Wykazano, że w przypadku mikrogeneracji kluczowe znaczenie ma łatwość serwisowania i niskie koszty instalacji. Wskazano charakterystyczne aspekty opracowywania koncepcji instalacji mobilnych (małej skali) produkujących biogaz, często o prostej konstrukcji kontenerowej, gotowej do umieszczenia w infrastrukturze gospodarczej przemysłu rolnego. Przedstawiono zalecenia dotyczące eksploatacji modeli mikrobiogazowni, które mają największy wpływ na celowość wykorzystania odpadów rolniczych na cele energetyczne. Wybrano charakterystyczne gospodarstwo rolne, w którym znajduje się substrat niezbędny do przeprowadzenia procesu fermentacji metanowej gnojowicy z hodowli trzody chlewnej. Przeanalizowano kogenerator, który stanowi potencjalne zapotrzebowanie na energię z punktu widzenia polskiego rolnictwa w kontekście produkcji energii odnawialnej.

Celem badań było dostosowanie kogeneratora do warunków występujących w gospodarstwie rolnym, które powinno spełniać oczekiwania techniczno-technologiczne w zakresie zagospodarowania powstającego CH₄ o wartości 80% w biogazie rolniczym. Zakres prac obejmował podjęcie próby określenia warunków pracy kogeneratora i opracowanie optymalizacji biogazowej jednostki kogeneracyjnej produkującej energię elektryczną i ciepło w mikroinstalacji na potrzeby indywidualnego gospodarstwa rolnego. Wybrano charakterystyczne gospodarstwo, w którym występuje substrat niezbędny w procesie fermentacji metanowej gnojowicy z chowu trzody chlewnej. Analizie poddano kogenerator, który stanowi potencjalne zapotrzebowanie na energię z punktu widzenia polskiej energetyki i rolnictwa w kontekście produkcji energii odnawialnej.

Optymalizacja dotyczyła agregatu kogeneracyjnego na biogaz wykorzystującego:

- a) Zaawansowany sterownik Woodward serii easYgen 2500/easYgen 2800 (z automatyczną synchronizacją jednostki kogeneracyjnej z siecią publiczną);
- b) System zasilania biogazem niskociśnieniowym (z reduktorem ciśnienia zerowego i elektrozworem odcinającym niskiego napięcia);
- c) Przepustnica zintegrowana z siłownikiem elektronicznym i mieszalnikiem oraz regulacją mieszanki gazowo-powietrznej;
- d) Sterownik silnika gazowego z wbudowanym modułem Woodward PG+;
- e) System grzewczy z płytowym wymiennikiem ciepła i 3-drożnym zaworem kulowym sterującym;
- f) Zdalny monitoring i wizualizacja parametrów pracy jednostki kogeneracyjnej w lokalnej sieci LAN/WiFi.

Optymalizacja zapewniła autonomiczną pracę agregatu kogeneracyjnego bez stałego nadzoru nad zmianami ustawień parametrów przez indywidualne gospodarstwo rolno-hodowlane jako użytkownika.

Lokalna archiwizacja parametrów i stanów pracy agregatu kogeneracyjnego. Po zastosowaniu interfejsu RS-485/LAN i mostka, zaawansowany sterownik Woodward serii easYgen 2500/easYgen 2800 oraz sterownik pracy silnika gazowego z wbudowanym modułem Woodward PG+ umożliwiają lokalną archiwizację parametrów i stanów pracy agregatu kogeneracyjnego na wybranym komputerze PC (wraz z oprogramowaniem) i/lub serwerze NAS w lokalnej sieci LAN/WiFi indywidualnego gospodarstwa; zapotrzebowanie na energię ciepłą ze zbiornika fermentacyjnego wymagało kłopotliwej zmiany ustawień w celu zapewnienia ciągłego chłodzenia silnika agregatu kogeneracyjnego.

Biogaz jest paliwem odnawialnym o korzystnych właściwościach i parametrach, umożliwiających jego szerokie zastosowanie w praktycznie każdej dziedzinie gospodarki. Biogaz jest paliwem produkowanym lokalnie, najczęściej z surowców pozyskiwanych w pobliżu, i jest nośnikiem energii, który pozostawia stosunkowo niewielki ślad węglowy [Klimek, i in., 2021].

Zainteresowanie przemysłu rolnego produkcją biogazu na małą skalę pozwoliło firmom projektowym na opracowanie koncepcji prosumenckiej instalacji mobilnych, często o prostej konstrukcji kontenerowej, gotowej do umieszczenia w infrastrukturze gospodarczej. Projektowanie konkretnej mikro-biogazowni odbywa się zasadniczo indywidualnie dla każdego gospodarstwa. Dotychczas zrealizowane biogazownie charakteryzują się dużą różnorodnością — zarówno pod względem zainstalowanego sprzętu, ilości produkowanego biogazu, jak i pozyskiwanej z niego energii.

Główną ideą gospodarki o obiegu zamkniętym jest oddzielenie wzrostu gospodarczego od zużycia zasobów i wpływu na środowisko. Charakterystyczne podejście gospodarki o obiegu zamkniętym zakłada minimalizację ilości odpadów generowanych na poziomie projektu i zazwyczaj obejmuje innowacje w całym łańcuchu wartości. Odpowiednie gospodarowanie odpadami jest niezbędne nie tylko do zapewnienia zdrowych warunków życia, ale także do łagodzenia zmian klimatycznych. W związku z tym trwają badania nad opracowaniem strategii zwiększających cyrkularność systemów gospodarki odpadami. W tym kontekście dwa strumienie odpadów są zarządzane jednocześnie w celu odzyskiwania energii i materiałów w niniejszym badaniu. Konkretnie, rzeczywisty odciek zebrany z pełnowymiarowego dojrzałego składowiska odpadów został wstępnie oczyszczony poprzez aktywną filtrację w celu częściowego usunięcia substancji hamujących, a następnie przetestowany w skali laboratoryjnej jako roztwór odżywczy do półciągłej fermentacji beztlenowej substratu węglowego reprezentowanego przez odpady rynkowe. Wyniki pokazują, że przy wskaźniku obciążenia organicznego $1,0 \text{ gVS} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$ proces był niemożliwy bez użycia roztworu odżywczego, podczas gdy azot obecny w wstępnie oczyszczonym odcieku mógł zrównoważyć zawartość węgla w odpadach rynkowych i zapewnić systemowi niezbędną pojemność buforową, zapewniając stabilność procesu. Średnia wydajność CH_4 (około $0,29 \text{ NL} \cdot \text{gVS}^{-1}$) była zadowalająca i zgodna z literaturą. Pomimo zwiększenia zarówno wskaźnika obciążenia organicznego (do $1,5 \text{ gVS} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$), jak i objętości dodanego wstępnie oczyszczonego odcieku (do 100% medium rozcieńczającego), proces pozostał stabilny przy nieco niższej wydajności CH_4 wynoszącej $0,21 \text{ NL} \cdot \text{gVS}^{-1}$, dzięki suplementacji azotem. Potencjalne wykorzystanie wytworzonego CH_4 jako odnawialnego źródła energii i pozostałości pofermentacyjnych jako nawozu zamknęłoby pętlę zarządzania tymi strumieniami odpadów [Tamagnini i in., 2002].

Zastosowana metoda pozwoliła na określenie, w warunkach pracy kogeneratora, rozwoju optymalizacji biogazowej jednostki kogeneracyjnej produkującej energię elektryczną i ciepło w mikroinstalacji na potrzeby indywidualnego gospodarstwa rolnego.

Biorąc pod uwagę przeprowadzone badania eksperymentalne, wskazano, co następuje:

- 1) Ocenę wpływu ilości biogazu na poziom emisji CO , NO , NO_2 i PM prowadzono przy stałej prędkości obrotowej silnika dla różnych poziomów obciążenia, a udział biogazu zmieniał się od 40 do około (70÷80)%, tj. do momentu wykrycia wyraźnego spalania stukowego w badanym silniku;
- 2) Badany silnik spalinowy pracował przy stałej prędkości obrotowej $2000 \text{ obr./min} \pm 30 \text{ obr./min}$, która była regulowana nastawami pompy wtryskowej i regulowana za pomocą

- regulatora pompy wtryskowej w zależności od obciążenia silnika generowanego przez układ kontrolno-pomiarowy silnika asynchronicznego;
- 3) Istniejący układ sterowania i regulacji pracą jednostki kogeneracyjnej nie spełnia zmienionych wymagań Instrukcji Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (IRiESD) krajowych operatorów sieci dystrybucyjnych (OSD), w tym IRiESD obowiązującej Operatora ENEA, tj. OSD właściwego dla odbiorców w Ocieszynie;
 - 4) Nie zapewnia automatycznej synchronizacji (dane potwierdzone przez producenta) jednostki kogeneracyjnej z siecią publiczną, a jedynie umożliwia pracę jednostki w trybie wyspowym na wydzielonej sieci energetycznej biogazowni przy zmiennej prędkości (tj. przy zmiennej częstotliwości wytwarzanej energii elektrycznej) i ma poważne trudności w synchronizacji z siecią publiczną przy wykorzystaniu istniejącego przemiennika częstotliwości;
 - 5) W rezultacie istniejący układ sterowania i regulacji pracą jednostki kogeneracyjnej uniemożliwia najbardziej efektywny tryb pracy instalacji badawczej jako mikroinstalacji prosumenckiej zgodnie z ustawą o odnawialnych źródłach energii wraz z „magazynowaniem” przejściowych nadwyżek energii elektrycznej w sieci;
 - 6) Kalibracja generatora AG20P na biegu jałowym polegała na zaprogramowaniu nastaw sterownika Woodward easYgen 2500, aktualizacji oprogramowania sterownika, wyrównaniu sterownika Woodward easYgen 2500 generatora i sterownika AVR Marelli Mark V generatora;
 - 7) Gdy jednostka biogazowa AG20P pracowała równoległe z siecią o mocy czynnej do 11,7 kW, energia elektryczna produkowana przez jednostkę spełniała przyjęte założenia i wymagania.
 - 8) Wykorzystując swoją wiedzę i możliwości przemysłowe, komponenty niezbędne do optymalizacji zostały wykorzystane przez Woodward Poland, Karl Dungs GmbH & Co. KG i WOMIX;
 - 9) Po zastosowaniu interfejsu RS-485/LAN i mostka, zaawansowany sterownik Woodward serii easYgen 2500/easYgen 2800 oraz sterownik pracy silnika gazowego z wbudowanym modułem Woodward PG+ umożliwiającą lokalną archiwizację parametrów i stanów pracy agregatu kogeneracyjnego na wybranym komputerze PC (wraz z oprogramowaniem) i/lub serwerze NAS w lokalnej sieci LAN/WiFi indywidualnego gospodarstwa rolnego.
- Badania mogą być ograniczone przez grupę docelową, tj. grupę, która ma dostęp do substratu (gnojowicy świńskiej) i ewentualnie ma problemy z jego zagospodarowaniem dla optymalnej

liczby zwierząt gospodarskich wynoszącej (1.100÷2.400) prosiąt lub tuczników dla jednego gospodarstwa.

Przyszłe możliwości badawcze powinny koncentrować się na następujących kwestiach:

- funkcjonalność kogeneratorsa wykorzystującego biowodór z biogazu rolniczego;
- dodatkowe zastosowania trigeneracji dla indywidualnego gospodarstwa rolnego, jako producenta warzyw i owoców.

7) Praca nr O7

Postępujący kryzys energetyczny, ściśle związany z pogłębiającą się katastrofą klimatyczną, stanowi obecnie największą przeszkodę w rozwoju cywilizacji [Ahmed i in., 2021a]. Szybko zmniejszające się rezerwy paliw kopalnych stanowią zagrożenie dla globalnego bezpieczeństwa energetycznego, generując liczne problemy społeczne i ekonomiczne [Mahlia i in., 2020]. Stopniowe odchodzenie od paliw kopalnych na rzecz odnawialnych źródeł energii jest punktem wyjścia do zahamowania ekspansji tych kryzysów. Wodór (H_2) jest uważany za wiodące źródło energii odnawialnej pod względem korzyści. Oprócz braku wytwarzania negatywnych dla środowiska produktów spalania, charakteryzuje się znaczną gęstością energii [Bolatkhan i in., 2019]. Uznanie korzyści z wykorzystania H_2 znajduje odzwierciedlenie w stabilnym trendzie wzrostowym zainteresowania wdrażaniem technologii jego wytwarzania i użytkowania [Ahmed i in., 2021d; Levin i in., 2004; Show i in. 2012]. Z drugiej strony czynnikami utrudniającymi upowszechnienie technologii H_2 są te wynikające z jego wytwarzania (energochłonne klasyczne metody elektrolityczne) i magazynowania (bezpieczeństwo), ale także niemożność natychmiastowego odejścia od paliw kopalnych ze względów technicznych. H_2 jest czystym nośnikiem energii o dużym potencjale jako paliwo alternatywne. Jego potencjał tkwi przede wszystkim w tym, że jest paliwem czystym, jego stosowanie nie powoduje negatywnych emisji do środowiska [Chong i in., 2009].

Ciągły rozwój, wzrost miast i intensywny tryb życia umożliwiły model oparty na konsumpcjonizmie. Choć świadomość społeczeństwa rośnie, to jeszcze daleka droga, zanim nieekologiczne nawyki zostaną zastąpione koncepcją redukcji, ponownego użycia i recyklingu. Tymczasem zapotrzebowanie na energię rośnie z roku na rok ze względu na ciągły wzrost populacji i poprawę standardu życia.

Perspektywy rozwoju rynku energii do 2050 roku zakładają transformacje na skalę porównywalną z kolejną rewolucją przemysłową. Według źródeł Międzynarodowej Agencji Energetycznej, zgodnie z programami rządowymi i scenariuszem „zerowej emisji”, wykorzystanie paliw kopalnych ulegnie marginalnej redukcji do 2030÷2050 roku [IEA, 2022]. Jednocześnie będziemy obserwować przesunięcie w gospodarce wodorowej z produkcji emisyjnej na produkcję bezemisyjną, tj. z tzw. „szarego” zasobu – pozyskiwanego z nieodnawialnych paliw kopalnych przez przemysł chemiczny – w stronę „zielonego” H_2 – klasyfikowanego jako ekologiczny, który jest nowym źródłem paliwa i surowca dla sektora nowych technologii [ETC, 2021].

Od około 2030 r. popyt na H_2 wykorzystywany w istniejących gałęziach przemysłu znacznie spadać, podczas gdy nowe rynki pojawią się w sektorach transportu, nowoczesnej produkcji i energetyki. Obecnie paliwa kopalne zaspokajają 84% zapotrzebowania na energię człowieka, co prawdopodobnie wzrośnie w nadchodzących dekadach [SRWE, 2020; Jie i in., 2019]. Głównymi źródłami emisji gazów cieplarnianych są transport, produkcja energii elektrycznej i przemysł [EIA, 2019]. Paliwa na bazie ropy naftowej są podstawowym źródłem energii do celów transportowych. Łatwość podróżowania i potrzeba motoryzacji w życiu codziennym oznaczają, że rosnące zapotrzebowanie na energię w tym sektorze prawdopodobnie nie zmieni się w przyszłości. Przewiduje się, że przy obecnym tempie zużycia rezerwy paliw nieodnawialnych mogą zostać wyczerpane do 2150 r. [Mandley i in., 2020; Quilcaille i in., 2018]. Transport generuje ponad 20% antropogenicznych emisji CO_2 , przyczyniając się do szybko narastającego efektu globalnego ocieplenia [Edenhofer i in., 2014]. Paliwa kopalne są ograniczonymi zasobami, których źródło jest ograniczone do określonych regionów świata, co również budzi obawy ekonomiczne i polityczne.

Znalezienie alternatywnych źródeł energii dla paliw kopalnych jest konieczne, aby powstrzymać pogarszający się stan środowiska naturalnego. H_2 , charakteryzujący się wysoką gęstością energii jako substancja, która ulega utlenianiu bez tworzenia szkodliwych produktów, jest uważany za jeden z najbardziej obiecujących nośników energii. Niestety, obecnie powszechnym źródłem H_2 pozostają paliwa kopalne, których wydobywanie i przetwarzanie jest energochłonne i kosztowne, lub elektroliza wody, proces wymagający energii. Dlatego wykorzystanie odnawialnych surowców do produkcji H_2 jest alternatywną opcją, która wykazuje wysokie korzyści ekonomiczne i środowiskowe dla rozwoju zrównoważonych surowców i gospodarki o obiegu zamkniętym.

Produkcja biowodoru otwiera kolejną niszę dla zagospodarowania osadów z komunalnych oczyszczalni ścieków. Osady ściekowe powodują znaczne zanieczyszczenie środowiska, a także wpływają na zdrowie ludzi na wiele sposobów. Osady ściekowe są wykorzystywane do produkcji wielu odnawialnych zasobów w celu utrzymania jakości środowiska, zmniejszenia wielu czynników ryzyka, produkcji zrównoważonej energii i służenia jako niezawodne źródło produkcji energii.

Modele procesu produkcji biowodoru dla różnych surowców i proporcji substratów stosowanych w kofermentatorach zaprezentowano w publikacji nr **O7**:

Jarosz, Z.; Kapłan, M.; Klimek, K.; Anders, D.; **Dybek, B.**; Herkowiak, M.; Hołaj-Krzak, J.T.; Syrotyuk, S.; Korobka, S.; Syrotyuk, H.; Wałowski, G. Evaluation of Biohydrogen

Production Depending on the Substrate Used—Examples for the Development of Green Energy. *Energies* 2024, 17, 2524. <https://doi.org/10.3390/en17112524>.

Celem pracy było opisanie różnych metod produkcji biowodoru, skupiając się na porównaniu ich wydajności pod względem produkcji H₂ i podkreśleniu ich głównych zalet i wad. Omówiono również obecny stan wiedzy na temat technologii produkcji biowodoru i wskazano obiecujące ścieżki rozwoju na przyszłość oraz przedstawiono obecny stan technologii stosowanych w produkcji biowodoru w Europie, ze szczególnym uwzględnieniem Polski, pod względem wydajności i rzeczywistej produkcji energii.

Paliwa kopalne są ograniczonymi zasobami, których źródło jest ograniczone do określonych regionów świata, co dodatkowo generuje obawy ekonomiczne i polityczne. Fakt ten, potwierdzony stale rosnącymi cenami paliw, wraz z szeroko pojętymi czynnikami środowiskowymi, jest siłą napędową rozwoju biopaliw. Paliwa te są nietoksyczne, biodegradowalne i wolne od szkodliwych związków siarki, co skutkuje znacznie niższymi emisjami w porównaniu z konwencjonalną benzyną i olejem napędowym [IEA, 2023; Demirbas, 2010; Manara i Zabaniotou, 2012; Kass i in. 2018]. Z definicji są to paliwa ciekłe lub gazowe wykorzystywane w transporcie, z których większość jest produkowana z biomasy [Lehman i in., 2014]. Ze względu na czynniki ekonomiczne, polityczne i środowiskowe, alternatywne źródła energii w transporcie, takie jak bioetanol, biodiesel i H₂, wkrótce odegrają kluczową rolę w przyszłości świata. Najbardziej obiecującym i pożądanym odnawialnym źródłem energii jest H₂. Jest on wytwarzany w procesie produkcyjnym, ponieważ nie występuje naturalnie w postaci wolnej.

Większość organizmów wytwarzających biowodor to mikroorganizmy, a ich zdolność do wykorzystywania lub wytwarzania H₂, jako metabolitu wynika z ekspresji metaloenzymów znanych jako hydrazazy [Lubitz i in., 2014].

Enzymy w tej bardzo zróżnicowanej rodzinie są zwykle dzielone na trzy różne typy w zależności od zawartości metalu w miejscu aktywnym: [FeFe]-hydrogenazy (żelazo-żelazo), [Ni-Fe]-hydrogenazy, (nikiel-żelazo)-hydrogenazy i [Fe]-hydrogenazy (tylko żelazo) [Vignais i in., 2007]. Znanymi przykładami są członkowie rodzajów *Clostridium*, *Desulfovibrio* i *Ralstonia* lub patogen *Helicobacter*, z których większość to mikroorganizmy ściśle beztlenowe lub fakultatywne. Inne mikroorganizmy, takie jak zielone algi, również ekspresują wysoce aktywne hydrogenazy, jak ma to miejsce w przypadku członków rodzaju *Chlamydomonas*.

Ze względu na ogromną różnorodność enzymów wodorowych, obecne wysiłki koncentrują się na przesiewaniu nowych enzymów o ulepszonych właściwościach [Land i in., 2019; Morra, 2022], a także na inżynierii już scharakteryzowanych hydrogenatów, aby nadać im bardziej pożądane właściwości [Lu i Koo, 2019].

Biologiczna produkcja H_2 z alg jest metodą fotobiologicznego rozkładu wody (H_2O), która odbywa się w zamkniętym fotobioreaktorze, w oparciu o produkcję wodoru jako paliwa słonecznego przez algi [Hemschemeier i in., 2009]. Algi produkują H_2 w określonych warunkach. W 2000 roku odkryto, że jeśli glony *C. reinhardtii* zostaną pozbawione siarki, przestawią się z produkcji tlenu, jak w normalnej fotosyntezie, na produkcję H_2 [Melis i in., 2000].

Fotosynteza w sinicach i zielonych algach rozkłada wodę na jony H_2 i elektrony. Elektrony są transportowane przez ferredoksyny [Peden i in., 2013]. Fe-Fe hydrogenazy (enzymy) łączą je w gaz H_2 . W *Chlamydomonas reinhardtii* fotosystem II wytwarza, w wyniku bezpośredniej konwersji światła słonecznego, 80% elektronów, które przechodzą w gaz wodorowy [Volgusheva i in., 2013].

Biologiczną produkcję H_2 obserwuje się również w wiążących N_2 sinicach. Te mikroorganizmy mogą rosnąć, tworząc włókna. W warunkach ograniczonej ilości azotu niektóre komórki mogą się specjalizować i tworzyć heterocysty, co zapewnia beztlenową przestrzeń wewnątrzkomórkową ułatwiającą wiązanie N_2 przez enzym nitrogenazę, również ekspresjonowaną wewnętrznie.

W warunkach wiązania N_2 enzym nitrogenazy przyjmuje elektrony i wykorzystuje ATP (adenozyro-5' triposforan) do rozbicia potrójnego wiązania diazotu i zredukowania go do amoniaku [Tamagnini i in., 2002]. Cząsteczkowy H_2 jest również wytwarzany podczas cyklu katalitycznego enzymu nitrogenazy. Biowodór należy do paliw trzeciej generacji, produkowanych przy użyciu mikroorganizmów [Mona i in., 2020], które przekształcają H_2 w biowodór poprzez fotolizę i fermentację.

Biowodór jest wytwarzany przez mikroorganizmy (cyjanobakterie i algi), które mogą przeprowadzać fotosyntezę.

Prostym systemem wydaje się być tzw. bezpośrednia biofotoliza, w której można wyróżnić kilka prostych, kluczowych reakcji w następującej kolejności:

- fotoliza H_2O ;
- przeniesienie elektronów z fotosystemów do białka zwanego ferredoksyną, które jest następnie bezpośrednim donorem elektronów przenoszonych na protony;
- synteza biowodoru jest katalizowana przez hydrogenazę.

Hydrogenazy, podobnie jak nitrogenazy, to enzymy, które w ściśle określonych warunkach umożliwiają syntezę biowodoru z elektronów i protonów. Reakcje tego typu mogą zachodzić naturalnie w pewnych warunkach, m.in. jako swoisty „zawór bezpieczeństwa”, umożliwiając usuwanie nadmiaru pochłoniętej energii świetlnej, ale ich intensywność jest minimalna.

W procesie fermentacji glukoza, która jest głównym źródłem węgla, jest przekształcana w pirogronian podczas szlaku glikolizy.

Następnie pirogronian jest utleniany do acetylokoenzymu A w obecności koenzymu A i utlenionej formy ferredoksyny. Ferredoksyna w utlenionej formie powstaje podczas redukcji protonów do wodoru cząsteczkowego z udziałem hydrogenazy [Das i Veziroglu, 2008].

W przeciwieństwie do beztlenowych procesów produkcji wodoru z wykorzystaniem energii słonecznej, reakcje rozkładu związków organicznych w podobnych warunkach, ale bez wykorzystania energii fotonowej, nazywane są ciemną fermentacją.

Ciemna fermentacja przyczynia się do produkcji biowodoru, czyli paliwa pochodzenia biologicznego, konkretnie z biomasy. Zaletą jest połączenie przetwarzania odpadów biomasy w celu produkcji energii. Znane i powszechne jest przetwarzanie biomasy poprzez fermentację w celu produkcji biogazu. Wykorzystanie ciemnej fermentacji do produkcji biowodoru stanowi obecnie niewielki procent instalacji przemysłowych [Ahmed i in., 2021c; Green Hydrogen, 2024]. Fermentacja ciemna polega na rozkładzie biomasy bogatej w węglowodany przez bakterie beztlenowe m.in. na H_2 . Mikroorganizmy produkują H_2 w warunkach ciemności w temperaturze $(30\div 80)$ °C i pH $(5\div 6)$. Produktami fermentacji ciemnej, oprócz H_2 , są również CO_2 , CH_4 i H_2S . Przyjmuje się, że z jednego mola glukozy można uzyskać maksymalnie 4 mole H_2 [Hawkes i in., 2002; Ni i in., 2006; Krzemińska i Kwietniewska, 2021]. W najnowszych badaniach gaz ten budzi duże zainteresowanie jako wydajny nośnik energii, który może rozwiązać największy problem kryzysu energetycznego we współczesnym świecie [Ferraren-De Cagalitan i Abundo, 2021; Srivastava i in., 2020; Chai i in., 2023]. Gaz ten ma bardzo wysoką wydajność energetyczną, która może być nawet wyższa niż paliw węglowodorowych [Abdalla i in., 2018]. Ponadto może być magazynowany w różnych nośnikach, takich jak wodorotlenki metali, nanostruktury węglowe, borowodorki i inne [Schneemann i in., 2018; Miao i in., 2020; Wu i in., 2020]. Fotobiologiczna [Moritz, 2012] produkcja wodoru przy użyciu fioletowych, bezsiarkowych bakterii jest znana od ponad 60 lat [Gest i Kamen, 1949]. Proces ten, potocznie nazywany fotofermentacją, zachodzi w warunkach beztlenowych, w obecności światła i substratów organicznych.

Fermentacja może być również jednym z etapów produkcji wodoru metodą mieszaną (hybrydową). W tym przypadku procesowi fermentacji podlega złożona mieszanina substancji organicznych, najczęściej produktów odpadowych lub ścieków technologicznych. Następnie otrzymane produkty stanowią pożywkę dla mikroorganizmów podczas bioprodukcji wodoru przy użyciu energii promieniowania widzialnego (fotofermentacja) [Eroğlu i in., 2006].

Fotofermentacja wykorzystuje bakterie brunatne, które są ścisłymi beztlenowcami. Adsorbują promieniowanie elektromagnetyczne w zakresie długości fal (400÷950) nm. Charakteryzują się obecnością enzymu nitrogenazy, który jest katalizatorem reakcji powstawania wodoru, zwłaszcza w warunkach niedoboru azotu. Zaletą fotofermentacji jest produkcja stosunkowo czystego H₂ z domieszką (10÷20)% CO₂, który po stosunkowo łatwym przetworzeniu może być bezpośrednio wykorzystany w ogniwie paliwowym. Ponieważ substratami do fotofermentacji są produkty „ciemnej” fermentacji wodorowej, tj. kwasy organiczne lub alkohole, te dwa procesy można ze sobą skojarzyć. W odniesieniu do wydajności wodoru możliwej do uzyskania w „ciemnej” fermentacji, wydajność w procesie dwuetapowym może być nawet trzykrotnie wyższa [Urbaniec i Grabarczyk, 2005].

Fermentacja „ciemna” jest już dość dobrze znana, ale nadal istnieją luki w wiedzy na temat fotofermentacji wodorowej, które wymagają dalszych badań. Z technicznego punktu widzenia bardzo trudno jest zaprojektować fotobioreaktor w taki sposób, aby dostarczał odpowiednią ilość energii w postaci światła, niezbędną do osiągnięcia zadowalającej wydajności procesu [Urbaniec i Grabarczyk, 2005].

Podsumowując, biowodór można wytwarzać metodami termochemicznymi, fotokatalitycznymi i biologicznymi. Metody termochemiczne obejmują zgazowanie i pirolizę. W tym procesie, w wyniku wysokiej temperatury zewnętrznej i braku O₂, biomasa rozkłada się na gazy, w tym H₂. Procesy katalityczne i biologiczne obejmują ciemną fermentację i fotofermentację. Zaletami ciemnej fermentacji są produkcja biowodoru bez źródła światła, wysoki stopień produkcji H₂ i elastyczność metody w odniesieniu do różnych substratów. Zarówno podczas fermentacji ciemnej, jak i fotofermentacji muszą być spełnione pewne warunki, takie jak parametry procesu, w tym temperatura, środowisko reakcji, mieszanie oraz warunki tlenowe lub beztlenowe [Nanda i in., 2023].

Innym rodzajem produkcji biowodoru, który znajduje się na granicy biologicznych i chemicznych metod otrzymywania H₂, jest reforming parowy biometanu. W ten sposób uzyskuje się tzw. zielony H₂ [Yagüe i in., 2024].

Do 2050 roku konieczne będzie przeprojektowanie globalnych strategii energetycznych. Gospodarka oparta na paliwach kopalnych stoi w obliczu kolejnej rewolucji surowcowej z przyczyn ekonomicznych i ekologicznych. Odpowiadając na prognozy międzynarodowych instytucji, rząd i agencje międzyrządowe wytyczyły ścieżkę stopniowego wycofywania paliw kopalnych do 2050 roku. H_2 , obecnie komercyjnie stosowany w przemyśle chemicznym i petrochemicznym, pochodzi głównie z paliw kopalnych. Według prognoz, od około 2030 roku przemysł zacznie odchodzić od obecnych fizykochemicznych metod syntezy H_2 , a zapotrzebowanie na niego zmniejszy się w przestarzałych rozwiązaniach przemysłowych. Przykładem jest bezpośrednia biofotoliza, w której można wyróżnić kilka prostych, kluczowych reakcji, w następującej kolejności:

- Fotoliza H_2O ;
- Przeniesienie elektronów z fotosystemów do białka zwanego ferrodoksyną, które jest następnie bezpośrednim dawcą elektronów przenoszonych na protony;
- Synteza biowodoru, która jest katalizowana przez hydrogenazę.

Jednocześnie poszukiwanie nowych źródeł energii zmusi gospodarkę światową do włączenia H_2 do nowo kształtującego się miks energetycznego. H_2 jest postrzegany jako kolejne paliwo do transportu masowego i indywidualnego, produkt z wykorzystania odpadów rolniczych i elastycznego magazynowania energii dla źródeł odnawialnych. Równoległe ze wzrostem zainteresowania H_2 pojawią się nowe technologie i metody produkcji H_2 o niskim wpływie na środowisko.

Głównymi dostawcami surowców do elektrolizerów są Chiny 37%, RPA 11% i Rosja 7%, podczas gdy udział UE wynosi zaledwie 2%. Innymi głównymi postrzeganymi wyzwaniem będą kontraktowanie i zabezpieczanie znacznego popytu na odnawialny H_2 oraz zapewnienie odpowiedniej podaży odnawialnej energii elektrycznej, co może być kluczowym wąskim gardłem w osiągnięciu strategicznych celów Europy w zakresie produkcji odnawialnego wodoru.

Obecnie najbardziej obiecującą koncepcją jest połączenie energii odnawialnej i ogniw paliwowych H_2 , a także biologiczne wykorzystanie odpadów biologicznych do biogazu i dalej do H_2 . Wraz z nowymi wyzwaniami zmieniają się zasoby do produkcji paliwa H_2 i metody oceny ich wpływu na środowisko naturalne. Rodzaj zasobu i sposób jego wytworzenia, efektywność energetyczna metody i produkty uboczne, które wygeneruje, będą odgrywać rolę w ocenie nowoczesnych metod. Inwestycje, liczba projektów badawczych, patentów i koncepcji będzie rosła wykładniczo z roku na rok. Sytuacja stanie się niezwykle dynamiczna i nie jest wykluczone, że obecne prognozy mogą przyspieszyć lub ulec zmianom, których

charakteru nie można obecnie ocenić. Sektor H₂ będzie się rozwijał ze względu na wymagania stawiane przez globalną politykę gospodarczą, a dalsza analiza będzie wymagała ciągłego monitorowania i aktualizacji.

8) Praca nr O8

Działalność rolnicza, gospodarcza i ludzka generuje duże ilości różnych rodzajów odpadów organicznych. Działalność gospodarcza obejmuje osady ściekowe z procesu oczyszczania ścieków w oczyszczalniach ścieków oraz odpady komunalne na wysypiskach. Działalność gospodarcza obejmuje różne rodzaje odpadów z przemysłu spożywczego, takie jak produkcja soków, dżemów i piwa.

Jednak działalność rolnicza generuje wiele rodzajów odpadów. Należą do nich w szczególności odchody zwierząt gospodarskich, takich jak krowy, świnie, konie, kozy, kury i gęsi. W wyniku ich procesów metabolicznych powstaje gnojowica i obornik. Stanowią one dobry naturalny nawóz. Jednak problem pojawia się, gdy gospodarstwo ma wiele zwierząt i zbyt mały areal gruntów ornych, na których można by wykorzystać ten naturalny nawóz. Innym problemem w tej sytuacji jest to, że z takich nawozów rozrzuconych na polu emitowany jest metan (CH_4). CH_4 jest gazem cieplarnianym, którego emisje muszą być ograniczone przez Unię Europejską ze względu na zmiany klimatu. W takiej sytuacji rozwiązaniem obu problemów może być produkcja biogazu [Wałowski, 2019], gdyż surowiec ten doskonale nadaje się do tego celu. Powstały biogaz można następnie wykorzystać do produkcji energii elektrycznej [Jarosz i in., 2023] na potrzeby gospodarstwa rolnego i domu mieszkalnego. Odchody zwierząt gospodarskich można zaliczyć do odnawialnych źródeł energii (OZE). Są to źródła stanowiące grupę powszechnie dostępnych, niekopalnych źródeł, powstających w naturalnych, powtarzalnych procesach przyrodniczych. Charakteryzują się brakiem negatywnego wpływu na środowisko naturalne. Wytwarzanie energii z odnawialnych źródeł energii niesie ze sobą wiele korzyści. Sprzyja to ochronie środowiska, ponieważ zmniejsza emisję gazów cieplarnianych, głównie CH_4 i ditlenku węgla (CO_2). Przetwarzanie biomasy wiąże się również ze zmniejszeniem emisji ditlenku siarki (SO_2) i tlenków azotu (NO_x). Dzięki wykorzystaniu biomasy zmniejsza się również powierzchnia składowisk odpadów [Głodek, 2007].

Badania eksperymentalne potencjału obornika koziego, jako substratu do produkcji biometanu w warunkach fotofermentacji zaprezentowano w publikacji nr O8:

O8 Hołaj-Krzak, J.T.; Konieczna, A.; Borek, K.; Gryzkiewicz-Zalega, D.; Sitko, E.; Urbaniak, M.; **Dybek, B.**; Anders, D.; Szymenderski, J.; Koniuszy, A.; Wałowski, G. Goat manure potential as a substrate for biomethane production - an experiment for photofermentation. *Energies* 2024, 17, 3967. <https://doi.org/10.3390/en17163967>

Celem pracy było opracowanie aktualnego stanu technologii produkcji biogazu (biometanu) — przykład wykorzystania obornika koziego w kontekście efektywności fotofermentacji. Wskazano teoretyczny i eksperymentalny potencjał biometanu wykorzystujący biodegradowalność do fermentacji beztlenowej obornika koziego.

Biogaz jest czystym i dostępnym źródłem energii z przetwarzania odpadów, o mniejszym śladzie węglowym. Przyjęta polityka wspierania OZE [Renewables, 2016] jest nadal kwestionowana w kontekście technicznym i ekonomicznym, biorąc pod uwagę Cele Zrównoważonego Rozwoju ONZ [UNDP, 2022], chociaż stanowisko Unii Europejskiej obecnie stanowi wzrost rozwoju sektora biogazu.

Jedną z najpilniejszych potrzeb komercyjnych zastosowań biogazu jest transport. Uważa się, że sektor ten odpowiada za 23% globalnej emisji CO₂. Dlatego kluczowe jest zwiększenie skali najnowszych rozwiązań bioenergetycznych w celu uzyskania biopaliwa. Oczywiście jest, że aby osiągnąć oczekiwany cel, bioenergia musi być bardziej wydajna, a wykorzystanie biomasy dostępnej w zrównoważony sposób w środowisku musi zostać zoptymalizowane i w pełni wykorzystane. Konieczność oczyszczania biogazu wynika z faktu, że oprócz CH₄ zawiera on również inne gazy, takie jak CO₂, H₂S, azot (N₂), wodór (H₂), para wodna i tlen (O₂). Ze względu na dużą ilość CO₂ wartość kaloryczna gazu ulega obniżeniu, a inne zanieczyszczenia powodują korozję silnika i innych urządzeń, takich jak rury kotła i elementy stalowe. Tylko biogaz oczyszczony z zanieczyszczeń i składający się z wysokiej jakości CH₄ może być używany jako paliwo. Naukowcy i technolodzy ograniczyli się do konwencjonalnych rozwiązań, proponując kilka strategii modernizacji biogazu do biometanu, który może być stosowany w transporcie.

W ostatnich latach przeprowadzono wiele pionierskich technologii oczyszczania biogazu. Jedną z nich jest absorpcja, zjawisko chemiczne lub fizyczne, podczas którego składniki obecne w fazie gazowej dyfundują do rozpuszczalnika w fazie ciekłej, co wymaga starannego doboru. Odpowiedni rozpuszczalnik musi być nieszkodliwy, stosunkowo lotny i niedrogi. W kontekście oczyszczania biogazu technologia oparta na absorpcji skutecznie oddziela zanieczyszczenia, takie jak H₂S i CO₂, gdy są one bardziej rozpuszczalne w absorberze (skruberze) niż CH₄. Ta technika nie wymaga dużej infrastruktury poza kolumnami separacyjnymi. Oprócz faktu, że technologia ta jest już dostępna komercyjnie i szeroko rozpowszechniona w biogazowniach na całym świecie, naukowcy wciąż poszukują doskonałości w produkcji biometanu [Pettersson i Wellinger, 2009].

Jednym z innowacyjnych podejść jest wykorzystanie cieczy jonowych. Sole te charakteryzują się wysoką absorpcją CO₂, wysoką stabilnością termiczną i niskim ciśnieniem pary, co jest korzystne w zastosowaniach biogazowych. Chociaż uzyskano wiele obiecujących wyników w skali laboratoryjnej [Zhang i in., 2020; Wang, i in., 2018; Akhmetshina, i in., 2019], głównymi przeszkodami w komercjalizacji są wysokie koszty, a także możliwe trudności operacyjne i techniczne. Prawidłowe zaprojektowanie systemów i procesów wymaga dużej ilości danych dotyczących rozpuszczalności, która jest nadal zbyt mała, aby przyspieszyć rozwój tej technologii w oczyszczaniu biogazu. Innym podejściem działającym w technologii absorpcji jest wykorzystanie amin do usuwania CO₂ z biogazu i jest szeroko stosowane ze względu na możliwość osiągnięcia całkowitego odzysku CH₄ [Choi i in., 2007; Lin i in., 2014]. Ostatnio zbadano bardziej innowacyjne podejście do tych związków, aby przezwyciężyć problem niskiej efektywności energetycznej, który jest spowodowany wysokim nakładem energii potrzebnym do regeneracji roztworu aminy. Zaproponowano zastąpienie rozpuszczonej wody czujnikami proto-nowej, które można regenerować w niższej temperaturze, co zmniejsza zużycie energii i ogranicza problem korozji [Guo i in., 2019; Gómez-Díaz i in., 2018; Xu i in., 2002; Heldebrant i in., 2008; Barbarossa i in., 2013].

Inną technologią stosowaną do ulepszania biogazu jest adsorpcja, czyli zjawisko zachodzące na powierzchni i polegające na selektywnej adhezji lub wiązaniu składników mieszaniny na mikroporowatej powierzchni ciała stałego. W zależności od siły, która działa, proces ten nazywa się fizysorpcją i chemisorpcją. Fizysorpcja obejmuje słabe siły Vander Waala między adsorbentem a adsorbentem. Chemisorpcja obejmuje silne wiązania chemiczne i tego procesu nie można łatwo odwrócić.

Adsorpcja zmiennociśnieniowa to technika, która oddziela CO₂ od wytworzonego biogazu poprzez jego adsorbowanie na powierzchni pod podwyższonym ciśnieniem. Materiałem adsorpcyjnym jest zazwyczaj węgiel aktywny lub zeolity, tanie i dostępne, o dużej porowatości. Proces regeneruje się poprzez sekwencyjne zmniejszanie ciśnienia. Ponieważ para wodna i siarkowodór mogą wpływać na strukturę adsorbentu, muszą zostać usunięte z mieszanki biogazu przed adsorpcją CO₂. Mimo że jest szeroko stosowana i ma bardzo dobrze ugruntowaną technologię, PSA nadal ma pewne wady do pokonania. Głównym problemem jest to, że dwuetapowy proces niezbędny do usunięcia CO₂ i H₂S wymaga wysokiego ciśnienia, co w konsekwencji prowadzi do stosunkowo wysokiego potencjału globalnego ocieplenia.

Nowe koncepcje wykorzystujące adsorpcję zmiennociśnieniową obejmują rozwój nowych adsorberów w celu poprawy usuwania gazów zakłócających, zwiększając tym samym

wydajność i obniżając koszty procesu. Ostatnio przeprowadzono badania nad żywicami polimerowymi [Théobald, 2019; Lukehurst i Banks, 2019; Baier, 2019], adsorbentami na bazie biomasy [Théobald, 2019; Lukehurst i Banks, 2019] lub krzemionki [Grande i in., 2020; Abd i in., 2022; Guan i in., 2020].

Separacja membranowa polega na przepuszczeniu surowca (w tym przypadku biogazu) przez membranę i selektywnym jego oddzieleniu. Podstawowym podejściem tej technologii separacji jest różnica w powinowactwie chemicznym i wielkości cząstek [Petersson i Wellinger, 2009]. Gazy rozdzielone przez moduł separacji membranowej działają na zasadzie selektywnej permeacji. Małe cząsteczki, takie jak H_2 , H_2S i CO_2 , przechodzą przez membranę szybciej niż CH_4 , umożliwiając separację. Wydajność systemu rafinacji zależy od wyboru membrany oraz jej selektywności i przepuszczalności. Nowy system membranowy jest stosunkowo prosty, wymaga bardzo niskiego nakładu energii, a jego konserwacja nie jest skomplikowana. Niemniej jednak, jak wszystkie inne techniki, ta również ma pewne wady. Koszt membrany jest nadal stosunkowo wysoki, a jej żywotność jest ograniczona. Obecnie trwające badania w dziedzinie technologii membranowej koncentrują się na opracowaniu ekonomicznie wykonalnego polimeru o dobrych właściwościach technologicznych. Celem jest osiągnięcie wyższej przepuszczalności materiału membrany przy zachowaniu zadowalającej selektywności. Obecnie najczęściej wybieranym przemysłowym materiałem membranowym do wzbogacania biogazu jest poliimid. Materiałami o dużym potencjale zastosowania są węglowe sita molekularne i membrany o mieszanej matrycy wykonane z polimerów i zeolitów, tlenków grafenu lub innych związków metaloorganicznych.

W ostatnich latach popularność zyskała innowacyjna technologia kriogeniczna, którą wykorzystuje już kilka komercyjnych zakładów. Podstawową zasadą działania tej technologii jest różnica temperatur kondensacji składników biogazu. Najpierw surowy biogaz jest chłodzony i sprężany, zamieniając CO_2 w fazę ciekłą. Ponieważ kondensacja zachodzi w bardzo niskiej temperaturze, konieczne jest najpierw wyeliminowanie H_2S i wody, aby uniknąć zamarzania. Inne gazy, takie jak N_2 i O_2 , mogą być dalej kondensowane podczas separacji CH_4 [Chen i in., 2015]. Ponieważ technologia ta wymaga dużej liczby urządzeń, ale jednocześnie zapewnia bardzo dobrą jakość i czystość CH_4 , naukowcy pracują nad poprawą jej opłacalności.

Separacja naddźwiękowa to metoda, która ostatnio zyskała na popularności. Sprzęt stosowany w tej technice separacji składa się z kompaktowego urządzenia rurowego z dyszą, służącego do rozprężania przepływającego biogazu do prędkości naddźwiękowych, co w konsekwencji powoduje spadek temperatury i ciśnienia. Tworzy to mgiełkę kropelek wody

i węglowodorów, które są dalej oddzielane. Jednak nie ma zbyt wielu opublikowanych danych na temat tej techniki, ponieważ technologia ta była wykorzystywana do innych zastosowań [Yang i in., 2016; Wen i in., 2019; Rajae Shooshtari i Shahsavand, 2013].

Prowadzone są badania mające na celu zwiększenie udziału produktów ubocznych i odpadów, które są wykorzystywane do produkcji biometanu w procesie fotofermentacji. Działania te są zgodne z celami gospodarki o obiegu zamkniętym i przyczyniają się do zmniejszenia udziału paliw kopalnych w produkcji energii oraz zmniejszenia negatywnego wpływu ich wykorzystania na środowisko.

Liczba działających biogazowni wzrasta z roku na rok, co daje nadzieję na osiągnięcie celu wyznaczonego przez rządy. Ciągłe prowadzone są badania interdyscyplinarne i pojawiają się nowe podejścia w celu znalezienia idealnego rozwiązania technologicznego dla ekonomicznej i zrównoważonej produkcji biogazu, jego rafinacji i wreszcie eksploatacji. Do doskonałości jeszcze daleka droga, ale podjęte już kroki z pewnością przyczyniły się do osiągnięcia założonych celów:

- 1) Wskazano, że przez 6 miesięcy, w zależności od złoża i jego stanu ze względu na przepuszczalność gazu, funkcjonalność mikroorganizmów zawartych w zwartym złożu ma decydujący wpływ.
- 2) Skład pierwiastkowy złoża obornika koziego ma znaczący wpływ, powodując tym samym zahamowanie procesu w warunkach fotofermentacji.
- 3) Zaobserwowano pewną ciekawostkę naukową, porównując obornik kozi, grupa aktywna (zwarte złożo), należy zauważyć, że K 3,132%, Na 0,266%, Ca 1,909% i Mg 0,993% to wartości niższe w porównaniu do materiału o wartościach K 3,397%, Na 0,284%, Ca 1,813% i Mg 0,990%, które są wyższe. Jest to niewątpliwie spowodowane obecnością w złożu składników odżywczych, które wspomagają proces produkcji biometanu.
- 4) Materiał A z grupy aktywnej (zwarte złożo) wykazuje dynamiczny wzrost produkcji biometanu przy niższych wartościach składników odżywczych. Jednak materiał B, mający wyższy procent składników, wykazuje stabilizację produkcji biometanu po szóstym miesiącu procesu.
- 5) Wskazano, że przez 6 miesięcy (od grudnia do maja), w zależności od złoża i jego stanu ze względu na przepuszczalność gazu, decydujący wpływ ma funkcjonalność mikroorganizmów zawartych w zwartym złożu. W przypadku obornika koziego (materiał A i materiał B) produkcja biometanu jest większa niż w przypadku materiału C.

4.7. PODSUMOWANIE OSIĄGNIĘCIA

Produkcja biogazu jest najważniejszą i najbardziej obiecującą alternatywą dla zastępowania paliw kopalnych w sposób przyjazny dla środowiska. Oprócz wielu dostępnych odnawialnych źródeł energii, produkcja biogazu zajmuje niezastąpioną pozycję ze względu na niekwestionowaną dostępność biomasy i konieczność zagospodarowania odpadów agrokomunalnych. Dlatego naukowcy na całym świecie prowadzą szeroko zakrojone badania w celu opracowania taniej i zrównoważonej produkcji biogazu, który może być wykorzystywany w transporcie, wytwarzaniu energii elektrycznej i ciepła. Sukces tego przedsięwzięcia przyniósłby korzyści środowisku, gospodarce i zrównoważonemu rozwojowi krajów na całym świecie. Przy wyborze substratów szczególną uwagę należy zwrócić, oprócz potencjału biogazowego, na możliwość uzyskania i wykorzystania takich materiałów, aby zminimalizować nakłady energetyczne i finansowe na dostawy (transport), przygotowanie i podawanie surowca do biogazowni. Monosubstratowe biogazownie zlokalizowane w pobliżu dużych, wyspecjalizowanych gospodarstw, np. produkcji tuczników, ferm kóz, mogą odegrać znaczącą rolę. Na skuteczność procesu fermentacji metanowej wpływa aktywność mikroorganizmów, których wzrost i rozwój są hamowane przez obecność różnego rodzaju inhibitorów obecnych w odpadach, co również należy wziąć pod uwagę przy wyborze substratów i technologii. Oprócz korzyści w postaci produkcji energii, biogazownie odgrywają ważną rolę w rozwiązywaniu problemów związanych z magazynowaniem i składowaniem nawozów naturalnych, utratą składników odżywczych podczas magazynowania i problemów środowiskowych poprzez ograniczenie emisji gazów cieplarnianych. Ponadto, poferment, który jest odpadem jednego procesu, staje się cennym produktem do nawożenia upraw, poprawiając ich jakość i przydatność rolnicza. Działania te są zgodne z celami gospodarki o obiegu zamkniętym.

Bezpieczeństwo energetyczne, rozwój gospodarczy i ochrona Ziemi są liderami krajowej polityki energetycznej każdego kraju we współczesnym świecie. Biogaz może być rozwiązaniem dla wymagań i oczekiwań odnawialnych źródeł energii. To czyste i dostępne źródło energii może pomóc w zmniejszeniu śladu węglowego, zarządzaniu odpadami organicznymi i produkcji energii elektrycznej, ciepła, a nawet transportu. Oszacowano, że wykorzystanie ulepszanego biogazu do transportu (90% zawartości CH₄ w biogazie) pozwala na znaczną redukcję emisji gazów cieplarnianych. Ponadto, poferment uzyskany podczas produkcji biogazu jest dodatkową korzyścią i może być używany jako nawóz z zastosowaniem do gleby. Przekształcanie odpadów w energię poprzez produkcję biogazu

jest nie tylko realną opcją o ogromnym potencjale zmniejszenia lub nawet wyeliminowania zależności od paliw kopalnych, ale także zrównoważonym i wydajnym sposobem na produkcję zdecentralizowanej energii o mniejszym śladzie węglowym.

Europa nadal jest jednym z największych promotorów praktyk i rozwoju odnawialnych źródeł energii. Celem jest „przystępna cenowo i czysta energia”, co wymaga szybkiej i bezprecedensowej skali restrukturyzacji systemów energetycznych, nie tylko technologicznie, ale także ekonomicznie. Zadanie to może okazać się trudne do wykonania, zwłaszcza w krajach rozwijających się. Niemniej jednak, obecnie postępująca pozycja Unii Europejskiej w dziedzinie OZE skutkuje znaczącym wzrostem rozwoju sektora biogazu, widocznym na przestrzeni lat w liczbie biogazowni i sukcesywnej poprawie produkcji energii odnawialnej.

Sformułowano następujące wnioski:

- zaprezentowano pilotażową instalację produkcji, oczyszczania i kogeneracji biogazu na przykładzie fermy liczącej 1100 tuczników rasy Dan Bred utrzymywanych w systemie rusztowym;
- badania wykazały, że korzystniej jest mieszać ferment hydrodynamicznie, otrzymując CH_4 na poziomie 80%;
- wyniki pomiarów wskazują na wyraźny wpływ odsiarczania z wykorzystaniem autorskiego rozwiązania przy zastosowaniu techniki adsorpcyjno-absorpcyjnej dla surowego biogazu rolniczego;
- przedstawiono przykłady układów kogeneracyjnych, które są standardowym wyposażeniem instalacji biogazowych, opartych na produkcji ciepła i energii elektrycznej;
- przy pracy jednostki kogeneracyjnej AG20P równoległe z siecią o mocy czynnej do 11,7 kW, wytworzona przez jednostkę energia elektryczna spełniała przyjęte założenia i wymagania;
- rynek energii odnawialnej został usystematyzowany i postawiono hipotezę, że konieczne jest opracowanie modelu inwestycyjnego w krajowych warunkach;
- stwierdzono, że rozwój przemysłu biogazowego w Europie jest ewidentny, chociaż dynamika różni się w zależności od kraju;
- opisano przykłady roślin energetycznych, które są opłacalne w spalaniu, a których uprawa nie jest skomplikowana i kosztowna;

- produkcja „kolorowego” wodoru i biowodoru zajmuje niezastąpioną pozycję ze względu na niezaprzeczalną dostępność biomasy i konieczność zagospodarowania odpadów żywnościowych;
- wskazano teoretyczny i eksperymentalny potencjał biometanu wykorzystujący biodegradowalność do fermentacji metanowej obornika koziego.

Cel pracy został osiągnięty poprzez rozpoznanie procesu produkcji biogazu, opracowanie modelu określenia kryteriów produkcyjnych i ekonomicznych biogazu przy zastosowaniu substratu polidispersyjnego, wraz z jego weryfikacją w warunkach rzeczywistych oraz oceny technologicznej. Dodatkowo wskazano na rozwój technik i metod produkcji biowodoru i biometanu, uwzględniając innowacyjne rozwiązania.

W opublikowanych pracach (O1÷O8) przedstawiono rozwiązania sprecyzowanego na wstępie problemu, a mianowicie:

- w odniesieniu do problematyki produkcji biogazu rolniczego, zagadnienia procesowe można rozpatrywać w kategorii rozwoju bezpieczeństwa energetycznego oraz rozwoju gospodarczego (nowej generacji energii odnawialnych), stanowiących nieszkodliwą dla środowiska i ekonomicznie uzasadnioną utylizację odpadów zwierzęcych;
- przedstawione aspekty techniczno-procesowe, jakie wynikają z technologii fermentacji mezofilnej, wskazują na liczne korzyści w zakresie praktycznego wykorzystania tej technologii w procesach konwersji substratu polidispersyjnego;
- opisane zagadnienia mechanizmu przepływu surowego biogazu przez złożę węgla aktywnego i rudy darniowej można zastosować dla intensyfikacji produkcji biogazu oczyszczonego;
- zastosowanie odpowiednio dostosowanego układu kogeneracji stwarza warunki ekonomiczno-społeczne dla funkcjonowania mobilnych mikrobiogazowni;
- cechy użytkowe biomasy, a zwłaszcza nieżywnościowej, stwarzają warunki do pozyskania dużej ilości biogazu możliwego do wykorzystania w licznych technologiach energetyczno-przemysłowych;
- sektor biogazowy staje się wyznacznikiem trendów do zagospodarowania odpadów zwierzęcych dla produkcji energii odnawialnej w postaci biowodoru lub biometanu.

Przedstawiony - w cyklu publikacji powiązanych tematycznie – proces m.in. produkcji biogazu rolniczego, podkreśla konieczność uwzględnienia skomplikowanych warunków procesowych wynikających z właściwości substratu polidispersyjnego. Stąd też,

doskonalenie procesu w warunkach mezofilnych, zwłaszcza w obszarze dotyczącym technologii produkcji biogazu, biowodoru i biometanu, jest ciągle aktualne. Współczesną praktyką uwzględnia czynniki metanogenne, które wymagają ciągłych badań eksperymentalnych dla zastosowania niekonwencjonalnych technik i metod rozwoju na rzecz „zielonego” wodoru. Realizowane prace eksperymentalne, mają na celu poprawę jakości biogazu, biowodoru i biometanu.

Analiza przebiegu całego procesu produkcji biogazu rolniczego przedstawia charakterystykę parametrów technologiczno-ekonomiczno-społecznych. Uwzględniając powyższe należy zapoznać się z pracami **O1-O8**, w których wskazano na koncepcję udoskonalającą proces zastosowania m.in.: - substratu polidispersyjnego; - obornika koziego; - produkcję biogazu, biowodoru, biometanu.

W pracy (**O1**) przedstawiono rodzaje oraz właściwości fizyczne i chemiczne substratu polidispersyjnego stosowanego w procesie produkcji biogazu rolniczego. Zaprezentowano pilotażową instalację mobilną na przykładzie fermy liczącej 1100 tuczników rasy Dan Bred utrzymywanych w systemie rusztowym. Badania przeprowadzono w celu pomiaru natężenia przepływu biogazu wynikającego z ciśnienia odniesienia w fermentatorze. Podstawą oceny hydrodynamiki przepływu gazu przez złożę szkieletowe była charakterystyka przepływu, która wynika z ciśnienia wymuszającego ten przepływ. Badania prowadzono przez 49 dni, wykazując tym samym, że korzystniej jest mieszać hydrodynamicznie, otrzymując CH_4 na poziomie około 80%.

W pracy (**O2**) przedstawiono metody oceny ekonomicznej efektywności inwestycji w biogazownię rolniczą. Opracowano m.in. model finansowy rozważając aspekty inwestycyjne - omówiono różne metody i propozycje szacowania inwestycji. Nakreślono inwestowanie w ten wrażliwy sektor rolnictwa prywatnego, uwzględniając rynek energii odnawialnej dla modelu inwestycyjnego dla Polskich warunków.

W pracy (**O3**) omówiono metody oczyszczania biogazu pod względem kontrolno-pomiarowym, przedstawiając wyniki badań eksperymentalnych przebiegu zmiany składu objętościowego biogazu na podstawie średniej dobowej produkcji. Zastosowano autorską metodę odsiarczania biogazu pod względem parametrów procesu. Wyniki pomiarów wskazały na wyraźny wpływ odsiarczania z wykorzystaniem rozwiązania adsorpcyjno-absorpcyjnego.

W pracy (O4) wskazano na ocenę innowacyjnych trendów rozwoju przemysłu biogazowego w Europie - zaprezentowano modele oparte na różnych rodzajach surowców wykorzystywanych do produkcji biogazu.

W pracy (O5) dokonano oceny roślin energetycznych, które są opłacalne w spalaniu, a których uprawa nie jest skomplikowana i kosztowna. Ocenę polskiego rolnictwa niespożywczego energetycznego przeprowadzono w kontekście perspektyw odnawialnego źródła energii, jakim jest biomasa. Dodatkowo przeprowadzono analizę potencjału biomasy jako źródła energii w kontekście: pozyskiwania energii pierwotnej, w tym energii ze źródeł odnawialnych, w skali europejskiej.

W pracy (O6) opisano przykłady układów kogeneracyjnych, które są standardowym wyposażeniem instalacji biogazowych, opartych na produkcji ciepła i energii elektrycznej. Wykazano, że w przypadku mikrogeneracji kluczowe znaczenie ma łatwość serwisowania i niskie koszty instalacji. Opracowano koncepcję instalacji mobilnych produkujących biogaz, o prostej konstrukcji kontenerowej gotowej do umieszczenia w infrastrukturze gospodarczej. Przedstawiono rekomendacje dotyczące eksploatacji modeli mikrobiogazowni, które mają największy wpływ na celowość wykorzystania odpadów rolniczych na cele energetyczne. Opracowano optymalizację agregatu kogeneracyjnego biogazowego produkującego energię elektryczną i ciepło w mikroinstalacji na potrzeby indywidualnego gospodarstwa rolnego.

W pracy (O7) wskazano na warunki produkcji biowodoru, który jest obiecującą alternatywą dla paliw kopalnych w sposób przyjazny dla środowiska. Przedstawiono obecny stan technologii produkcji biowodoru — przykłady na kontynentach (Ameryka, Afryka, Azja, Australia i Oceania) oraz w Europie pod względem efektywności ciemnej fermentacji. Opracowano innowacyjne trendy w rozwoju przemysłu biowodoru w Europie. Przedstawiono różne modele procesu biowodoru dla różnych surowców.

W pracy (O8) w odniesieniu do problemu technologii produkcji biometanu – przykład wykorzystania obornika koziego w aspekcie efektywności fotofermentacji - wskazano teoretyczny i eksperymentalny potencjał. Podjęto próbę określenia warunków procesu immobilizacji na złożu obornika koziego (w zależności od zebranego materiału badawczego), co pozwala na wykazanie aktywności flory bakteryjnej. Opracowano mechanizm procesu fotofermentacji obejmującego produkcję biometanu. Zainicjowano trendy technologiczne i przyszłe perspektywy dla sektora biometanu.

Zaprezentowane rezultaty badań w publikacjach (O1÷O8) dotyczące wydajności pozyskania biogazu (biowodoru, biometanu) oraz jego parametrów, pozwalają na

doskonalenie procesem produkcji energii odnawialnych. Uzyskane wyniki badań przedstawione w cyklu publikacji stanowiące osiągnięcie naukowe, zawierają elementy pracy poznawczej oraz walory praktyczne stanowiąc oryginalny wkład w rozwój dyscypliny naukowej.

4.8. LITERATURA

- Abas, N.; Kalair, E.; Kalai, A.; Ul Hasan, Q.; Khan, N. Nature inspired artificial photosynthesis technologies for hydrogen production: Barriers and challenges. *Int. J. Hydrogen Energy* **2020**, *45*, 20787–20799. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.010>.
- Abatzoglou, N.; Boivin, S. A review of biogas purification processes. *Biofuels Bioprod. Bioref.* **2009**, *3*, 42–71, doi:10.1002/bbb.117.
- Abbas, T.; Issa, M.; Ilinca, A. Biomass Cogeneration Technologies: A Review. *J. Sustain. Bioenergy Syst.* **2020**, *10*, 1–15. <https://doi.org/10.4236/jsbs.2020.101001>.
- Abbasi, T.; Tauseef, S.M.; Abbasi, S.A. A Brief History of Anaerobic Digestion and “Biogas.” In *Biogas Energy*; Springer New York: New York, NY, **2012**; 11–23 ISBN 978-1-4614-1040-9.
- Abd, A.A.; Othman, M.R.; Helwani, Z. Unveiling the Critical Role of Biogas Compositions on Carbon Dioxide Separation in Biogas Upgrading Using Pressure Swing Adsorption. *Biomass Convers. Biorefinery* **2022**, *13*, 13827–13840. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-02106-4>.
- Abdalla, A.M.; Hossain, S.; Nisfindy, O.B.; Azad, A.T.; Dawood, M.; Azad, A.K. Hydrogen production, storage, transportation and key challenges with applications: A review. *Energy Convers. Manag.* **2018**, *165*, 602–627. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.03.088>.
- Abdel-Shafy, H.I.; Mansour, M.S.M. Solid Waste Issue: Sources, Composition, Disposal, Recycling, and Valorization. *Egypt. J. Pet.* **2018**, *27*, 1275–1290, doi:10.1016/j.ejpe.2018.07.003.
- Abdurahman, N.H.; Azhari, N.H.; Rosli, Y.M. Ultrasonic Membrane Anaerobic System (UMAS) for Palm Oil Mill Effluent (POME) Treatment. *Int. Perspect. Water Qual. Manag. Pollut. Control* **2013**, *1*, 36–40.
- Acar, C.; Dincer, I. Selection criteria and ranking for sustainable hydrogen production options. *Int. J. Hydrogen Energy* **2022**, *47*, 40118–40137. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.07.137>.
- Act, **2023**. Act of 20 February 2015 on Renewable Energy Sources (Journal of Laws of 2022, item 1378). Available online: <https://www.fao.org/faolex/results/details/en/c/LEX-FAOC151966/> (accessed on 1 March 2023).
- Adamowicz, M. The importance of agrarian policy in sustainable development of rural areas. *Rocz. Nauk. SERiA* **2000**, *2*, 69–72.

- Ahmed, S.F.; Liu, G.; Mofijur, M.; Azad, A.K.; Hazrat, M.A.; Chu, Y.M. Physical and Hybrid Modelling Techniques for Earth-Air Heat Exchangers in Reducing Building Energy Consumption: Performance, Applications, Progress, and Challenges. *Sol. Energy* **2021a**, *216*, 274–294.
- Ahmed, S.F.; Mofijur, M.; Tarannum, K.; Chowdhury, A.T.; Rafa, N.; Nuzhat, S.; Kumar, P.S.; Vo, D.-V.N.; Lichtfouse, E.; Mahlia, T.M.I. Biogas Upgrading, Economy and Utilization: A Review. *Environ. Chem. Lett.* **2021b**, *19*, 4137–4164, doi:10.1007/s10311-021-01292-x.
- Ahmed, S. F., Mofijur, M., Parisa, T. A., Islam, N., Kusumo, F., Inayat, A., Le, V. G., Bad, I. A. Progress and Challenges of Contaminate Removal from Wastewater Using Microalgae Biomass. *Chemosphere* **2021c**, *286*, 131656. doi:10.1016/j.chemosphere.2021.131656.
- Ahmed, S.F.; Rafa, N.; Mofijur, M.; Badruddin, I.A.; Inayat, A.; Ali, M.S.; Farrok, O.; Khan, T.M.Y. Biohydrogen Production from Biomass Sources: Metabolic Pathways and Economic Analysis. *Front. Energy Res.* **2021d**, *9*, 753878.
- Akhmetshina, A.I.; Petukhov, A.N.; Gumerova, O.R.; Vorotyntsev, A.V.; Nyuchev, A.V.; Vorotyntsev, I.V. Solubility of H₂S and CO₂ in Imidazolium-Based Ionic Liquids with Bis(2-Ethylhexyl) Sulfosuccinate Anion. *J. Chem. Thermodyn.* **2019**, *130*, 173–182. <https://doi.org/10.1016/j.jct.2018.10.013>.
- Al Saedi, T.; Lorenzen, J. IEA Bioenergy Task 37 - Denmark Country Report 2019; Denmark. Available on line: <http://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html> (Accessed 12 December **2021**).
- Albuquerque, M.M.; Martinez-Burgos, W.J.; De Bona Sartor, G.; Letti, L.A.J.; De Carvalho, J.C.; Soccol, C.R.; Medeiros, A.B.P. Advances and Perspectives in Biohydrogen Production from Palm Oil Mill Effluent. *Fermentation* **2024**, *10*, 141. <https://doi.org/10.3390/fermentation10030141>.
- Aleksandrow, S.; Michalak, D. Analysis of the potential of the Łódź region in terms of building a biogas plant. *Acta Innov.* **2013**, *7*, 28–44.
- Aleksandrow, S.; Staniszevska, M. The importance of renewable energy sources in the global economy and their impact on the labor market. *Acta Innov.* **2013**, *6*, 41–45.
- Aleszczyk, Ł. Biogas Desulphurization and Dewatering Tank. Pat. 2021. Pat. 230468, **2021**.
- Allegue, L.B.; Hinge, J. Biogas upgrading evaluation of methods for H₂S removal. Danish Technological, December **2014**.

- Alham, N.A.; Prabowo, B.D.; Siregar, I.R.S.; Margono, W.C.; Azhari, U.F.; Larasati, T.D. Utilization of goat manure towards PTLB (biogas) prototypes in Simple way. In Proceedings of the 5th International Conference for Tropic Studies and Its Applications, Universitas Mulawarman, Kota Samarinda, Indonesia, 5–6 October **2021**.
- Ammenberg, J.; Gustafsson, M.; Eklund, M. IEA Bionergy Task 37 - Sweden Country Report 2019; Sweden. Available on line: <http://task37.ieabioenergy.com/> (Accessed 12 December **2021**); 48–54.
- Arthur, R.; Baidoo, M.F.; Antwi, E. Biogas as a potential renewable energy source: A Ghanaian case study. *Renew. Energy* **2011**, *36*, 1510–1516.
- Artyszak, D. Energy Plants—Characteristics of Basic Species and Their Use in the Polish Energy Industry; Warsaw, Poland, **2015**.
- Asam, Z.-Z.; Poulsen, T.G.; Nizami, A.-S.; Rafique, R.; Kiely, G.; Murphy, J.D. How Can We Improve Biomethane Production per Unit of Feedstock in Biogas Plants? *Appl. Energy* **2011**, *88*, 2013–2018, doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.036>.
- Association, **2001**. Association of Tourist Communes of the Gostynin Lake District, Agricultural Biogas. Available online: <http://www.pojezierzegostyninskie.pl/pliki/file/broszura.pdf> (accessed on 29 October 2021).
- ASC, 2000. Aspen Systems Corp. Combined Heat and Power—A Federal Manager's Resource Guide; US Department of Energy: Washington, DC, USA, 2000.
- Baba, Y.; Tada, C.; Watanabe, R.; Fukuda, Y.; Chida, N.; Nakai, Y. Anaerobic Digestion of Crude Glycerol from Biodiesel Manufacturing Using a Large-Scale Pilot Plant: Methane Production and Application of Digested Sludge as Fertilizer. *Bioresour. Technol.* **2013**, *140*, 342–348, doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.04.020>.
- Baier, U. IEA Bionergy Task 37 - Switzerland Country Report **2019**; Switzerland. Available on line: <http://task37.ieabioenergy.com/> (Accessed 12 December 2021); 55–58. Available online: https://task37.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/sites/32/2022/02/IEA_Task_37_Country_Report_Summaries_2019.pdf (accessed on 12 December 2021).
- Baltic Green Belt. Available online: <http://balticgreenbelt.org.pl/> (accessed on 30 September **2012**).
- Banasik, P.; Białowiec, A.; Czekala, W.; Chomiuk, D.; Dach, J.; Filipiak, I.; Fugol, M.; Kacała, M.; Kowalczyk-Juško, A.; Kolasiński, M.; et al. Raport Biogaz w Polsce;

- Poland. Available on line: <https://magazynbiomasa.pl/?s=raport+Biogaz>, Polish (Accessed 25 October **2022**);
- Barańkiewicz, D.; Bulska, E. Chemical Speciation—Problems and Possibilities. Malamut Publishing House: Warsaw, Poland, **2009**.
- Barbarossa, V.; Barzagli, F.; Mani, F.; Lai, S.; Stoppioni, P.; Vanga, G. Efficient CO₂ Capture by Non-Aqueous 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol (AMP) and Low Temperature Solvent Regeneration. *RSC Adv.* **2013**, 3, 12349–12355. <https://doi.org/10.1039/c3ra40933c>.
- Barbusiński, K. Calcium and magnesium peroxides—Application for commercial purposes and in environmental protection. *Chemik* **2006**, 9, 433–438.
- Bartnikowska, S.; Frankowski, J. Advantages and Disadvantages of Perennials Grown for Energy Purposes. Energy Security. Raw Materials and Energy Markets. In *Energy–Security in Research Challenges; Law–Economy–Society–Biotechnologies–Environmental Protection–Health Safety*; Kwiatkiewicz, P., Szczerbowski, R., Eds.; Poznan, Poland, **2017**; Volume 2, pp. 325–332.
- Bastian-Pinto, C.; Brandão, L.; Hahn, W.J. Flexibility as a source of value in the production of alternative fuels: The ethanol case. *Energy Economics* **2009**, 31:411-422.
- Baus, D. Overpopulation and the Impact on the Environment, City University of New York: New York, **2017**.
- Becerra-Quiroz, A.-P.; Rodríguez-Morón, S.-A.; Acevedo-Pabón, P.-A.; Rodrigo-Illari, J.; Rodrigo-Clavero, M.-E. Evaluation of the Dark Fermentation Process as an Alternative for the Energy Valorization of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW) for Bogotá, Colombia. *Appl. Sci.* **2024**, 14, 3437. <https://doi.org/10.3390/app14083437>.
- Benato, A.; Macor, A. Biogas Engine Waste Heat Recovery Using Organic Rankine Cycle. *Energies* **2017**, 10, 327. <https://doi.org/10.3390/en10030327>.
- Benato, A.; Macor, A. Italian Biogas Plants: Trend, Subsidies, Cost, Biogas Composition and Engine Emissions. *Energies* **2019**, 12, 979. <https://doi.org/10.3390/en12060979>
- Benjamin, M.F.D.; Tan, R.R.; Razon, L.F. Probabilistic multi-disruption risk analysis in bioenergy parks via physical input–output modeling and analytic hierarchy proces. *Sustainable Production and Consumption* **2015**, 1, January, 22-33, <https://doi.org/10.1016/j.spc.2015.05.001>
- Berenguer, P.; Cala, S.; Santiveri, F.; Boixadera, J.; Lloveras, J. Copper and zinc soil accumulation and plant concentration in irrigated maize fertilized with liquid swine manure. *Agron. J.* **2008**, 100, 1056–1061.

- Beware **2021**. Beware of Manure Pit Hazards. Available online: <https://nasdonline.org/1292/d001097/beware-of-manure-pit-hazards.html> (accessed on 10 January 2021).
- Bicudo, J.R.; Schmidt, D.R.; Gay, S.W.; Gates, R.S.; Jacobson, L.D.; Hoff, S.J. Air quality and emissions from livestock and poultry production/waste management systems. In Prepared as a White Paper for Nat. Cent. for Manure and Animal Waste Management; North Carolina University: **2002**; 157.
- Biernat, K.; Samson-Bręk, I. Review of biogas purification technology to natural gas quality. *Chemik* **2011**, 65, 435–44
- Bochmann, G. IEA Bionergy Task 37 - Austria Country Report 2019; Austria. Available online: <http://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html> (Accessed 12 December **2021**).
- Boe, K.; Angelidaki, I. Serial CSTR digester configuration for improving biogas production from manure. *Water Res.* **2009**, 43, 166–172.
- Bohodziewicz, J.; Kuglarz, M.; Mrowiec, B. Intensification of pig manure digestion by co-substrate addition in the form of municipal biowaste. *Nauka Przyr. Technol.* **2011**, 5, 1–8.
- Bolatkhan, K.; Kossalbayev, B.D.; Zayadan, B.K.; Tomo, T.; Veziroglu, T.N.; Allakhverdiev, S.I. Hydrogen Production from Phototrophic Microorganisms: Reality and Perspectives. *Int. J. Hydrogen Energy* **2019**, 44, 5799–5811
- Boldrin, A.; Baral, K.R.; Fitamo, T.; Vazifekhoran, A.H.; Jensen, I.G.; Kjaergaard, I.; Lyng, K.-A.; Nguyen, Q.V.; Nielsen, L.S.; Triolo, J.M. Optimised biogas production from the codigestion of sugar beet with pig slurry: Integrating energy, GHG and economic accounting. *Energy* **2016**, 112, 606–617.
- Boomsma, T.K.; Linnerud, K. Market and policy risk under different renewable electricity support schemes. *Energy* **2015**, 89:435-448.
- Borja, R. 2.55 - Biogas Production. In Comprehensive Biotechnology (Second Edition); Moo-Young, M., Ed.; Academic Press: Burlington, **2011**, 785–798 ISBN 978-0-08-088504-9.
- Böhm, R. Epidemiological Risks Related to Chicken Manure and Strategies for the Validation of Treatment Methods under the Aspect of Hygienic Safety; Universität Hohenheim Publishing House: Stuttgart, Germany, **2005**.
- Bueschke, W.; Wisłocki, K.; Pielecha, I.; Skowron, M.; Cieślik, W. Influence of the distance between gas injector and intake valve on combustion indicators and NO_x emission in dual fuel CI engine. *J. Mech. Transp. Eng.* **2017**, 69, 5–13.

- Budiyono; Widiyasa, I.N.; Johari, S.; Sunarso. The kinetic of biogas production rate from cattle manure in batch mode. *Int. J. Chem. Biol. Eng.* **2010**, *3*, 39–44.
- Burczyk, H. Usefulness of one-year-old plants grown for the production of biomass for the purposes of commercial power industry. *Probl. Agric. Eng.* **2012**, *1*, 59–68.
- Burton, C.H. Manure management–treatment strategies for sustainable agriculture, second edition. *Livest. Sci.* **2006**, *102*, 256–257.
- BKB, **2022**. <https://kib.pl/wp-content/uploads/2020/07/Biala-Ksiega-Biometanu.pdf> (Accessed on 14 November 2022);
- BPM, **2021**. Biogas Plant Market - Growth, Trends, COVID-19 Impact, and Forecasts (2021 - 2026). <https://www.researchandmarkets.com/reports/4997528/biogas-plant-market-growth-trends-covid-19#rela2-1824151> (accessed on 03 October 2021).
- Callaghan, F.J.; Wase, D.A.J.; Thayanithy, K.; Forster, C.F. Codigestion of waste organic solids-batch studies. *Bioresour. Technol.* **1999**, *67*, 117–122.
- Cavinato, C.; Fatone, F.; Bolzonella, D.; Pavan, P. Thermophilic Anaerobic Co-Digestion of Cattle Manure with Agro-Wastes and Energy Crops: Comparison of Pilot and Full Scale Experiences. *Bioresour. Technol.* **2009**, *101*, 545–550, doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.08.043>.
- Carpenter, S.R.; Caraco, N.F.; Correll, D.L.; Howarth, R.W.; Sharpley, A.N.; Smith, V.H. Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen. *Ecol. Appl.* **1998**, *8*, 559–568.
- Castillo, R.T.; Luengo, P.L.; Alvarez, J.M. Temperature effect on anaerobic of bedding manure in a one phase system at different inoculums concentration. *Agric. Ecosyst. Environ.* **1995**, *54*, 55–66.
- Çakir, U.; Çomakli, K.; Yüksel, F. The role of cogeneration systems in sustainability of energy. *Energy Convers. Manag.* **2012**, *63*, 196–202.
- Cebula, J. Selected Methods of Agricultural and Landfill biogas Treatment; Publishing House of the Silesian University of Technology: Gliwice, Poland, **2012**; ISBN 978-83-7335-983-3.
- Cebula, J.; Sołtys, J. Removal of Volatile Sulfur Compounds from Biogas Produced in an Agricultural Micro Biogas Plant with the Use of Halloysite Sorbent. Baltic Biogas Forum, Paper, September **2012**. Available online: <http://www.imp.gda.pl/BF2012/prezentacje/p254.pdf> (accessed on 3 December 2015).
- Cengel, Y.A.; Boles, M.A. Thermodynamics: An Engineering Approach; McGraw-Hill Education: New York, NY, USA, **2018**.

- Ceseña, M.E.A.; Mutale, J.; Rivas-Dávalos, F. Real options theory applied to electricity generation projects: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2013**, 19:573-581.
- Clemens, J.; Trinborn, M.; Weiland, P.; Amon, B. Mitigation of greenhouse gas emissions by anaerobic digestion of cattle slurry. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2006**, 112, 171–177.
- Chai, Y.H.; Mohamed, M.; Cheng, Y.W.; Chin, B.L.F.; Yiin, C.L.; Yusup, S.; Lam, M.K. A review on potential of biohydrogen generation through waste decomposition technologies. *Biomass Convers. Biorefinery* **2023**, 13, 8549–8574. <https://doi.org/10.1007/s13399-021-01333-z>.
- Chang, C. A critical analysis of recent advances in the techniques for the evaluation of renewable energy projects. *Int J Project Manage* **2013**;31:1057-1067.
- Chen, Y.; Cheng, J.J.; Creamer, K.S. Inhibition of anaerobic digestion process: A review. *Bioresour. Technol.* **2008**, 99, 4044–4064.
- Chen, C.; Sun, M.; Liu, Z.; Zhang, J.; Xiao, K.; Zhang, X.; Song, G.; Chang, J.; Liu, G.; Wang, H.; et al. Robustness of Granular Activated Carbon-Synergized Anaerobic Membrane Bioreactor for Pilot-Scale Application over a Wide Seasonal Temperature Change. *Water Res.* **2020**, 189, 116552, [doi:https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116552](https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116552).
- Chen, X.Y.; Vinh-Thang, H.; Ramirez, A.A.; Rodrigue, D.; Kaliaguine, S. Membrane Gas Separation Technologies for Biogas Upgrading. *RSC Adv.* **2015**, 5, 24399–24448. <https://doi.org/10.1039/c5ra00666j>.
- Cherosky, P.; Li, Y. Hydrogen sulfide removal from biogas by bio-based iron sponge. *Biosyst. Eng.* **2013**, 114, 55–59.
- Cherubini, F.; Strømman, A.H. Life cycle assessment of bioenergy systems: State of the art and future challenges. *Bioresour. Technol.* **2011**, 102, 437–451.
- Choi, W.-J.; Cho, K.-C.; Lee, S.-S.; Shim, J.-G.; Hwang, H.-R.; Park, S.-W.; Oh, K.-J. Removal of Carbon Dioxide by Absorption into Blended Amines: Kinetics of Absorption into Aqueous AMP/HMDA, AMP/MDEA, and AMP/Piperazine Solutions. *Green Chem.* **2007**, 9, 594–598. <https://doi.org/10.1039/b614101c>.
- Chong, M.-L.; Sabaratnam, V.; Shirai, Y.; Hassan, M.A. Biohydrogen production from biomass and industrial wastes by dark fermentation. *Int. J. Hydrogen Energy* **2009**, 34, 3277–3287, ISSN 0360-3199. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2009.02.010>.
- Ciccoli, R.; Sperandei, M.; Petrazzuolo, F.; Broglia, M.; Chiarini, L.; Correnti, A.; Farneti, A.; Pignatelli, V.; Tabac-chioni, S. Anaerobic Digestion of the above Ground Biomass

- of Jerusalem Artichoke in a Pilot Plant: Impact of the Preservation Method on the Biogas Yield and Microbial Community. *Biomass Bioenergy* **2017**, 108, 190–197, doi:<https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.11.003>.
- Cihlar, J.; Villar Lejarreta, A.; Wang, A.; Melgar, F.; Jens, J.; Rio, P.; Leun, v.d.K. ASSET Study on Hydrogen Generation in Europe: Overview of Costs and Key Benefits; European Commission: Brussels, Belgium; Luxembourg, **2021**.
- Comino, E.; Rosso, M.; Riggio, V. Development of a Pilot Scale Anaerobic Digester for Biogas Production from Cow Manure and Whey Mix. *Bioresour. Technol.* **2009**, 100, 5072–5078, doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.05.059>.
- Commission, **2023**. Commission Regulation (EU) No. 142/2011 of 25 February 2011 on the implementation of Regulation (EC) No. 1069/2009 of the European Parliament and of the Council laying down sanitary rules for animal by-products. not intended for human consumption. and on the implementation of Council Directive 97/78/EC as regards certain samples and items exempt from veterinary checks at the borders (OJ L 54 of 26 February 2011). Available online: <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2011:054:0001:0254:EN:PDF> (accessed on 1 March 2023).
- Corn, **2021**. Available online: <https://www.yara.pl/odzywianie-roslin/kukurydza/> (accessed on 28 January 2021).
- Correll, D.L. The role of phosphorus in the eutrophication of receiving waters: A review. *J. Environ. Quality* **1998**, 27, 261–266.
- Cosoli, P.; Ferrone, M.; Pricl, S.; Fermeglia, M. Hydrogen sulphide removal from biogas by zeolite adsorption. Part I. GCMC molecular simulations. *Chem. Eng. J.* **2008**, 145, 86–92.
- Cucui, G.; Ionescu, C.A.; Goldbach, I.R.; Coman, M.D., Moiceanu; Marin, E.L. Quantifying the Economic Effects of Biogas Installations for Organic Waste from Agro-Industrial Sector. *Sustainability* **2018**, 10, 2582; doi:10.3390/su10072582.
- Curkowski, A.; Onkisz-Popławska, A.; Mroczkowski, P.; Zowski, M.; Wiśniewski, G. A Guide for Investors Interested in Building Agricultural Biogas Plants; The work was commissioned by the Ministry of Economy at the Institute for Renewable Energy; Instytut Energetyki Odnawialnej: Warszawa, Poland, **2011**, 126.
- Cybulska, H.; Gaj, K.; Knop, F.; Steininger, M. Research on the Sorption of Hydrogen Sulphide Contained in Biogas on Activated Turf Ore; Institute of Environmental Protection Engineering, Wrocław University of Technology, **2021**.

- Czczko, R. Growing selected energy crops. *Bezpieczeństwo I ekologia. Autobusy* 170-172, Available online: file:///C:/Users/Grzes/Downloads/Czczko_Uprawy.pdf, (accessed on 1 March 2023).
- Czekała, W.; Kaniewski, J. *Prospects for the Development of Biogas Plants in the Rural Areas of the Silesian Province*; Wydaw. Akademia Słońca Krzysztof Frąszczak: Poznań, Poland, 2015; ISBN 978-83-944103-0-8
- Czekała, W.; Pilarski, K.; Dach, J.; Janczak, D.; Szymańska, M. Analysis of management possibilities for digestate from biogas plant. *Tech. Rol. Ograd. Leśna* 2012, 4, 13–15.
- Czerwińska, E.; Kalinowska, K. Conditions of Conducting of Methane Fermentation in Biogas Plant. *Tech. Rol. Ograd. Leśna*, Poland, 2014; 12–14. Available online: <https://bibliotekanauki.pl/articles/882912> (accessed on 28 May 2024).
- Dach, J.; Przybył, J.; Zbytek, Z.; Lewicki, A.; Janczak, D.; Cieślik, M. Methane emissions from livestock production in Poland: Scale and potential costs. *J. Res. Appl. Agric. Eng.* 2013, 58, 25–28
- Dan Bred, 2021. DanbredGenes for Global Pig Production. Available online: www.danbred.com (accessed on 20 May 2021).
- Dareiotti, M.A.; Kornaros, M. Anaerobic mesophilic co-digestion of ensiled sorghum, cheese whey and liquid cow manure in a two-stage CSTR system: Effect of hydraulic retention time. *Bioresour. Technol.* 2015, 175, 553–562.
- Darewicz, M.; Dziuba, J. Structure and functional properties of milk proteins. *Food Sci. Technol. Qual.* 2005, 2, 47–60.
- Das, D.; Veziroglu, T.N. Advances in biological hydrogen production processes. *Int. J. Hydrogen Energy* 2008, 33, 6046.
- Dawood, F.; Anda, M.; Shafiullah, G.M. Hydrogen production for energy: An overview. *Int. J. Hydrogen Energy* 2020, 45, 3847–3869. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.12.059>.
- Demirbas, A.H. Biofuels for future transportation necessity. *Energy Educ. Sci. Technol. Part A Energy Sci. Res.* 2010, 26, 13–23. ISSN: 1308-772X.
- Demirci, G.G.; Demirer, G.N. Effect of initial COD concentration, nutrient addition, temperature and microbial acclimation on anaerobic treatability of broiler and cattle manure. *Bioresour. Technol.* 2004, 93, 109–117.
- Deng, L.; Chen, Z.; Yang, H.; Zhu, J.; Liu, Y.; Długi, Y.; Zheng, D. Biogas fermentation of swine slurry based on the separation of concentrated liquid and low content liquid. *Biomass Bioenergy* 2012, 45, 187–194

- Deng, L.; Li, Y.; Chen, Z.; Liu, G.; Yang, H. Separation of swine slurry into different concentration fractions and its influence on biogas fermentation. *Appl. Energy* **2014a**, *114*, 504–511.
- Deng, Y.; Xu, J.; Liu, Y.; Mancl, K. Biogas as a Sustainable Energy Source in China: Regional Development Strategy Application and Decision Making. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014b**, *35*, 294–303, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.04.031>.
- Deublein, D.; Steinhauser, A. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*; Wiley-VCH: Weinheim, Germany, **2008**.
- Deremince, B.; Königsberger, S. Biogas & Biomethane Workshop on the Supply Potentials and Renewable Gases for TYNDP **2018**. https://www.entsog.eu/public/uploads/files/publications/Events/2017/tyndp/EBA_Biogas%20and%20biomethane-final.pdf (accessed on 13 May 2021).
- Dębska, B. Properties of humic substances in soil fertilized with slurry, Dissertation No. 110, University of Technology and Agriculture, Bydgoszcz **2004**, 112
- Directive, **2001**. Directive 2001/77/WE the European Parliament and the Council on 27 September 2001 of the Promotion of Electricity Produced from Renewable Energy Sources in the Internal Market (Dz.U. L 283 z 27.10.2001. 33). Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PL/TXT/PDF/?uri=CELEX:32001L0077&from=LV> (accessed on 1 March 2023).
- Donham, K.J.; Thelin, A. Rural Occupational and Environmental Health, Safety, and Prevention,; Published 2016 by John Wiley & Sons, Inc.; *Agricultural Medicine* **2016**; 127–136 and 534–539; ISBN: 978-1-118-64720-2.
- Doskočil, R.; Škapa, S.; Olšová, P. Success evaluation model for project management. *E+M. Ekonomie a Management = Economics and Management* **2016**, *4*, 167-185.
- Dublein, D.; Steinhauser, A. *Biogas from Waste and Renewable Resources: An Introduction*; WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, Germany, **2008**.
- Duda, K.; Wierzbicki, S.; Smieja, M.; Mikulski, M. Comparison of performance and emissions of a CRDI' diesel engine fueled with biodiesel of different origin. *Fuel* **2018**, *212*, 202–222.
- Dudek, J.; Klimek, P.; Kołodziejak, G.; Niemczewska, J.; Zalewska-Bartos, J. Technologies for Energetic Use of Landfill Gas. USA EPA, Oil and Gas Institute, Kraków. Available online: <http://www.metmarkt.com/project/2/dws/out/LFG-podrecznik.pdf> (accessed on 22 February **2021**).

- Dumont, M.; Siemers, W. IEA Bioenergy Task 37 - Netherlands Country Report 2019; Netherlands. Available on line: <http://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html> (Accessed 12 December **2021**);
- Durana, P.; Michalkova, L.; Privara, A.; Marousek, J.; Tumpach, M. Does the life cycle affect earnings management and bankruptcy?, *Oeconomia Copernicana* **2021**, 12(2), 425-461, DOI: 10.24136/oc.2021.015
- Działkowiec. Available online: <http://dzialkowiec.pixelart.com.pl/kukurydza.html> (accessed on 28 January **2021**).
- De Arespachoga, N.; Valderrama, C.; Mesa, C.; Bouchy, L.; Cortina, J.L. Biogas deep clean-up based on adsorption technologies for Solid Oxide Fuel Cell applications. *Chem. Eng. J.* **2014**, 255, 593–603.
- De Vries, J.W.; Corré, W.J.; Dooren, H.J.C. Environmental Assessment of Untreated Manure Use, Manure Digestion and Co-Digestion with Silage Maize; Wageningen UR Livestock Research. ISSN 1570 - 8616, **2010**.
- Ebunilo, P.O.; Aliu, S.A.; Orhorhoro, E.K. Performance Study of a Biogas Pilot Plant Using Domestic Wastes from Benin Metropolis. *Int. J. Therm. Environ. Eng.* **2015**, 10, 135–141.
- Edenhofer, O.R.; Pichs-Madruga, Y.; Sokona, E.; Farahani, S.; Kadner, K.; Seyboth, A.; Adler, I.; Baum, S.; Brunner, P.; Eickemeier, B.; et al (Eds.) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change; Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*; Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, **2014**.
- El-Mashad, H.M.; Van Loon, W.K.; Zeeman, G.; Bot, G.P. Rheological Properties of Dairy Cattle Manure. Available online: https://www.academia.edu/17788307/Rheological_properties_of_dairy_cattle_manure (accessed on 10 January **2021**).
- Egie, **2021**. Available online: https://biogaz.egie.pl/?gclid=CjwKCAiAv_KMBhAzEiwAs-rX1K8yaEyktBv--I11UG4APgigmSLqnmFWyfenxDzm7un_kMpbzXcWThoCIMAQAxD_BwE (accessed on 29 October 2021).
- Energy, **2024**. Available online: <https://www.dceew.gov.au/energy/hydrogen> (accessed on 12 March 2024).

- Energy Europe, **2024**. Available online: https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal/repowerEUaffordable-secure-and-sustainable-energy-europe_en (accessed on 12 March 2024).
- Energy Systems, **2024**. Available online: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen_en#eu-hydrogen-strategy (accessed on 14 March 2024).
- Ermich, S.; Pruszyńska, E. Comprehensive biogas treatment—Biosulfex device: Operational results. *Gaz, Woda Tech. Sanit.* **2008**, 4, 6–9.
- Eroğlu, E.; Eroğlu, İ.; Gündüz, U.; Türker, L.; Yücel, M. Biological hydrogen production from olive mill wastewater with two-stage processes. *Int. J. Hydrogen Energy* **2006**, 31, 1527.
- European Commission, **2024**. European Commission. Key actions of the EU Hydrogen Strategy. Available online: https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/hydrogen/key-actions-eu-hydrogen-strategy_en (accessed on 12 March 2024).
- EIA, **2019**. U.S. Energy Information Administration (EIA). *Electricity Explained*; U.S. Energy Information Administration (EIA): Washington, DC, USA, 2019.
- EKONOM, **2021**. <http://www.energia.eco.pl/EKONOM/ASPEKT/WSKAZ.HTM> (accessed on 04 October 2021).
- ETC, **2021**. Energy Transitions Commission (ETC). Making the Hydrogen Economy Possible: Accelerating Clean Hydrogen in an Electrified Economy Version 1.2 April 2021. Available online: <https://energy-transitions.org/wp-content/uploads/2021/04/ETC-Global-Hydrogen-Report.pdf> (accessed on 10 March 2024).
- Faber A. Potential and consequences of agricultural biomass production for energy, Płonsk **2008**. http://www.cire.pl/pliki/2/potenc_konsekwenc_.pdf, (accessed on 15 June 2016).
- Faber, A.; Kuś, J.; Matyka, M. *Cultivation of plants for the needs of energy*; Warsaw, Poland, W&B Wiesław Krzewiński, **2009**; 30.
- Fernandes, B.; Cunha, J.; Ferreira, P. The use of real options approach in energy sector investments. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2011**;15:4491-4497.
- Ferraren-De Cagalitan, D.D.T.; Abundo, M.L.S. A review of biohydrogen production technology for application towards hydrogen fuel cells. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2021**, 151, 111413. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111413>.

- Ferrer, I.; Gamiz, M.; Almeida, M.; Ruiz, A. Pilot Project of Biogas Production from Pig Manure and Urine Mixture at Ambient Temperature in Ventanilla (Lima, Peru). *Waste Manag.* **2009**, 29, 168–173, doi:<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2008.02.014>.
- Filanowski P., Pituła M., Rybicki Cz., **2013**. Sposób oczyszczania biogazu do parametrów gazu przesyłowego oraz instalacja do oczyszczania biogazu. Polska. Zgłoszenie patentowe P.403141 z dnia 13.03.2013 r.
- Finance, **2021**. <https://corporatefinanceinstitute.com/resources/knowledge/finance/discounted-payback-period/> (accessed on 04 October 2021).
- Fischer, T. Biogas aus Gras Monofermentation von Energiepflanzen [Make biogas out of grass silage–mono fermentation of energy crop]. *Krieg Fischer Ing. GmbH* **2005**. Available online: http://www.kriegfischer.de/texte/Bremen_050414.pdf (accessed on date).
- Fleten, S.; Molnár, P.; Nygård, M.T.; Linnerud, K. Green certificates and investments in small hydro power plants **2016**, 1-6.
- Flizikowski, J.; Bieliński, K. Designing environmental energy processes. ATR Publishing House, Bydgoszcz, **1999**.
- Forster-Carneiro, T.; Pérez, M.; Romero, L.I. Influence of total solid and inoculum contents on performance of anaerobic reactors treating food waste. *Bioresour. Technol.* **2008**, 99, 6994–7002.
- Frankowski, J. Possibilities of Growing and Using Perennial Grasses for Energy Purposes. Energy Security. Raw Materials and Energy Markets. In *Energy–Security in Research Challenges; Law–Economy–Society–Biotechnologies–Environmental Protection–Health Safety*; Kwiatkiewicz, P., Szczerbowski, R., Eds.; Poznan, Poland, **2017a**; Volume 2, 333–342.
- Frankowski, J. Assessment of energy suitability of selected types of cereals. Energy security. raw materials and energy markets. In *Energy–Security in Research Challenges; Law–Economy–Society–Biotechnologies–Environmental Protection–Health Safety*; Kwiatkiewicz, P., Szczerbowski, R., Eds.; Poznan, Poland, **2017b**; Volme 2, 343–352.
- Frankowski, J.; Burczyk, H. Biomass of Annual Energy Plants as an Element of Diversification of Energy Sources in Poland. In *Monographs Environmental Engineering–Young Eye*; Ecoenergy, I., Skoczko, J., Piekutin, M., Drobiszewskiej, I., Mokryckiego, R., Eds.; Publishing House of the Białystok University of Technology, Białystok, Poland, **2016**, 83–109.

- Frare, L.M.; Bortoleto, R.M.; Mufalo, A.N., Jr.; Pereira, N.C.; Gimenes, M.L. Optimum liquid/gas ratio determination for removing H₂S from biogas using Fe-EDTA solution. 2nd Mercosur Congress on Chemical Engineering, 4th Mercosur Congress on Process Systems Engineering, Costa Verde, Brasil. Available online: http://www.enpromer2005.eq.ufrj.br/nukleo/pdfs/0968_trabalho_968_revisado_final.pdf (accessed on 12 December 2015).
- Gabryszewska, M.; Rogulska, M. Agricultural biogas plants. Bariery rozwoju. *Przemysł Chem.* **2009**, 3, 248–251.
- Gaj, K.; Cybulska-Szulc, H. Time changeability model of the bog ore sorption ability. *Ecol. Chem. Eng.* **2014**, 21, 113–123.
- Gaj, K.; Cybulska-Szulc, H.; Knop, F.; Steininger, M. Examination of biogas hydrogen sulphide sorption on a layer of activated bog ore. *Environ. Prot. Eng.* **2008**, 4, 33–41.
- Gao, M.; Wang, D.; Wang, Y.; Wang, X.; Feng, Y. Opportunities and Challenges for Biogas Development: A Review in 2013-2018. *Curr. Pollut. Rep.* **2019**, 5, 25–35, doi:10.1007/s40726-019-00106-7.
- Gas, **2021**. Gas Monitors For Consideration in Swine Barn Activities (High-Hazard H₂S and Methane Operations). Available online: <https://gpcah.public-health.uiowa.edu/wp-content/uploads/2016/11/Monitor-Information.pdf> (accessed on 10 January 2021).
- Gelegenis, J.; Georgakakis, D.; Angelidaki, I.; Mavris, V. Optimization of biogas production by co-digesting whey with diluted poultry manure. *Renew. Energy* **2007**, 32, 2147–2160.
- Gest, H.; Kamen, M.D. Photoproduction of molecular hydrogen by *Rhodospirillum rubrum*. *Science* **1949**, 109, 558.
- Głodek, E. Obtaining and Using Agricultural Biogas for Energy Purposes; Silesian Institute: Opole, Poland, **2007**.
- Głodek, E.; Janecka, L.; Kalinowski, W.; Werszler, A.; Garus, T.; Kościanowski, J.; Siemiątkowski, G. *Harvesting and Energetic Use of Agricultural Biogas: Technological Process, Part I*; Institute of Mineral Building Materials: Opole, Poland, **2007**.
- Golimowski, W.; Krzaczek, P.; Marcinkowski, D.; Gracz, W.; Wałowski, G. Impact of Biogas and Waste Fats Methyl Esters on NO, NO₂, CO, and PM Emission by Dual Fuel Diesel Engine. *Sustainability* **2019**, 11, 1799; <https://doi.org/10.3390/su11061799>
- Gołaszewski, J. The use of substrates of agricultural origin in biogas plants in Poland. *Adv. Agric. Sci.* **2011**, 2, 69–94.

- Gołaszewski, J. (Ed.). *Model Agro-Energy Complexes: Technologies for Obtaining and Conditioning Agricultural and Water Biomass for Biogas Plants and Gasifiers*; Publishing house UWM: Olsztyn, Poland, **2014**.
- Gostomczyk, W. State and Prospects for the Development of the Biogas Market in the EU and Poland – Economic Approach. *Scientific Journals of the Warsaw University of Life Sciences Problems of World Agriculture* volume 17 (XXXII), issue 2, **2017**, 48–64, DOI: 10.22630/PRS.2017.17.2.26
- Gómez-Díaz, D.; López, M.; Navaza, J.M.; Villarquide, L. Influence of Organic Co-Solvents upon Carbon Dioxide Chemical Absorption. *J. Taiwan Inst. Chem. Eng.* **2018**, 91, 413–419. <https://doi.org/10.1016/j.jtice.2018.06.012>.
- Góral, S. Value in use of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus L.*). *Probl. Noteb. Adv. Agric. Sci.* **1999**, 468, 89-94.
- Grande, C.A.; Morence, D.G.B.; Bouzga, A.M.; Andreassen, K.A. Silica Gel as a Selective Adsorbent for Biogas Drying and Upgrading. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2020**, 59, 10142–10149. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.0c00949>.
- Grassi, G.; Trebbi, G.; Pike, D.C. (Eds.). *Electricity from Biomass*. In Newbury Berkshire; CPL Press: **1992**; 72.
- Green, **2021**. Green Energy. Available online: <https://zielona-energia.cire.pl/> (accessed on 28 January 2021).
- Green Hydrogen, **2024**. Current Trends of Biohydrogen Production from Biomass—Green Hydrogen. Monograph. ISBN 978-83-8237-021-8. Available online: <https://dglb.nubip.edu.ua/handle/123456789/8103> (accessed on 12 March 2024). <https://doi.org/10.22630/SGGW.IIM.9788382370218>.
- Grimsby, L.K.; Gulbrandsen, L.; Eik, L.O.; Msalya, G.; Kifaro, G.C. The prospect of biogas among small-holder dairy goat farmers in the Uluguru Mountains, Tanzania, African. *J. Food Agric. Nutr. Dev.* **2016**, 16, 10723–10737.
- Gróf, N.; Barbušová, J.; Hencelová, K.; Hutňan, M. Absorption removal of hydrogen sulfide from recirculated biogas. *Acta Chim. Slovaca* **2020**, 13, 13—18, doi:10.2478/acs-2020-0003.
- Grzybek, A.; Gradziuk, P.; Kowalczyk, K. *Straw—Energy Fuel; The village of Tomorrow*: Warsaw, Poland, **2001**.
- Guan, T.Y.; Holley, R.A. Pathogen survival in swine manure environments and transmission of human enteric illness—A review. *J. Environ. Qual.* **2003**, 32, 383–392.

- Guan, Z.; Wang, Y.; Yu, X.; Shen, Y.; He, D.; Tang, Z.; Li, W.; Zhang, D. Simulation and Analysis of Dual-Reflux Pressure Swing Adsorption Using Silica Gel for Blue Coal Gas Initial Separation. *Int. J. Hydrog. Energy* **2020**, *46*, 683–696. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.09.209>.
- Guide, **2022**. Guide to Biogas- From Production to Use.Pdf - Energypedia Available online: https://energypedia.info/wiki/File:Guide_to_Biogas-_From_Production_to_Use.pdf (accessed on 24 January 2022).
- Gungor, K.; Karthikeyan, K.G. Probable phosphorus solid phases and their stability in anaerobically digested pig manure. *Transactions of ASAE*. **2005**, *48*, 1509-1520.
- Guo, R.; Zhu, C.; Yin, Y.; Fu, T.; Ma, Y. Mass Transfer Characteristics of CO₂ Absorption into 2-Amino-2-Methyl-1-Propanol Non-Aqueous Solution in a Microchannel. *J. Ind. Eng. Chem.* **2019**, *75*, 194–201. <https://doi.org/10.1016/j.jiec.2019.03.024>.
- Guzenda, R.; Świgoń, J. Technical and ecological aspects of energy use of wood and wood waste. *Fuel Energy Manag.* **1997**, *1*, 10–12.
- GBA, **2021**. German Biogas Association. Biogas market data in Germany 2017/2018. Available online: [https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/18-07-05_Biogasindustryfigures2017-2018_english.pdf](https://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/18-07-05_Biogasindustryfigures2017-2018_english.pdf) (accessed on 13 May 2021).
- GUS, **2013**. Energia ze Źródeł Odnawialnych w 2016–2021. Available online: <https://stat.gov.pl/wyszukiwarka/?query=tag:energia+ze+%C5%BAr%C3%B3de%C5%82+odnawialnych> (accessed on 1 March 2023).
- Hagen, M.; Polman, E.; Jensen, J.; Myken, A.; Jönsson, O.; Dahl, A. Adding gas from biomass to the gas grid, Final Report **2001**, Contract No: XVII/4.1030/Z/99-412.
- Hanafiah, M.M.; Mohamed Ali, M.Y.; Abdul Aziz, N.I.H.; Ashraf, M.A.; Halim, A.A.; Lee, K.E.; Idris, M. Biogas production from goat and chicken manure in Malaysia. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **2016**, *15*, 529–535.
- Hao, X.; Chang, C.; Janzen, H.H.; Hill, B.R.; Ormann, T. Potential nitrogen enrichment of soil and surface water by atmospheric ammonia sorption in intensive livestock production areas. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2005**, *110*, 185–194.
- Haque, A.; Kabir, A.; Hashem, A.; Azad, A.K.; Kamruj, M.; Bhuyian, J.; Rahmann, M. Efficacy of biogas production from different types of livestock manures. *Int. J. Smart Grid* **2021**, *5*, 158–166.
- Harjinder, K.; Kommalapati, R.R. Biochemical methane potential and kinetic parameters of goat manure at various inoculum to substrate ratios. *Sustainability* **2021**, *13*, 12806.

- Hawkes, F.R.; Dinsdale, R.; Hawkes, D.L.; Hussy, I. Sustainable fermentative hydrogen production: Challenges for process optimization. *Int. J. Hydrogen Energy* **2002**, *27*, 1339–1347.
- Heerenklage, J.; Rechtenbach, D.; Atamaniuk, I.; Alassali, A.; Raga, R.; Koch, K.; Kuchta, K. Development of a method to produce standardised and storable inocula for biomethane potential tests-Preliminary steps. *Renew. Energy* **2019**, *143*, 753–761.
- Heggedal, A.; Linnerud, K.; Fleten, S. Uncertain climate policy decisions and investment timing: Evidence from small hydropower plants. SSRN eLibrary **2011**.
- Heldebrant, D.J.; Yonker, C.R.; Jessop, P.G.; Phan, L. Organic Liquid CO₂ Capture Agents with High Gravimetric CO₂ Capacity. *Energy Environ. Sci.* **2008**, *1*, 487–493. <https://doi.org/10.1039/b809533g>.
- Hemschemeier, A.; Melis, A.; Happe, T. Analytical approaches to photobiological hydrogen production in unicellular green algae. *Photosynth. Res.* **2009**, *102*, 523–540. <https://doi.org/10.1007/s11120-009-9415-5>.
- Hernández, S.P.; Scarpa, F.; Fino, D.; Conti, R. Biogas purification for MCFC application. *Int. J. Hydrogen Energy* **2011**, *36*, 8112–8118.
- Herr, M.; Lermen, A.; Rostek, S. Biogaspartner—A joint initiative. Dtsch. Energ. Agent. GmbH **2021**, 35.
- Herwintono; Winaya, A.; Khotimah, K.; Hidayati, A. Improvement of Biogas Quality Product from Dairy Cow Manure Using NaOH and Ca(OH)₂ Absorbents on Horizontal Tube Filtration System of Mobile Anaerobic Digester. *Energy Rep.* **2020**, *6*, 319–324, doi:<https://doi.org/10.1016/j.egy.2020.11.152>.
- Hill, D.T.; Bolte, J.P. Methane production from low solid concentration liquid swine waste using conventional anaerobic fermentation. *Bioresour. Technol.* **2000**, *74*, 241–247
- Hobler A., Stumpf W., Quasnitschka H., Kriebel M. **1996**. Sposób i instalacja do uzdatniania gazu ziemnego zawierającego azot. Polska. Zgłoszenie patentowe P.182645 z dnia 14.10.1996 r.
- Hunicz, J.; Krzaczek, P. Detailed speciation of emissions from low-temperature combustion in a gasoline HCCI engine. *Pol. J. Environ. Stud.* **2016**, *25*, 137–145.
- Hus, S. Water, Sewage and Slurry Chemistry; Agricultural University Publishing House: Wrocław, Poland, **1995**.
- Huynh, Q.; Thieu, V.Q.Q.; Dinh, T.P.; Akiyoshi, S. Removal of hydrogen sulfide (H₂S) from biogas by adsorption method. In Proceedings of the 8th Biomass, Asia Workshop, Hanoi, Vietnam, 2 November–1 December **2011**. Available online: <http://www.biomass-asia->

- workshop.jp/biomassws/08workshop/files/20Fulltext%20-%20H2S.pdf (accessed on 20 May 2021).
- Hydrogen, **2024**. Available online: <https://www.iea.org/policies/16977-hydrogen-industry-development-plan-2021-2035> (accessed on 12 March 2024).
- Hydrogen Strategy, **2024**. Communication from the Commission to the European Parliament, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions. A Hydrogen Strategy for a Climate-Neutral Europe COM (2020) 301 Final. Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52020DC0301> (accessed on 12 March 2024).
- HDLA, **2024**. Hydrogen Development in Latin America. CSIS. Available online: <https://www.csis.org/analysis/hydrogen-development-latinamerica> (accessed on 14 March 2024)
- HELCOM **2020**. <http://www.helcom.fi/>, (accessed on May 22, 2020).
- Igliński, B.; Buczkowski, R.; Iglińska, A.; Cichosz, M.; Piechota, G.; Kujawski, W. Agricultural biogas plants in Poland: Investment process, economical and environmental aspects, biogas potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2012**, 16, 4890–4900. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2012.04.037>
- Ignatowicz K., Piekarski J., Kogut P. Influence of Selected Substrate Dosage on the Process of Biogas Installation Start-Up in Real Conditions *Energies* **2021**, 14(18), 5948; <https://doi.org/10.3390/en14185948>.
- IEA, **2022**. International Energy Agency (IEA). 10/2022. Available online: <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/fossil-fuel-use-by-scenario-2020-2030-and-2050> (accessed on 10 March 2024).
- IEA, **2023**. International Energy Agency (IEA). Electricity Market Report 2023. Available online: <https://www.iea.org/reports/electricity-market-report-2023> (accessed on 12 March 2024).
- IPPC, **1996**. IPPC Directive. Council Directive 96/61/EC concerning integrated pollution prevention and control. September 24, 1996.
- Jadhav, D.A.; Dutta, S.; Sherpa, K.C.; Jayaswal, K.; Saravanabhupathy, S.; Mohanty, K.T.; Banerjee, R.; Kumar, J.; Rajak, R.C. Chapter 7—Co-digestion processes of waste: Status and perspective. In *Bio-Based Materials and Waste for Energy Generation and Resource Management*; Hussain, C.M., Kushwaha, A., Bharagava, R.N., Goswami, L., Eds.; Elsevier: Amsterdam, The Netherlands, **2023**; pp. 207–241. Available online:

- <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/B9780323911498000107>
(accessed on 23 May 2024).
- Jarosz, Z.; Kapłań, M.; Klimek, K.; Dybek, B.; Herkowiak, M.; Wałowski, G. An Assessment of the Development of a Mobile Agricultural Biogas Plant in the Context of a Cogeneration System. *Appl. Sci.* **2023**, *13*, 12447. <https://doi.org/10.3390/app132212447>.
- Jasiulewicz, M.; Janiszewska, D.A. Potential development opportunities for biogas plants on the example of the West Pomeranian Voivodeship. *Agric. Eng.* **2013**, *2*, 91–102.
- Jędrzszak, A. Biological Waste Treatment; PWN: Warsaw, Poland, **2007**, 186–190, ISBN 978-83-01-15166-9.
- Jędrejek, A.; Jarosz, Z. Regional possibilities of agricultural biogas production. *Assoc. Agric. Agribus. Economists. Sci. Ann. XVIII*, **2016**; *18* (6), 61–66
- Jia, J.; Seitz, L.C.; Benck, J.D.; Huo, Y.; Chen, Y.; Desmond Ng, J.W.; Bilir, T.; Harris, J.S.; Jaramillo, T.F. Solar water splitting by photovoltaic-electrolysis with a solar-to-hydrogen efficiency over 30%. *Nat. Commun.* **2016**, *7*, 13237. <https://doi.org/10.1038/ncomms13237>.
- Jie, X.; Gonzalez-Cortes, S.; Xiao, T.; Yao, B.; Wang, J.; Slocombe, D.R.; Fang, Y.; Miller, N.; Al-Megren, H.A.; Dilworth, J.R.; et al. The decarbonisation of petroleum and other fossil hydrocarbon fuels for the facile production and safe storage of hydrogen. *Energy Environ. Sci.* **2019**, *12*, 238–249. <https://doi.org/10.1039/C8EE02444H>.
- Jochimsen, H. Betriebszweigabrechnung für Biogasanlagen, Arbeiten der DLG, Bd.200, Velags DLG, Frankfurt am Main **2006**.
- Kafle, G.K.; Kim, S.H. Anaerobic treatment of apple waste with swine manure for biogas production: Batch and continuous operation, How can we improve biomethane production per unit of feedstock in biogas plants? *Appl. Energy* **2013**, *103*, 61–72.
- Kallistova, A.Y.; Goel, G.; Nozhevnikova, A.N. Microbial diversity of methanogenic communities in the systems for anaerobic treatment of organic waste. *Microbiology* **2014**, *83*, 462–483. <https://doi.org/10.1134/S0026261714050142>.
- Kaparaju, P.; Angelidaki, I. Effect of temperature and microbial activity on passive separation of digested cattle manure. *Bioresour. Technol.* **2008**, *99*, 1345–1352.
- Kaparaju, P.; Buendía, I.; Ellegaard, L.; Angelidaki, I. Effects of mixing on methane production during thermophilic anaerobic digestion of manure: Lab-scale and pilot-scale studies. *Bioresour. Technol.* **2008**, *99*, 4919–4928.

- Kaparaju, P.; Ellegaard, L.; Angelidaki, I. Optimisation of biogas production from manure through serial digestion: Lab-scale and pilotscale studies. *Bioresour. Technol.* **2009**, *100*, 701–709.
- Kaparaju, P.; Luostarinen, S.; Kalmari, E.; Kalmari, J.; Rintala, J. Co-Digestion of Energy Crops and Industrial Confectionery by-Products with Cow Manure: Batch-Scale and Farm-Scale Evaluation. *Water Sci. Technol.* **2002**, *45*, 275–280, doi:10.2166/wst.2002.0352.
- Kapłan, M.; Klimek, K.; Syrotyuk, S.; Konieczny, R.; Jura, B.; Smoliński, A.; Szymenderski, J.; Budnik, K.; Anders, D.; Dybek, B.; et al. Raw Biogas Desulphurization Using the Adsorption-Absorption Technique for a Pilot Production of Agricultural Biogas from Pig Slurry in Poland. *Energies* **2021**, *14*, 5929.
- Karim, K.; Hoffmann, R.; Klassonb, K.T.; Al-Dahhan, M.H. Anaerobic digestion of animal waste: Effect of mode of mixing. *Water Res.* **2005**, *39*, 3597–3606.
- Kass, M.D.; Abdullah, Z.; Bidy, M.J.; Drennan, C.; Haq, Z.; Hawkins, T.; Wang, M. Understanding the Opportunities of Biofuels for Marine Shipping (No. ORNL/TM-2018/1080); Oak Ridge National Lab. (ORNL): Oak Ridge, TN, USA, **2018**.
- Kaszkowiak, J.; Kaszkowiak, E. Possibilities of Obtaining Material of Plant Origin for the Production of Pellets and Briquettes. Mroziński, A., Ed.; IX ECO-€URO-ENERGY.; Renewable Energy Sources Engineering; Bydgoszcz, Poland, **2016**; 167–174, ISBN 978-83-64423-33-8.
- Kaur, H.; Kommalapati, R.R. Optimizing anaerobic co-digestion of goat manure and cotton gin trash using biochemical methane potential (BMP) test and mathematical modeling. *SN Appl. Sci.* **2021**, *3*, 724. <https://doi.org/10.1007/s42452-021-04706-1>.
- Kayhanian, M.; Rich, D. Pilot-scale high solids thermophilic anaerobic digestion of municipal solid waste with an emphasis on nutrient requirements. *Biomass Bioenergy* **1995**, *8*, 433–444.
- Kemausour, F.; Adaramola, M.S.; Morken, J. A review of commercial biogas systems and lessons for Africa. *Energies* **2018**, *11*, 2984.
- Khalid, A.; Arshad, M.; Anjum, M.; Mahmood, T.; Dawson, L. The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Manag.* **2011**, *31*, 8. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.021>
- Kim, J.K.; Oh, B.R.; Chun, Y.N.; Kim, S.W. Effects of temperature and hydraulic retention time on anaerobic digestion of food waste. *J. Biosci. Bioeng.* **2006**, *102*, 328–332. <https://doi.org/10.1263/jbb.102.328>

- Kim, B.; Lim, H.; Kim, H.; Hong, T. Determining the value of governmental subsidies for the installation of clean energy systems using real options. *J Constr Eng Manage* **2012**;138:422-430.
- Kisiel, A. e-Biotechnologia.pl. 2019. Available online:<http://www.e-biotechnologia.pl/Artykuly/Biowodor/> (accessed on 12 March **2024**).
- Klimek, K.; Kapłan, M.; Syrotyuk, S.; Konieczny, R.; Anders, D.; Dybek, B.; Karwacka, A.; Wałowski, G. Production of Agricultural Biogas with the Use of a Hydrodynamic Mixing System of a Polydisperse Substrate in a Reactor with an Adhesive Bed. *Energies* **2021**, 14, 3538. <https://doi.org/10.3390/en14123538>.
- Kociołek-Balawejder, E.; Wilk, Ł. Review of methods for removing hydrogen sulphide from biogas. *Przemysł Chem.* **2011**, 90, 389–397.
- Kogut, P.; Piekarski, J.; Ignatowicz, K. Start-up of Biogas Plant with Inoculating Sludge Application. *Rocz. Ochr. Sr.* **2014**, 16, 534–545.
- Kolanowski, B.F. Small-Scale Cogeneration Handbook; CRC Press: Boca Raton, FL, USA, **2022**; ISBN 100055600X/9781000556001.
- Kołodziej, B.; Matyka, M. Renewable energy sources - agricultural energy resources. Poznań. PWRiL. ISBN 978-83-09-01139, **2012**, 2, 594.
- Kong, Z.; Wu, J.; Rong, C.; Wang, T.; Li, L.; Luo, Z.; Ji, J.; Hanaoka, T.; Sakemi, S.; Ito, M.; et al. Large Pilot-Scale Submerged Anaerobic Membrane Bioreactor for the Treatment of Municipal Wastewater and Biogas Production at 25°C. *Bioresour. Technol.* **2020**, 319, 124123, doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2020.124123>.
- Konkol, I.; Świerczek, L.; Cenian, A. Chicken Manure Pretreatment for Enhancing Biogas and Methane Production. *Energies* **2023**, 16, 5442. <https://doi.org/10.3390/en16145442>.
- Kosewska, K.; Kamiński, J.R. Economic analysis concerning construction and operation of agricultural biogas works in Poland. *Agricultural Engineering* **2008**, 1(99), 189–94.
- Kościk, B. Energy Raw Materials of Agricultural Origin; PWSZ: Jarosław, Poland, **2007**.
- Kougias, P.G.; Angelidaki, I. Biogas and Its Opportunities—A Review. *Front. Environ. Sci. Eng.* **2018**, 12, 14, doi:10.1007/s11783-018-1037-8.
- Kowalczyk-Juśko, A. Efficiency of biogas production from agricultural waste and agri-food processing. *Sci. J.* **2009**, 11, 149–154.
- Kowalczyk-Juśko A., **2013**. Biogazownie. Szansą dla rolnictwa i środowiska, (red. A. Grzybek), Wyd. Fundacja na rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa, Publikacja przygotowana w ramach Planu działania Sekretariatu Centralnego Krajowej Sieci Obszarów Wiejskich na lata 2007-2013, ISBN: 978-83-937363-0-0. Available online:

- <https://www.fdpa.org.pl/biogazownie-szansa-dla-rolnictwa-i-srodowiska-1> (accessed on 29 October 2021).
- Kowalczyk-Juśko, A.; Cholewińska, E. Possibilities of energetic use of the Jerusalem artichoke biomass (*Helianthus tuberosus* L.). *Autobusy* 232-234, Available online: https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-7895abff-8f0a-4944-b3c5-7f3e7d05c14e/c/Kowalczyk-Jusko_Mozliwosci.pdf, (accessed on 1 March **2023**).
- Kowalik, P. The use of biomass as an energy raw material. Foundation for the Efficient Use of Energy. Energy use of biomass. Training on working examples of renewable energy applications in Poland and Denmark. Within the TEMPUS Program of the European Union entitled: Sustainable energy development. Polish foundation for energy efficiency - center in Cracov, June 16-28. 2002. Available online : https://fewe.pl/wp-content/uploads/2018/08/Energetyczne-wykorzystanie-biomasy-tempus_sprawozd_dania_2002.pdf (accessed on 1 March **2023**).
- Kowalski, Ł.; Smerkowska, B. A Polish case study for biogas to biomethane upgrading. Combustion. *Engines* **2012**, 1, 15–24.
- Kozlova, M. Real option valuation in renewable energy literature: research focus, trends and design. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2017**, Vol. 80, Dec 2017, 180-196, 10.1016/j.rser.2017.05.166
- Kozlova, M.; Collan, M.; Luukka, P. Comparison of the Datar-Mathews Method and the Fuzzy Pay-Off Method through Numerical Results. *Advances in Decision Sciences*, **2016**.
- Krich, K.; Augenstein, D.; Batmale, J.P; Benemann, J.; Rutledge, B.; Salour, D. Biomethane from Dairy Waste—A Sourcebook for the Production and Use of Renewable Natural Gas in California, Prepared for Western United Dairymen, Funded in part through USDA Rural Development, **2005**. Available online: http://www.calstart.org/Libraries/Publications/Biomethane_from_Dairy_Waste_Full_Report.sflb.ashx (accessed on 20 May 2021).
- Krylova, N.I.; Khabiboulline, R.E.; Naumova, R.P.; Nagel, M.A. The influence of ammonium and methods for removal during the anaerobic treatment of poultry manure. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* **1997**, 70, 99–105.
- Krzemiń, A.; Więckol-Ryk, A.; Smoliński, A.; Koterka, A.; Więclaw-Solny, L. Assessing the risk of corrosion in amine-based CO₂ Capture Process. *J. Loss Prev. Process Ind.* **2016**, 43, 189–197.

- Krzemińska, I.; Kwietniewska, E. Processes of biological hydrogen production, Buses—Technology, Operation, Transport Systems 10/2021. Available online: <https://yadda.icm.edu.pl/baztech/element/bwmeta1.element.baztech-article-BWAW-0016-0034> (accessed on 14 March 2024).
- Kuczowic, J.; Kuczowic, K. Investment decisions. Investment decisions. Publishing House of the University of Economics in Katowice. Katowice. ISBN 83-7246-812-5, **2006**.
- Kumanowski K.S., Szewczyk K.W., Zamojska A.M., Kumanowska E.J., **2008**. Sposób utylizacji gnojowicy przez fermentację metanową oraz instalacja do utylizacji gnojowicy przez fermentację metanową. Polska. Zgłoszenie patentowe P.386459 z dnia 06.11.2008 r.
- Kumar, D.S. Thermal Science and Engineering; S.K. Kataria & Sons: New Delhi, India, **2009**.
- Kumaran, P.; Hephzibah, D.; Sivasankari, R.; Saifuddin, N.; Shamsuddin, A.H. A review on industrial scale anaerobic digestion systems deployment in Malaysia: Opportunities and challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *56*, 929–940. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.11.069>.
- Kumbaroğlu, G.; Madlener, R.; Demirel, M. A real options evaluation model for the diffusion prospects of new renewable power generation technologies. *Energy Econ* **2008**, *30*:1882-1908.
- Kuo-Ling, H.; Wei-Chih, L.; Ying-Chien, C.; Yu-Pei, C.; Ching-Ping, T. Elimination of high concentration hydrogen sulfide and biogas purification by chemical–biological process. *Chemosphere* **2013**, *92*, 1396–1401.
- Kupryś-Caruk, M. The agri-food industry as a source of substrates for biogas production. *Postępy Nauk. I Technol. Przemysłu Rolno-Spożywczego* **2017**, *72*, 69–85.
- Kuranc, A. Exhaust emission test performance with the use of the signal from air flow meter. *Eksploat. Niezawodn.* **2015**, *17*, 129–134.
- Kuś, J.; Matyka, M. Growing Plants for Energy Purposes; Warsaw, Poland IUNG—PIB: Puławy, Poland; 64. ISBN 978-83-7562-072-6, **2010**.
- Kutera, J. Slurry management, Agricultural University Publishing House, Wrocław **1994**, 370.
- Kutera, J.; Hus, S. Principles of Liquid Manure Management in Agriculture in Mountain Areas, Taking into Account Environmental Protection Conditions, Agricultural University, Wrocław: Agricultural University in Wrocław Publishing House Wrocław, Poland, **1990**.

- Kutera, J.; Hus, S. Agricultural Treatment and Use of Sewage and Slurry. Scientific Journals of the Agricultural University in Wrocław; Agricultural University in Wrocław Publishing House; Wrocław, Poland, **1998**.
- Kwaśny, J.; Balcerzak, W.; Rezk, P. Biogas and characteristics of selected methods of its desulphurization. *J. Civil. Eng. Environ. Archit.* **2016**, 63, 129–141.
- Kwaśny, J.; Banach, M.; Kowalski, Z. Overview of biogas production technologies of various origins. *Chem. Tech. J. Publ. House Crac. Univ. Technol.* **2012**, 109, 2, 83–102.
- Kwiecińska, A. Ecological management of slurry with the use of membrane techniques. Work carried out as part of scientific work financed with funds for science in 2010-2012 as a research project No. N523 559038, Silesian University of Technology, Faculty of Environmental and Power Engineering, Department of Environmental Chemistry and Membrane Processes, **2013** Gliwice
- Kwiecińska, A. Ecological Management of the Slurry with the Use of Membrane Techniques. Ph.D. Thesis, The Silesian Technical University, Faculty of Environmental and Power Engineering, Department of Environmental Chemistry and Membrane Processes, Gliwice, Poland, **2016**.
- KTW, **2024**. Klaster Technologii Wodorowch. Available online: <https://klasterwodorowy.pl/> (accessed on 12 March 2024).
- Land, H.; Ceccaldi, P.; Mészáros, L.S.; Lorenzi, M.; Redman, H.J.; Senger, M.; Stripp, S.T.; Berggren, G. Discovery of novel [FeFe]-hydrogenases for biocatalytic H₂-production. *Chem. Sci.* **2019**, 10, 9941–9948. <https://doi.org/10.1039/C9SC03717A>.
- Landry, H.; Lague, C.; Roberge, M. Physical and rheological properties of manure products. *Appl. Eng. Agric.* **2004**, 20, 277–288.
- Lehman, C.; Selin, N. E. “biofuel”. Encyclopedia Britannica, 15 Sep. **2021**. <https://www.britannica.com/technology/biofuel> (accessed on 10 December 2021).
- Lehtomaki, A.; Huttunen, S.; Rintala, J.A. Laboratory investigations on co-digestion of energy crops and crop residues with cattle manure for methane production: Effect of crop to manure ratio. *Resour. Conserv. Recycl.* **2007**, 51, 591–609.
- Lenort, R.; Stas, D.; Wicher, P.; Holman, D.; Ignatowicz, K. Comparative Study of Sustainable Key Performance Indicators in Metallurgical Industry. *Rocz. Ochr. Sr.* **2017**, 19, 36-51.
- Letter, **2020**. Letter of Intent for Establishing a Partnership for the Development of the Hydrogen Economy and Concluding a Sectoral Hydrogen Agreement. Warsaw 2020.

- Available online: <https://www.gov.pl/attachment/ebf105f5-babb-4ae9-9251-47fe7186e73> (accessed on 14 March 2024).
- Levin, D.B.; Pitt, L.; Love, M. Biohydrogen production: Prospects and limitations to practical application. *Int. J. Hydrogen Energy* **2004**, *29*, 173–185.
- Liao, P.H.; Lo, K.V.; Chieng, S.T. Effect of liquid-solids separation on biogas production from dairy manure. *Energy Agric.* **1984**, *3*, 61–69.
- Liberti, F.; Pistolesi, V.; Mouftahi, M.; Hidouri, N.; Bartocci, P.; Massoli, S.; Zampilli, M.; Fantozzi, F. An Incubation System to Enhance Biogas and Methane Production: A Case Study of an Existing Biogas Plant in Umbria, Italy. *Processes* **2019**, *7*, 925.
- Liebetrau, J.; Gromke, J.D.; Denysenko, V. IEA Bioenergy Task 37 - Germany Country Report 2020; Germany. Available on line: <http://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html> (Accessed 12 December **2021**);
- Lin, P.-H.; Wong, D.S.H. Carbon Dioxide Capture and Regeneration with Amine/Alcohol/Water Blends. *Int. J. Greenh. Gas Control* **2014**, *26*, 69–75. <https://doi.org/10.1016/j.ijggc.2014.04.020>.
- Lindmark, J.; Leksell, N.; Schnürer, A.; Thorin, E. Effects of Mechanical Pre-Treatment on the Biogas Yield from Ley Crop Silage. *Appl. Energy* **2012**, *97*, 498–502, doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.12.066>.
- Lipski, S. Sow. Choosing a Variety for Cultivation. Available online: <http://www.kukurydza.org.pl/siew.php> (accessed on 7 December **2016**).
- Lo, K.V.; Whitehead, A.J.; Liao, P.H.; Bulley, N.R. Methane production from screened dairy manure using a fixed-film reactor. *Agric. Wastes* **1984**, *9*, 175–188.
- Lopes, W.S.; Leite, V.D.; Prasad, S. Influence of inoculum on performance of anaerobic reactors for treating municipal solid waste. *Bioresour. Technol.* **2004**, *94*, 261–266.
- Lozowicka, B., Kaczynski, P., Szabunko, J., Ignatowicz, K., Warentowicz, D., Lozowick, J. New rapid analysis of two classes of pesticides in food wastewater by quechers-liquid chromatography/mass spectrometry. *Journal of Ecological Engineering* **2016**, *17* (3), 97-105.
- Lu, Y.; Koo, J. O₂ sensitivity and H₂ production activity of hydrogenases—A review. *Biotechnol. Bioeng.* **2019**, *116*, 3124–3135. <https://doi.org/10.1002/bit.27136>. ISSN 1097-0290.
- Lubitz, W.; Ogata, H.; Rüdiger, O.; Reijerse, E. Hydrogenases. *Chem. Rev.* **2014**, *114*, 4081–148. <https://doi.org/10.1021/cr4005814>.

- Luengo, P.L.; Alvarez, J.M. Influence of temperature, buffer, composition and straw particle length on the anaerobic digestion of wheat straw-pig manure mixtures. *Resour. Conserv. Recycl.* **1988**, 1, 27–37.
- Luintel, M.C. *Fundamentals of Thermodynamics & Heat Transfer*; Heritage Publishers & Distributors Pvt. Ltd.: Kathmandu, Nepal, **2016**.
- Lukehurst, C.; Banks, C. IEA Bioenergy Task 37 - United Kingdom Country Report **2019**; United Kingdom. Available on line: <http://task37.ieabioenergy.com/> (Accessed 12 December 2021); 62–71.
- Lying, K.-A. IEA Bioenergy Task 37 - Norway Country Report 2020; Norway. Available on line: <http://task37.ieabioenergy.com/country-reports.html> (Accessed 12 December **2021**).
- Machała, R. *Practical management of the company's finances*. Polish Scientific Publishers PWN, **2001**, ISBN: 8301132299.
- Maćkowiak, C. *Rules for the Use of Slurry. Fertilization Recommendations Part IV*; IUNG Publishing House: Pulawy, Poland, **1994**.
- Maćkowiak, C. *Slurry, Its Properties and Application Rules, Taking into Account Environmental Protection. Training Materials 75/99*; IUNG Publishing House: Pulawy, Poland, **1999**.
- Magrel, L.; Boruszko, D. *Agricultural Use of Slurry on the Example of Selected Pig Fattening Farms*. In *Conference Materials Wastewater Treatment-New Trends, Modernization of Existing Treatment Plants and Sludge Management. Foundation of Environmental Economists and Natural Resources*, Rajgrad: Foundation of Environmental Economists and Natural Resources Publishing House, Rajgrad, Poland, **1997**; 399–404.
- Mahlia, T.M.I.; Syazmi, Z.A.H.S.; Mofijur, M.; Abas, A.E.P.; Bilad, M.R.; Ong, H.C.; Silitonga, A.S. *Patent Landscape Review on Biodiesel Production: Technology Updates*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2020**, 118, 109526.
- Majtkowski, W. *Solid Fuel Energy Plants*. In *Biomass for Energy and Heating—Opportunities and Problems; The village of Tomorrow*: Warsaw, Poland, **2007**.
- Makowiak, C. *Fertilization Value of Sludge and Waste from the Food Industry*. In *Conference Materials Sewage Sludge-Processing and Use*. Poznan University of Technology: Poznan University of Technology Publishing House, Poznan, Poland, **1997**.
- Manara, P.; Zabaniotou, A. *Towards sewage sludge based biofuels via thermochemical conversion—A review*. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2012**, 16, 2566–2582. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.01.074>.

- Mandley, S.J.; Daioglou, V.; Junginger, H.M.; van Vuuren, D.P.; Wicke, B. EU bioenergy development to 2050. *Renew. Sustain. Energy* **2020**, *127*, 109858. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.109858>.
- Mantovi, P.; Fumagalli, L.; Beretta, G.P.; Guermandi, M. Nitrate leaching through the unsaturated zone following pig slurry applications. *J. Hydrol.* **2006**, *316*, 195–212.
- Mao, C.; Feng, Y.; Wang, X.; Ren, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2015**, *45*, 540–555. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.02.032>.
- Marek, P. The amount of manure produced in pig production and the related potential of biogas production in Poland in 2018, broken down by municipalities. In Information Catalog. Developed as Part of: The Implementation of the Multiannual Program for 2016–2020 Entitled "Technological and Natural Projects for Innovative, Effective and Low-Emission Economy in Rural Areas"; specified in the contract no. GZ.me.032.1.9.2018 concluded on 17 April **2018** between the Minister of Agriculture and Rural Development and the Institute of Technology and Life Sciences in Falenty; Unpublished work.
- Marszałek, M.; Banach, M.; Kowalski, Z. Manure utilization by methane and oxygen fermentation - biogas and compost production. *Technical Journal* **2011**, *10* (108), 143–158.
- Martinez, J.; Guiziou, F.; Peu, P.; Gueutier, V. Influence of treatment techniques for pig slurry on methane emissions during subsequent storage. *Biosyst. Eng.* **2003**, *85*, 347–354.
- Martínez-Ceseña, E.A.; Mutale, J. Application of an advanced real options approach for renewable energy generation projects planning. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2011**, *15*:2087-2094.
- Mega, **2021**. Mega Sp. z o.o., <https://megabelzyce.pl/pl> (dostęp od 29.10.2021).
- Melis, A.; Zhang, L.; Forestier, M.; Ghirardi, M.L.; Seibert, M. Sustained Photobiological Hydrogen Gas Production upon Reversible Inactivation of Oxygen Evolution in the Green Alga *Chlamydomonas reinhardtii*. *Plant Physiol.* **2000**, *122*, 127–136. <https://doi.org/10.1104/pp.122.1.127>.
- Menegaki, A. Valuation for renewable energy: A comparative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2008**; *12*:2422-2437.
- Meng, X.; Chen, M.; Gu, A.; Wu, X.; Liu, B.; Zhou, J.; Mao, Z. China's hydrogen development strategy in the context of double carbon targets. *Nat. Gas Ind. B* **2022**, *9*,

- Miao, J.; Lang, Z.; Xue, T.; Li, Y.; Li, Y.; Cheng, J.; Tang, Z. Revival of Zeolite-Templated Nanocarbon Materials: Recent Advances in Energy Storage and Conversion. *Adv. Sci.* **2020**, *7*, 2001335. <https://doi.org/10.1002/advs.202001335>.
- Michalski, T. Corn as a raw material for various industries. *Tomorrow's Village* **2002**, *6*, 53–55.
- Michalski, T. *Maize Is an Excellent Raw Material for the Production of Bioethanol and Biogas*; Polagra Agropremiery, Agro Service, Poland: **2007**; 5–8.
- Michalski, T. Problems of Agrotechnics and the Use of Maize and Sorghum; Poznan of University Life Sciences, Poznan, Poland, **2008**.
- Micoli, L.; Bagnasco, G.; Turco, M. H₂S removal from biogas for fuelling MCFCs: New adsorbing materials. *Int. J. Hydrogen Energy* **2014**, *39*, 1783–1787.
- Mineralization, **2014a**. PB/31/12:2014. Mineralization of plant samples and natural fertilizers in concentrated mineral acids into general components (macro- and microelements) The research procedure of the Environmental Chemistry Research Laboratory Falenty, 05-090 Raszyn, Poland consists in adopting routine procedures, appropriate to the working conditions in the outdoor laboratory, with expected characteristics (composition), applicable to specific determinations, within a specified concentration range. <https://www.itp.edu.pl/bip/index.html> (accessed on 23 May 2024).
- Mineralization, **2014b**. PB/31/14:2014. Mineralization of plant samples and natural fertilizers in concentrated mineral acids into general components (macro- and microelements) The research procedure of the Environmental Chemistry Research Laboratory Falenty, 05-090 Raszyn, Poland consists in adopting routine procedures, appropriate to the working conditions in the outdoor laboratory, with expected characteristics (composition), applicable to specific determinations, within a specified concentration range. <https://www.itp.edu.pl/bip/index.html> (accessed on 23 May 2024).
- Mineralization, **2014c**. PN-91/R-04014. Mineralization of plant samples and natural fertilizers in concentrated mineral acids into general components (macro- and microelements) The research procedure of the Environmental Chemistry Research Laboratory Falenty, 05-090 Raszyn, Poland consists in adopting routine procedures, appropriate to the working conditions in the outdoor laboratory, with expected characteristics (composition), applicable to specific determinations, within a specified concentration range. <https://www.itp.edu.pl/bip/index.html> (accessed on 23 May 2024).
- Mineralization, **2014d**. PB/31/09:2014. Mineralization of vegetation samples and natural fertilizers in concentrated mineral acids for nitrogen The research procedure of the

- Environmental Chemistry Research Laboratory Falenty, 05-090 Raszyn , Poland consists in adopting routine procedures, appropriate to the working conditions in the outdoor laboratory, with expected characteristics (composition), applicable to specific determinations, within a specified concentration range. <https://www.itp.edu.pl/bip/index.html> (accessed on 23 May 2024).
- Mlaik, N.; Sayadi, S.; Masmoudi, M.A.; Yaacoubi, D.; Loukil, S.; Khoufi, S. Optimization of anaerobic co-digestion of fruit and vegetable waste with animal manure feedstocks using mixture design. *Biomass Conv. Bioref.* **2024**, *14*, 4007–4016. <https://doi.org/10.1007/s13399-022-02620-z>.
- Mohamed, H.H.; Morsy, M.I. Study the effect of dry fermentation of goat manure in optimization of biogas production and minimization of costs. *Misr J. Agric. Eng.* **2018**, *35*, 1149–1164.
- Mohrmann, S.; Otter, V. Categorisation of Biogas Plant Operators in Germany with Regards to Their Intention to Use Straw Pellets as Innovative and Sustainable Substrate Alternative. *Energies* **2023**, *16*, 5. <https://doi.org/10.3390/en16010005>
- Mona, S.; Kumar, S.S.; Kumar, V.; Parveen, K.; Saini, N.; Deepak, B.; Pugazhendhi, A. Green technology for sustainable biohydrogen production (waste to energy): A review. *Sci. Total Environ.* **2020**, *728*, 138481. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138481>.
- Montt, G.; Fraga, F.; Harsdorff, M. The Future of Work in a Changing Natural Environment: Climate Change, Degradation and Sustainability. **2018**.
- Morra, S. Fantastic [FeFe]-Hydrogenases and Where to Find Them. *Front. Microb.* **2022**, *13*, 853626. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.853626>.
- Moritz, M. Biological methods of obtaining hydrogen. *Chemist* **2012**, *66*, 827–834.
- Morken, J.; Gjetmundsen, M.; Fjørtoft, K. Determination of Kinetic Constants from the Co-Digestion of Dairy Cow Slurry and Municipal Food Waste at Increasing Organic Loading Rates. *Renew. Energy* **2017**, *117*, 46–51, [doi:https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.081](https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.09.081).
- Mönch-Tegeder, M.; Lemmer, A.; Oechsner, H. Enhancement of Methane Production with Horse Manure Supplement and Pretreatment in a Full-Scale Biogas Process. *Energy* **2014**, *73*, 523–530, [doi:https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.051](https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.06.051).
- Møller, H.B.; Nielsen, A.M.; Nakakubo, R.; Olsen, H.J. Process performance of biogas digesters incorporating pre-separated manure. *Livest. Sci.* **2008**, *112*, 217–223.
- Mroczkowski, P.; Seiffert, M. Purification and Injection of Biogas on the Example of Germany. Possibilities of Implementing Technology in Poland. The Material was

- Created during the Scholarship of the Federal Environment Foundation (DBU) and the Foundation of Prof. Nowicki at the German Biomass Center (DBFZ). Available online: www.cire.pl (accessed on 3 December **2011**).
- Myczko A., **2012**. Scenariusz rozwoju sieci mikroproducentów energii, Wyd. Czysta Energia, ISDN 1634-125, 5, 129, 26-27.
- Myczko, R. Protokół przekazania procesu technologicznego. Dokument wydany przez Laboratorium Badawcze Technologii i Biosystemów Rolniczych, Instytut Technologiczno-Przyrodniczy, **2018**; pp. 1–2.
- Myczko A., Kołodziejczyk T., Aleszczyk Ł., Myczko R., Łaska-Zieja B., Jędrusiak-Wrzesińska E., Wałowski G., Sawiński R., **2018**. Fermentator monosubstratowy do metanowej fermentacji gnojowicy. Polska. Zgłoszenie patentowe P.424291 z dnia 22.01.2018 r.
- Myczko A., Myczko R., Szulc R., Tupalski L., **2012**. Reaktor do metanowej fermentacji gnojowicy. Polska. Zgłoszenie patentowe P.220074 z dnia 04.07.2012 r.
- Mystkowska, I.; Zarzecka, K.; Gugąła, M.; Baranowska, A. Probiotic and pharmacological properties of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus L.*). *Probl Hig Epidemiol.* **2015**, 96, 64–66.
- MOE, **2010**. Ministry of Economy., A guide for investors interested in building agricultural biogas plants. Warszawa, 2010.
- Nanda, S.; Pattnaik, F.; Patra, B.R.; Kang, K.; Dalai, A.K. A Review of Liquid and Gaseous Biofuels from Advanced Microbial Fermentation Processes. *Fermentation* **2023**, 9, 813.
- Nazmus, S.; Mamunur, R. Biogas Production Optimization from POME by Using Anaerobic Digestion Process. *J. Appl. Sci. Process Eng.* **2022**, 6, doi:10.33736/jaspe.1711.2019.
- Ndegwa, P.M.; Hamilton, D.W.; Lalman, J.A.; Cumba, H.J. Effects of cycle-frequency and temperature on the performance of anaerobic sequencing batch reactors (ASBRs) treating swine waste. *Bioresour. Technol.* **2008**, 99, 1972–1980.
- Nemati, M.; Harrison, S.T.L.; Hansford, G.S.; Webb, C. Biological oxidation of ferrous sulphate by *Thiobacillus ferrooxidans*: A review on the kinetic aspects. *Biochem. Eng. J.* **1998**, 1, 171–190.
- Nges, I.A.; Björn, A.; Björnssona, L. Stable Operation during Pilot-Scale Anaerobic Digestion of Nutri-ent-Supplemented Maize/Sugar Beet Silage. *Bioresour. Technol.* **2012**, 118, 445–454, doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.05.096>.
- Ni, M.; Leung, D.Y.C.; Leung, M.K.H.; Sumathy, K. An overview of hydrogen production from biomass. *Fuel Process. Technol.* **2006**, 87, 461–472.

- Nielsen, J.B.; Al Seadi, T.; Oleskowicz-Popiel, P. The Future of Anaerobic Digestion and Biogas Utilization. *Bioresour. Technol.* **2009**, 100, 5478–5484, doi:<https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.12.046>.
- Nielsen, H.B.; Angelidaki, I. Strategies for optimizing recovery of the biogas process following ammonia inhibition. *Bioresour. Technol.* **2008**, 99, 7995–8001.
- Nikiciuk, M. Ecological and Pro-Growth Potential of the Agricultural Biogas Plant Sector in the Podlaskie Voivodeship w Contemporary Economic Problems in the Research of Young Scientists, T. 3. Macro- and Meso-economic Analyses; Gruszewska, E., Roszkowska, M. Eds.; Polish Economic Society, University of Białystok, Poland: **2019**; 98–117.
- Nikosi, S.M.; Lupuleza, I.; Sithole, S.N.; Zeldu, Z.R.; Matheri, A.N. Renewable energy potential of anaerobic mono- and co-digestion of chicken manure, goat manure, potato peels and maize pap in South Africa. *South Afr. J. Sci.* **2021**, 117, 10362.
- Novakovic, J.; Kontogianni, N.; Barampouti, E.M.; Mai, S.; Moustakas, K.; Malamis, D.; Loizidou, M. Towards Upscaling the Valorization of Wheat Straw Residues: Alkaline Pretreatment Using Sodium Hydroxide, Enzymatic Hydrolysis and Biogas Production. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **2020**, 28, 24486–24498, doi:[10.1007/s11356-020-08905-y](https://doi.org/10.1007/s11356-020-08905-y).
- Nsair, A.; Onen Cinar, S.; Alassali, A.; Abu Qdais, H.; Kuchta, K. Operational Parameters of Biogas Plants: A Review and Evaluation Study. *Energies* **2020**, 13, 3761, <https://doi.org/10.3390/en13153761>.
- Nsair, A.; Önen Cinar, S.; Abu Qdais, H.; Kuchta, K. Optimizing the Performance of a Large Scale Biogas Plant by Controlling Stirring Process: A Case Study. *Energy Convers. Manag.* **2019**, 198, 111931, doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.111931>.
- NAHMA, **2015**. North America Hydrogen Market Analysis: Industry Market Size, Plant Capacity, Production, Operating Efficiency, Demand & Supply, End-User Industries, Sales Channel, Regional Demand, Company Share, Manufacturing Process, 2015–2032. Available online: <https://www.chemanalyst.com/industry-report/north-america-hydrogen-market-2950> (accessed on 14 March 2024).
- Ochmańska, M.; Jaroszewski, J. *Types of Biomass and Possibilities of Its Use*; Agricultural Advisory Center, Zarzeczewo, Poland, **2009**, 26.
- Okoro, O.V.; Sun, Z. Desulphurisation of Biogas: A Systematic Qualitative and Economic-Based Quantitative Review of Alternative Strategies. *Chem. Engineering* **2019**, 3, 76; doi:[10.3390/chemengineering3030076](https://doi.org/10.3390/chemengineering3030076).

- Olszewska, H.; Paluszak, Z.; Szejniuk, B. Survey of Salmonella Enteritidis Microorganisms in Slurry, Domestic Sewage and Water in Laboratory Conditions., Materials for the Symposium: Hygiene Problems in Agricultural Greening. SGGW; Warsaw University of Life Sciences Publishing House, Warsaw, Poland, **1997**; pp. 208–213.
- Oniszk-Popławska, A.; Zownik, M.; Wiśniewski, G. Production and use of agricultural biogas. EC BREC/IBMER, Gdansk-Warsaw. ISBN 83-86264-91-8, **2003**.
- Onovwiona, H.I.; Ugursal, V.I. Residential cogeneration systems: Review of the current technology. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2006**, 10, 389–431. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.07.005>.
- Opurum, C.C.; Nweke, C.O.; Nwanyanwu, C.E.; Nwachukwu, I.N. Kinetic study of anaerobic digestion of goat manure with poultry dropping and plantain peels for biogas production. *Int. J. Eng. Applied Sci.* **2019**, 6, 22–28.
- Ormaechea, P.; Castrillón, L.; Suárez-Peña, B.; Megido, L.; Fernández-Nava, Y.; Negral, L.; Marañón, E.; Rodríguez-Iglesias, J. Enhancement of Biogas Production from Cattle Manure Pretreated and/or Co-Digested at Pilot-Plant Scale. Characterization by SEM. *Renew. Energy* **2018**, 126, 897–904, doi:<https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.022>.
- Osman, G.A.M.; Elhasan, H.E.; Hassan, A.B. Effect of cow rumen fluid concentration on biogas production from goat manure. *Sudan. J. Agric. Sci.* **2015**, 2, 1–7.
- Otobrise, C.; Udubor, C.W.; Osabohien, E. Kinetics of Biogas Production from Goat Dung and Pawpaw Seed. *Orient. J. Chem.* **2022**, 38, 914–923. <https://doi.org/10.13005/ojc/380411>.
- OGI, **2021**. Oil and Gas Institute – National Research Institute Poland The Agricultural Biogas Plants in Poland - 2014; Poland. Available on line: <https://www.globalmethane.org/documents/Poland-Ag-Biogas-Plants-April-2014.pdf> (Accessed 27 November 2021);
- O&G, **2021**. Oil and Gas Institute—National Research Institute Poland The Agricultural Biogas Plants in Poland—2014; Poland. Available online: <https://www.globalmethane.org/documents/Poland-Ag-Biogas-Plants-April-2014.pdf> (accessed on 27 November 2021).
- Paluszak, Z. Studies on the Behavior and Survival of Selected Faecal Microorganisms in the Soil Fertilized with Slurry; University ATR Publishing House: Bydgoszcz, Poland, **1998**.
- Paprota, E. Treatment of biogas as a way of its wider use. *Autobusy. Tech. Eksploat. Syst. Transp.* **2011**, 10, 329–333.

- Park, Y.G. Study for the Bio-CNG Recovery of Methane Gas in the Anaerobic Co-Digestion Using Malaysian POME (Palm Oil Mill Effluent). *Biotechnol. Bioprocess Eng.* **2020**, *26*, 435–446, doi:10.1007/s12257-019-0401-2.
- Paterson, M.; Amrozy, M.; Berutto, R.; Bijmagne, J.W.; Bonhomme, S.; Gysen, M.; Kayesr, K.; Majewski, E.; Parola, F. Implementation Guide for Small-Scale Biogas Plants. In *Bioenergy Farm II Publication*; Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. (KTBL): Kranichstein, Germany, **2016**, Volume 1.2.
- Pawłowska, M.; Zdeb, M. Comparison of the effectiveness of microbiological biogas desulphurization in bioscrubbers and biofilters with an irrigated layer. In Proceedings of the 3rd Congress of Environmental Engineering, Lublin; 1, 191–198. Available online: <http://wis.pol.lublin.pl/kongres3/tom1/21.pdf> (accessed on 3 December **2015**).
- Peden, E.A.; Boehm, M.; Mulder, D.W.; Davis, R.; Old, W.M.; King, P.W.; Ghirardi, M.L.; Dubini, A. Identification of Global Ferredoxin Interaction Networks in *Chlamydomonas reinhardtii*. *J. Biol. Chem.* **2013**, *288*, 35192–35209. <https://doi.org/10.1074/jbc.M113.483727>.
- Petersson, A. Biogas Cleaning in the Biogas Hand Book; Wellinger, A., Murphy, J.P., Baxter, D., Eds.; Woodhead Publishing Limited, **2013**. doi:10.1533/9780857097415.3.329.
- Petersson, A.; Wellinger, A. Biogas Upgrading Technologies—Developments and Innovations. Task 37: Energy from biogas and Landfill Gas. Paris, France, **2009**. Available online: <http://groengas.nl/wp-content/uploads/2013/07/2009-10-00-Biogas-upgrading-technologies-developments-and-innovations.pdf> (accessed on 23 May 2024).
- Pesaro, F.; Sorg, I.; Metzler, A. In situ inactivation of animal viruses and a coliphage in nonaerated liquid and semiliquid animal wastes. *Appl. Environ. Microbiol.* **1995**, *61*, 92–97.
- Pham, C.H.; Sagar, S.; Berben, P.; Palmada, T.; Ross, C. Removing Hydrogen Sulphide Contamination in Biogas Produced from Animal Wastes. In Farm Environmental Planning—Science, Policy and Practice; Occasional Report No. 31; Currie, L.D., Christensen, L.C., Eds.; Fertilizer and Lime Research Centre, Massey University: Palmerston North, New Zealand, **2018**; 10p. Available online: <http://flrc.massey.ac.nz/publications.html> (accessed on 3 December 2015).
- Piekutin, J.; Puchlik, M.; Haczykowski, M.; Dyczewska, K. The Efficiency of the Biogas Plant Operation Depending on the Substrate Used. *Energies* **2021**, *14*, 3157.
- Piskier, T. Labor outlays and costs of topinambour cultivation. *Agric. Eng.* **2006**, *11*, 359–365.

- Piskowska-Wasiak, J. Treatment of biogas to the parameters of high-methane gas. *Nafta-Gaz* **2014**, 70, 94–105.
- Podkówka, W. Kukurydza jako substrat do produkcji biogazu. *Kukurydza* **2006**, 12, 26–29.
- Podkówka, W. Biofuels today and tomorrow. *Corn* **2007**, 2, 4–35.
- Podkówka, W.; Podkówka, Z. Substrates for Agricultural Biogas Plants; Agro Serwis Warsaw, Poland, **2010**.
- Podkówka, Z. Biogas from Slurry. In *Engineering of Renewable Energy Sources*; Mroziński, A., Ed.; IX EKO-€URO-ENERGIA: ISBN: 978-83-64423-33-8; Bydgoszcz **2016**, 147–165.
- Pomykała, R.; Łyko, P. Biogas from waste as biofuel for transport—Barriers and prospects. *Chemik* **2013**, 5, 454–457.
- Portal, **2023**. Available online: <https://portalstatystyczny.pl/energia-ze-zrodel-odnawialnych-w-polsce-najnowsze-dane/> (accessed on 1 March 2023).
- Pourzolfaghar, H.; Ismail, M.; Izhar, S.; MagharehEsfahan, Z. Review of H₂S Sorbents at Low-Temperature Desulfurization of Biogas. *Int. J. Chem. Environ. Eng.* **2004**, 5, 22–28.
- Problem, **2021**. The problem with foaming manure. Available online: https://www.3trzy3.pl/artyku%C5%82y/problem-z-pieni%C4%85cym-si%C4%99-obornikiem_1091/ (accessed on 10 January 2021).
- Project Title. https://portal.nifa.usda.gov/enterprise-search/project_details/ss/650 (accessed on 13 May **2021**).
- Przesmycka, A.; Podstawka, M. Economic efficiency of investments in agricultural biogas plants. Association of agricultural and agribusiness economists. *Annals of Science*, vol XVIII, **2016**, 6, 176-182.
- Pukšec, T.; Duić, N. Economic viability and geographic distribution of centralized biogas plants: case study Croatia. *Clean Technologies and Environmental Policy* **2012**, 14, 427–433, <https://link.springer.com/article/10.1007/s10098-012-0460-y>
- Puñal, A.; Trevisan, M.; Rozzi, A.; Lema, J.M. Influence of C:N ratio on the start-up of up-flow anaerobic filter reactors. *Water Res.* **2000**, 34, 2614–2619. [https://doi.org/10.1016/S0043-1354\(00\)00161-5](https://doi.org/10.1016/S0043-1354(00)00161-5).
- Putatunda, C.; Behl, M.; Solanki, P.; Sharma, S.; Bhatia, S.K.; Walia, A.; Bhatia, R.K. Current challenges and future technology in photofermentation-driven biohydrogen production by utilizing algae and bacteria. *Int. J. Hydrogen Energy* **2023**, 48, 21088–21109. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.10.042>.

- Pwaelec, G.; Muron, M.; Bracht, J.; Bonnet-Cantalloube, B.; Floristean, A.; Brahy, N. Hydrogen europe clean hydrogen monitor. **2020**. Available online: <https://hydrogeneurope.eu/wp-content/uploads/2021/11/Clean-HydrogenMonitor-2020.pdf> (accessed on 12 March 2024).
- PEI, **2020**. Polish Economic Institute. Hydrogen Economy in Poland: Observations Based on the Research Framework of the Technological Innovation System; POLICY PAPER 5/2020; Polish Economic Institute: Warsaw, Poland, 2020.
- PIBNASC, **2022**. Public Information Bulletin of the National Agricultural Support Center, Poland. Available on line: <https://bip.kowr.gov.pl/informacje-publiczne/odnawialne-zrodla-energii/biogaz-rolniczy/dane-dotyczace-dzialalnosci-wytworcow-biogazu-rolniczego-w-latach-2011-2021> Polish (Accessed 25 October 2022)
- Quilcaille, Y.; Gasser, T.; Ciais, P.; Lecocq, F.; Janssens-Maenhout, G.; Mohr, S. Uncertainty in projected climate change arising from uncertain fossil-fuel emission factors. *Environ. Res. Lett.* **2018**, *13*, 4. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab304>.
- Rabii, A.; El Sayed, A.; Ismail, A.; Aldin, S.; Dahman, Y.; Elbeshbishy, E. Optimizing the Mixing Ratios of Source-Separated Organic Waste and Thickened Waste Activated Sludge in Anaerobic Co-Digestion: A New Approach. *Processes* **2024**, *12*, 794. <https://doi.org/10.3390/pr12040794>.
- Rajaei Shooshtari, S.H.; Shahsavand, A. Reliable Prediction of Condensation Rates for Purification of Natural Gas via Super-sonic Separators. *Sep. Purif. Technol.* **2013**, *116*, 458–470.
- Rajput, R. K. A Textbook of Engineering Thermodynamics; Laxmi Publications Pvt. Ltd.: New Delhi, India, **2010**.
- Ramos, I.; Fdz-Polanco, M. Microaerobic control of biogas sulphide content during sewage sludge digestion by using biogas production and hydrogen sulphide concentration. *Chem. Eng. J.* **2014**, *250*, 303–311.
- Ramos, I.; Pérez, R.; Reinoso, M.; Torio, R.; Fdz-Polanco, M. Microaerobic digestion of sewage sludge on an industrial-pilot scale: The efficiency of biogas desulphurisation under different configurations and the impact of O₂ on the microbial communities. *Bioresour. Technol.* **2014**, *164*, 338–346.
- Raport **2019a**. Raport Nr. 1/2019 Specyfikacja techniczna dotycząca optymalizacji pracy jednostki kogeneracji biogazowej wytwarzającej energię elektryczną i ciepło w mikroinstalacji na potrzeby indywidualnych gospodarstw rolnych i hodowlanych będących prosumentami zgodnie z ustawą o odnawialnych źródłach energii (OZE).

- Analiza ekonomiczno-energetyczna wyników projektu „Interdyscyplinarne badania nad poprawą efektywności energetycznej i zwiększeniem udziału odnawialnych źródeł energii w bilansie polskiego rolnictwa” (akronim: BIOGAS&EE) w ramach realizacji Umowy nr 4/BIOGAS.UZ/2018 Etap III. Poznań w dniu 31.01.2019 r. Dokument wewnętrzny. Instytut Technologiczno-Przyrodniczy – Państwowy Instytut Badawczy, Falenty, Polska.
- Raport, **2019b**. Raport Nr. 2/2019 w sprawie poprawy funkcjonalności eksploatacyjnej mikroinstalacji wytwarzającej energię elektryczną i ciepło na potrzeby indywidualnego gospodarstwa rolno-hodowlanego po optymalizacji jednostki kogeneracyjnej na biogaz. Analiza ekonomiczno-energetyczna wyników projektu „Interdyscyplinarne badania nad poprawą efektywności energetycznej i zwiększeniem udziału odnawialnych źródeł energii w bilansie polskiego rolnictwa” (akronim: BIOGAS&EE) w ramach realizacji Porozumienia nr 4/BIOGAS.UZ/2018 Etap IV. Poznań w dniu 28.02.2019 r. Dokument wewnętrzny. Instytut Technologiczno-Przyrodniczy – Państwowy Instytut Badawczy, Falenty, Polska.
- Redding, M.R.A. Pig effluent—P application can increase the risk of P transport: Two case studies. *Australian. J. Soil Res.* **2001**, 39, 161–174.
- Refai, S. Development of Efficient Tools for Monitoring and Improvement of Biogas Production. Ph.D. Thesis, Universitäts-und Landesbibliothek Bonn, Bonn, Germany, **2016**.
- Reiter, A., Kaufmann, M. Micro-Biogas-Plant; AR Biogas System; Arno Reiter GmbH: Erpersdorf, Austria, **2019**, 1–13.
- Regulation, **2023**. Regulation (EC) No. 1069/2009 of the European Parliament and of the Council of 21 October 2009 Laying down Health Rules for Animal by-Products Not Intended for Human Consumption and Repealing Regulation 1774/2002 are Classified as Category 3 Material of Waste of Animal Origin (EU OJ L 300 of 14 November 2009). Available online: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/PDF/?uri=CELEX:02009R1069-20191214&from=LV> (accessed on) 1 March 2023.
- Rejman-Burzyńska, A.; Jędrzyk, E.; Gądek, M. Concept of the plant for upgrading biogas to biomethane. *Przemysł Chem.* **2013**, 92, 68-72.
- Ren, N.; Li, Y.; Zadsar, M.; Hu, L.; Li, J. Biological Hydrogen Production In China: Past, Present and Future. In Proceedings of the ASME 2005 International Solar Energy

- Conference. Solar Energy. Orlando, FL, USA. 6–12 August **2005**; ASME: New York, NY, USA, 663–666. <https://doi.org/10.1115/ISEC2005-76101>.
- Renewables, **2016**. Global Status Report; Paris: REN21 Secretariat. Available online: <https://www.ren21.net/gsr-2016/> (accessed 12 January 2022).
- Rodhe, L.K.K.; Ascue, J.; Willén, A.; Vegerfors Persson, B.; Nordberg, Å. Greenhouse gas emissions from storage and field application of anaerobically digested and non-digested cattle slurry. *Agric. Ecosyst. Environ.* **2015**, *199*, 358–368.
- Rokosz, E. *Growing Energy Crops*; Barzkowice, Poland, **2010**.
- Romaniuk, W.; Biskupska, K. An Agricultural Biogas Plant Step by Step; Hortpress: Warsaw, Poland, **2014**, 3–32.
- Romaniuk W., Głaszczka A., Biskupska K., **2012**. Analiza rozwiązań instalacji biogazowych dla gospodarstw rodzinnych i farmerskich. Inżynieria w rolnictwie, Monografie nr 9, Falenty, Wyd. ITP.
- Rogowski, W. Calculus of investment efficiency. Publisher: Wolters Kluwer, **2013**, ISBN: 978-83-264-6016-6.
- Rusanowska, P.; Zieliński, M.; Dudek, M.; Dębowski, M. Mechanical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Methane Fermentation in Innovative Reactor with Cage Mixing System. *J. Ecol. Eng.* **2018**, *19*, 219–224, doi:10.12911/22998993/89822.
- Ryckebosch, E.; Drouillon, M.; Vervaeren, H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. *Biomass Bioenergy* **2011**, *35*, 1633–1645.
- REPowerEU **2024**. Communication from the Commission to the European Parliament, the European Council, the Council, the European Economic and Social Committee and the Committee of the Regions REPowerEU Plan COM (2022) 230 Final. Available online: <https://eurlex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52022DC0230> (accessed on 12 March 2024).
- RMA, **2023**. Regulation of the Minister of Agriculture and Rural Development on a Detailed List of Substrates That Can Be Used in Agricultural Biogas Plants; Journal Laws of the Republic of Poland of October 17, 2023, item 2230; Minister of Agriculture and Rural Development: Poland, Warszawa, 2023.
- RMC, **2023**. Regulation of the Minister of Climate of January 3, 2020 on the Catalog of Waste (Journal of Laws 2020, Item 10). Available online: <https://leap.unep.org/countries/pl/national-legislation/regulation-catalogue-wastes-0> (accessed on 1 March 2023).

- Sans, C.; Mata-Alvarez, J.; Cecchi, F.; Pavan, P.; Bassetti, A. Acidogenic fermentation of organic urban wastes in a plug-flow reactor under thermophilic conditions. *Bioresour. Technol.* **1995**, 54, 105–110.
- Sansaniwal, S.K.; Pal, K.; Rosen, M.A.; Tyagi, S.K. Recent advances in the development of biomass gasification technology: A comprehensive review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2017**, 72, 363–384.
- Santos, L.; Soares, I.; Mendes, C.; Ferreira, P. Real Options versus Traditional Methods to assess Renewable Energy Projects. *Renewable Energy* **2014**, 68:588-594.
- Sarker, S.; Lamb, J.J.; Hjelme, D.R.; Lien, K.M. A Review of the Role of Critical Parameters in the Design and Operation of Biogas Production Plants. *Appl. Sci.* **2019**, 9, 1915
- Savolainen, J.; Collan, M.; Luukka, P. Analyzing operational real options in metal mining investments with a system dynamic model. *The Engineering Economist* 2016:00-00, **2016**.
- Sawicka, B. Energy value of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) as a source of biomass. *Sci. Noteb. UP Wroc. Rol.* **2010**, XCVII, 578.
- Sawyer, N.; Trois, C.; Workneh, T.; Okudoh, V. An Overview of Biogas Production: Fundamentals, Applications and Future Research. *Int. J. Energy Econ. Policy* **2019**, 9, 105–116.
- Scarlat, N.; Dallemand, J.-F.; Fahl, F. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renew Energy* **2018**, 129, 457–472.
- Schmidt, T.; Ziganshin, A.M.; Nikolausz, M.; Scholwin, F.; Nelles, M.; Kleinstaub, S.; Pröter, J. Effects of the reduction of the hydraulic retention time to 1.5 days at constant organic loading in CSTR, ASBR, and fixed-bed reactors—Performance and methanogenic community composition. *Biomass Bioenergy* **2014**, 69, 241–248
- Schmitz, M.; Madlener, R. Economic Viability of Kite-Based Wind Energy Powerships with CAES or Hydrogen Storage. *Energy Procedia* **2015**, 75:704-715.
- Schneemann, A.; White, J.L.; Kang, S.; Jeong, S.; Wan, L.F.; Cho, E.S.; Stavila, V. Nanostructured metal hydrides for hydrogen storage. *Chem. Rev.* **2018**, 118, 10775–10839. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.8b00313>.
- Shah, F.A.; Mahmood, Q.; Rashid, N.; Pervez, A.; Raja, I.A.; Shah, M.M. Co-digestion, pretreatment and digester design for enhanced methanogenesis. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **2015**, 42, 627-642, <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.053>.

- Sheen, J. Real option analysis for renewable energy investment under uncertainty. *Lect Notes Electr Eng* **2014**, 293:283-289.23.
- Show, K.Y.; Lee, D.J.; Tay, J.H.; Lin, C.Y.; Chang, J.S. Biohydrogen production: Current perspectives and the way forward. *Int. J. Hydrogen Energy* **2012**, 37, 15616–15631.
- Siddique, M.N.I.; Wahid, Z.A. Achievements and perspectives of anaerobic co-digestion: A review. *J. Clean. Prod.* **2018**, 194, 359–371. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.155>.
- Siefers, A.M. A Novel and Cost-Effective Hydrogen Sulfide Removal Technology Using Tire Derived Rubber Particles. Graduate Theses and Dissertations, Iowa State University, **2010**; 11281.
- Skerman, A.G. Practical options for cleaning biogas prior to on-farm use at piggeries. A thesis submitted in School of Chemical Engineering, The University of Queensland, **2016**.
- Sisani, E.; Cinti, G.; Discepoli, G.; PENCHINI, D.; Desideri, U.; Marmottini, F. Adsorptive removal of H₂S in biogas conditions for high temperature fuel cell systems. *Int. J. Hydrogen Energy* **2014**, 39, 21753–21766.
- Skowron, K.; Bauza-Kaszewska, J.; Kaczmarek, A.; Budzyńska, A.; Gospodarek, E. Microbiological aspects of slurry management. *Post. Mikrobiol.* **2015**, 54, 235–249. Available online: <http://www.p.m.microbiology.pl> (accessed on 10 January 2021).
- Smoliński, A.; Howaniec, N. Co-gasification of coal/sewage sludge blends to hydrogen-rich gas with the application of the simulated high temperature reactor excess heat. *Int. J. Hydrogen Energy* **2016**, 41, 8154–8158.
- Smoliński, A.; Howaniec, N.; Bąk, A. Utilization of energy crops and sewage sludge in the process of co-gasification for sustainable hydrogen production. *Energies* **2018**, 11, 809; doi:10.3390/en11040809.
- Smolinski, A.; Howaniec, N.; Gasiór, R.; Polański, J.; Magdziarczyk, M. Thermal conversion of low rank coal, flotation concentrate and refuse derived fuel in the process of steam co-gasification to hydrogen-rich gas. *Energy* **2021**, 235, 121348, doi:10.1016/j.energy.2021.121348.
- Smurzyńska, A.; Czekąła, W.; Kupryaniuk, K.; Cieślik, M.; Kwiatkowska, A. Types and properties of slurry and the possibilities of its management. *Probl. Agric. Eng.* **2016a**, 4, 117–127, ISSN 1231-0093
- Smurzyńska, A.; Dach, J.; Czekąła, W. Technologies to reduce emissions of noxious gases resulting from livestock farming. *Inżynieria Ekol.* **2016b**, 47, 189–198.

- Smurzyńska, A.; Dach, J.; Dworecki, Z.; Czekala, W. Emisje gazowe podczas gospodarki gnojowicą [Gas emissions during slurry management]. *Eng. Environ. Prot.* **2016c**, *19*, 109–125.
- Soil quality, **1994**. ISO 11465:1994. Soil quality — Determination of dry matter and water content on a mass basis — Gravimetric method. Technical Corrigendum 1, Edition 1, 1994, <https://www.iso.org/standard/23695.html> (accessed on 23 May 2024).
- Srivastava, R.K.; Shetti, N.P.; Reddy, K.R.; Aminabhavi, T.M. Biofuels, biodiesel and biohydrogen production using bioprocesses. A review. *Environ. Chem. Lett.* **2020**, *18*, 1049–1072. <https://doi.org/10.1007/s10311-020-00999-7>.
- Stan, C.; Collaguazo, G.; Streche, C.; Apostol, T.; Cocarta, D.M. Pilot-Scale Anaerobic Co-Digestion of the OFMSW: Improving Biogas Production and Startup. *Sustainability* **2018**, *10*, 1939
- Stańczyk, K.; Ludwik, M. Cultivation of energy crops—possibilities of developing wastelands and arable lands where agricultural production is unprofitable. *Sci. Work. GIG* **2003**, *3*, 71–81.
- Staszewski R., Wagner-Staszewska T., **1991**. Układ regeneracji adsorbentu w instalacji adsorpcyjno-desorpcyjnej. Polska. Zgłoszenie patentowe P.165947 z dnia 09.12.1991 r.
- Steppa, M. Agricultural biogas plants. In doc. dr inż. Waław Romaniuk. Supplement and Update: Doc. dr inż.; Institute for Building Mechanization and Electrification of Agriculture, Department of Mechanization of Animal Breeding—Head of the Department, Waław Romaniuk: Warsaw, Poland, **1992**.
- Stolze, Y.; Bremges, A.; Maus, I.; Pühler, A.; Sczyrba, A.; Schlüter, A. Targeted in situ metatranscriptomics for selected taxa from mesophilic and thermophilic biogas plants. *Microb. Biotechnol.* **2017**, *11*, 667–679. [
- Strauch, D. Survival of pathogenic micro-organisms and parasites in excreta, manure and sewage sludge. *Rev. Sci. Tech. Off. Int. Epiz.* **1991**, *10*, 813–846.
- Szul, T. Profitability assessment of straw pellets production. *Agric. Tech. For. Gard.* **2013**, *2*, 17-19.
- Sung, S.; Liu, T. Ammonia inhibition on thermophilic acetoclastic methanogens. *Water Sci. Technol.* **2002**, *10*, 113–120.
- Sung, S.; Liu, T. Ammonia inhibition on thermophilic anaerobic digestion. *Chemosphere* **2003**, *53*, 43–52.

- Surendra, K.C.; Takara, D.; Hashimoto, A.G.; Khanal, S.K. Biogas as a Sustainable Energy Source for Developing Countries: Opportunities and Challenges. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2014**, 31, 846–859, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.12.015>.
- Szczukowski, S.; Tworkowski, J.; Kwiatkowski, J. Possibilities of using the *Salix* sp. Biomass obtained from arable land as an ecological fuel and raw material for the production of cellulose and chipboards. *Adv. Agric. Sci.* **1998**, 2, 53–63.
- Stankiewicz, D. Possibilities of using agricultural raw materials for energy production in Poland. *BAS Stud.* **2010**, 1, 237–265.
- Szlachta, J. Analysis of the economic profitability of building straw-fired boiler houses and reduction of gas emissions during their use. *Agricultural Engineering* **2005**, 7, 331–338.
- Szpendowski, J.; Siemianowski, K. Nutritional and functional properties and the use of caseinates in food processing. *Eng. Sci. Technol.* **2013**, 3, 122–138.
- Szurlej A., Janusz P.: Gospodarka gazem ziemnym na rynku amerykańskim i europejskim. *Mineral Resources Management*, **2013**, 29.
- SKALAR, **2024**. Determination of phosphorus and nitrogen - according to the SKALAR methodology. The research procedure of the Environmental Chemistry Research Laboratory Falenty, 05-090 Raszyn, Poland consists in adopting routine procedures, appropriate to the working conditions in the outdoor laboratory, with expected characteristics (composition), applicable to specific determinations, within a specified concentration range. <https://www.itp.edu.pl/bip/index.html> (accessed on 23 May 2024).
- SRWE, **2020**. Statistical Review of World Energy, June 2020. Available online: <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/statistical-review/bp-stats-review-2020-full-report.pdf> (accessed on 12 March 2024).
- Tamagnini, P.; Axelsson, R.; Lindberg, P.; Oxelfelt, F.; Wünschiers, R.; Lindblad, P. Hydrogenases and Hydrogen Metabolism of Cyanobacteria. *Microbiol. Mol. Biol. Rev.* **2002**, 66, 1–20. <https://doi.org/10.1128/MMBR.66.1.1-20.2002>.
- Terms, **2021**. <https://www.investopedia.com/terms/p/profitability.asp> (accessed on 04 October 2021).
- Theuerl, S.; Herrmann, C.; Heiermann, M.; Grundmann, P.; Landwehr, N.; Kreidenweis, U.; Prochnow, A. The Future Agricultural Biogas Plant in Germany: A Vision. *Energies* **2019**, 12, 396; 1–32; doi:10.3390/en12030396
- Théobald, O. IEA Bionergy Task 37 - France Country Report **2019**; France. Available online: <http://task37.ieabioenergy.com/> (Accessed 12 December 2021); 31–32.

- Thilak Raj, N.; Iniyan, S.; Goic, R. A review of renewable energy based cogeneration technologies. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2011**, *15*, 3640–3648. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.06.003>.
- Thiruselvi, D.; Kumar, P.S.; Kumar, M.A.; Lay, C.-H.; Aathika, S.; Mani, Y.; Jagadiswary, D.; Dhanasekaran, A.; Shanmugam, P.; Sivanesan, S.; et al. A Critical Review on Global Trends in Biogas Scenario with Its Up-Gradation Techniques for Fuel Cell and Future Perspectives. *Int. J. Hydrog. Energy* **2020**, *46*, 16734–16750, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2020.10.023>.
- Thorin, E.; Lindmark, J.; Nordlander, E.; Odlare, M.; Dahlquist, E.; Kastensson, J.; Leksell, N.; Pettersson, C.-M. Performance Optimization of the Växtkraft Biogas Production Plant. *Appl. Energy* **2012**, *97*, 503–508, doi:<https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.007>.
- Tišma, M.; Planinić, M.; Bucić-Kojić, A.; Panjičko, M.; Zupančič, G.D.; Zelić, B. Corn Silage Fungal-Based Solid-State Pretreatment for Enhanced Biogas Production in Anaerobic Co-Digestion with Cow Manure. *Bioresour. Technol.* **2018**, *253*, 220–226, doi:[10.1016/j.biortech.2018.01.037](https://doi.org/10.1016/j.biortech.2018.01.037).
- Tomicka, I. *Plant Production 2*; State Agricultural and Forest Publishing House, Poland: **1995**.
- Tuczniaki, **2021**. Available online: <http://neorol.eu/tuczniaki/html> (accessed on 20 May 2021).
- Tyagi, V.K.; Bhatia, A.; Kubota, K.; Rajpal, A.; Ahmed, B.; Khan, A.A.; Kumar, M. Microbial community dynamics in anaerobic digesters treating organic fraction of municipal solid waste. *Environ Technol Inno.* **2021**, *21*, 101303. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2020.101303>.
- TAPC, **2024**. Total Air Pollution Control. Website: Gas Scrubbing—Activated Carbon Adsorbers. Available online: <https://tapc.com.au/our-products/dry-scrubbers/> (accessed on 28 May 2024).
- TVT. *Biogas to Biomethane Technology Review*; Vienna University of Technology: Vienna, Austria, **2012**.
- Uliasz-Misiak B. Wpływ geologicznego składowania CO₂ na środowisko. *Mineral Resources Management* **2011**, *27*.
- Urbaniec, K.; Grabarczyk, R. Directions of Research on Biological Methods of Obtaining Hydrogen as an Energy Carrier. *Inżynieria Systemów Bioagrotechnicznych* 5(14); Powierża, L., Ed.; Department of Systems Engineering, Warsaw University of Technology in Płock: Płock, Poland, **2005**; 209–214, ISBN 83-915395-3-9.

- Urych, B.; Smoliński, A. Kinetics of Sewage Sludge Pyrolysis and Air Gasification of Its Chars. *Energy Fuels* **2016**, 30, 4869–4878.
- Urych, B.; Smoliński, A. Sewage sludge and phytomass co-pyrolysis and the gasification of its chars: A kinetics and reaction mechanism study. *Fuel* **2021**, 285, 119186, doi:10.1016/j.fuel.2020.119186.
- UNDP, **2022**. United Nations Development Programme; Available on line: <https://www.undp.org/sustainable-development-goals> (Accessed on 23 January 2022).
- Vartak, D.R.; Engler, C.R.; McFarland, M.J.; Ricke, S.C. Attachedfilm media performance in psychrophilic anaerobic treatment of dairy cattle wastewater. *Bioresour. Technol.* **1997**, 62, 79–84.
- Vignais, P.M.; Billoud, B. Occurrence, Classification, and Biological Function of Hydrogenases: An Overview. *Chem. Rev.* **2007**, 107, 4206–4272. <https://doi.org/10.1021/cr050196r>. ISSN 0009-2665.
- Volgusheva, A.; Styring, S.; Mamedov, F. Increased photosystem II stability promotes H₂ production in sulfur-deprived *Chlamydomonas reinhardtii*. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **2013**, 110, 7223–7228. <https://doi.org/10.1073/pnas.1220645110>.
- Voytovych, I.; Malovanyy, M.; Zhuk, V.; Mukha, O. Facilities and problems of processing organic wastes by family-type biogas plants in Ukraine. *J. Water Land Dev.* **2020**, 45, 185–189.
- Walczak, J. Investment costs for agricultural biogas plants and possibility of their funding. In: Walczak J., (editor). *Agricultural Biogas Plants*. Cracow: Publishing and Printing team of the Institute of Animal **2010**, 39–52.
- Walla, C.; Schneeberger, W. The optima size for biogas plants. *Biomass and Bioenergy* **2008**;32:551–7.
- Walstra, P.; de Roos, A.L. Proteins at air-water and oil-water interfaces: Static and dynamic aspects. *Food Rev. Int.* **1993**, 9, 4, 503-525.
- Wałowski, G. Hydrodynamics of the biogas production process in a skeletal fermentation reactor. In Waclawa Romaniuk: *Innovative Technologies in Animal Production Taking into Account the Standards of the European Union, Environmental Protection and Renewable Energy*; ITP Publishing House: Warsaw, Poland, **2018**, 199–209, ISBN 978-83-65426-34-5.

- Wałowski, G. Multi-phase flow assessment for the fermentation process in mono-substrate reactor with skeleton bed. *Journal of Water and Land Development* **2019**, 42 (VII–IX) 150–156, DOI: 10.2478/jwld-2019-0056.
- Wałowski, G. Analysis and Classification of Agricultural Biomass as a Raw Material for Biorefineries. including Lignocellulosic Material and Aquatic Plants; Biogas Production in a Biomass Refinery including Aspects of Biogas Plant Operation; Wawrzyniak, A., Ed.; Poznan, Poland, ITP-PIB Publishing House, **2020**; 49–79, ISBN 978-83-65426-46-8.
- Wałowski, G. Development of biogas and biorafinery systems in Polish rural communities. *J. Water Land Dev.* **2021**, 49, 156–168. <https://doi.org/10.24425/jwld.2021.137108.w>.
- Wałowski, G. Assessment of polydisperse substrate flow in a fermentor for computational fluid dynamics modelling. *J. Water Land Dev.* **2022**, 1–7. <https://doi.org/10.24425/jwld.2022.143715>.
- Wałowski, G.; Borek, K.; Romaniuk, W.; Wardal, W.J.; Borusiewicz, A. *Modern Systems of Obtaining Energy–Biogas*; Romaniuk, W., Ed.; Publishing House of the Higher School of Agribusiness in Łomża : Warszawa, Poland, **2019**; 1–116, ISBN 978-83-947669-9-3.
- Wang, H.; Aguirre-Villegas, H.A.; Larson, R.A.; Alkan-Ozkaynak, A. Physical Properties of Dairy Manure Pre- and Post-Anaerobic Digestion. *Appl. Sci.* **2019**, 9, 2703, doi:10.3390/app9132703.
- Wang, Q.; Zhang, L.; Li, B.; Zhu, H.; Shi, J. 3D interconnected nanoporous Ta₃N₅ films for photoelectrochemical water splitting: Thickness-controlled synthesis and insights into stability. *Sci. China Mater.* **2021**, 64, 1876–1888. <https://doi.org/10.1007/s40843-020-1584-6>.
- Wang, L.; Xu, Y.; Li, Z.; Wei, Y.; Wei, J. CO₂/CH₄ and H₂S/CO₂ Selectivity by Ionic Liquids in Natural Gas Sweetening. *Energy Fuels* **2018**, 32, 10–23. <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b02852>.
- Ward, A.J.; Hobbs, P.J.; Holliman, P.J.; Jones, D.L. Optimisation of the anaerobic digestion of agricultural resources. *Bioresour. Technol.* **2008**, 99, 7928–7940. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.02.044>
- Wasilewski, J.; Krzaczek, P. Emission of toxic compounds from combustion of biodiesel: A report from studies. *Przem. Chem.* **2014**, 93, 343–346
- Water quality, **1994**. PN-ISO 9964-1:1994. Water quality - Determination of sodium and potassium - Determination of sodium by atomic absorption spectrometry. <https://katalog.ubb.edu.pl/integro/572300185072/normy/pn-iso-9964-11994-jakosc->

- wody-oznaczanie-sodu-i-potasu-oznaczanie-sodu-metoda-
absorpcyjnej?internalNav=1&bibFilter=57 (accessed on 23 May 2024).
- Water quality, **1997**. PN-ISO 9964-2/AK:1997. Water quality - Determination of sodium and potassium - Determination of potassium in wastewater by atomic absorption spectrometry (Country sheet)
<https://katalog.ubb.edu.pl/integro/572300185076/normy/pn-iso-9964-2ak1997-jakosc-wody-oznaczanie-sodu-i-potasu-oznaczanie-potasu-w-sciekach-metoda?internalNav=1&bibFilter=57> (accessed on 23 May 2024).
- Water quality, **2002**. PN-ISO 8288:2002. Water quality - Determination of cobalt, nickel, copper, zinc, cadmium and lead - Atomic absorption spectrometry methods with flame atomization. <https://bibliotekanauki.pl/articles/1366456> (accessed on 23 May 2024).
- Wdrożenie, **2019**. Umowa wdrożeniowa nr AT-23/2019, ITP Falenty.
- Weiland, P. Biogas Production: Current State and Perspectives. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **2010**, 85, 849–860, doi:10.1007/s00253-009-2246-7.
- Wellinger, A.; Linberg, A. Biogas Upgrading and Utilization—IEA Bioenergy Task 24: Energy from Biological Conversion of Organic Wastes. International Energy Association, Paris, France, **2005**. Available online: http://www.iea-biogas.net/_download/publi-task37/Biogas%20upgrading.pdf (accessed on 28 May 2024).
- Wen, C.; Karvounis, N.; Walther, J.H.; Yan, Y.; Feng, Y.; Yang, Y. An Efficient Approach to Separate CO₂ Using Supersonic Flows for Carbon Capture and Storage. *Appl. Energy* **2019**, 238, 311–319. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.01.062>.
- Werle, S. *Thermal Processing of Waste Biomass as an Element of the Circular Economy*; Silesian University of Technology Publishing House: Gliwice, Poland, **2021**.
- Wiącek, D.; Tys, J. Biogas—Production and Possibilities of Its Use; Acta Agrophysica; The Bohdan Dobrzański Institute of Agrophysics PAN: Lublin, Poland, **2015**.
- Więckol-Ryk, A.; Krzemień, A.; Smoliński, A.; Lasheras, F.S. Influence of wet flue gas desulfurization on amine based absorption plant for CO₂ removal. *Sustainability* **2018**, 10, 923, doi:10.3390/su10040923.
- Widrex. Available online: <http://www.widrex.pl/biomasa.html> (accessed on 28 January **2021**).
- Wiśniewski, G.; Oniszk-Popławska, A.; Sulima, P. Directions of Agricultural Biogas Technology Development in the EU and Poland; EC BREC Institute of Renewable Energy: Warsaw, Poland, **2008**.

- Wu, R.; Zhang, X.; Liu, Y.; Zhang, L.; Hu, J.; Gao, M.; Pan, H. A unique double-layered carbon nanobowl-confined lithium borohydride for highly reversible hydrogen storage. *Small* **2020**, *16*, 2001963. <https://doi.org/10.1002/sml.202001963>.
- WRC, **2010**. A Guide to Managing Barn Manure on Dairy Goat Farms. Dairy Goat Cooperative 2010. Available online: <https://www.waikatoregion.govt.nz/assets/WRC/managing-barn-manure-on-dairy-goat-farms.pdf> (accessed on 28 May 2024).
- Xie, S.; Lawlor, P.G.; Frost, P.; Dennehy, C.D.; Hu, Z.; Zhan, X. A Pilot Scale Study on Synergistic Effects of Co-Digestion of Pig Manure and Grass Silage. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* **2017**, *123*, 244–250, doi:<https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2017.07.005>.
- Xu, H.-J.; Zhang, C.-F.; Zheng, Z.-S. Solubility of Hydrogen Sulfide and Carbon Dioxide in a Solution of Methyldiethanolamine Mixed with Ethylene Glycol. *Ind. Eng. Chem. Res.* **2002**, *41*, 6175–6180. <https://doi.org/10.1021/ie020375o>.
- Yagüe, L.; Linares, J.I.; Arenas, E.; Romero, J.C. Levelized Cost of Biohydrogen from Steam Reforming of Biomethane with Carbon Capture and Storage (Golden Hydrogen)—Application to Spain. *Energies* **2024**, *17*, 1134. <https://doi.org/10.3390/en17051134>.
- Yang, Y.; Li, A.; Wen, C. Optimization of Static Vanes in a Supersonic Separator for Gas Purification. *Fuel Process. Technol.* **2016**, *156*, 265–270. <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2016.09.006>.
- Zahedi, S.; Ferrari, F.; Blandin, G.; Balcazar, J.L.; Pijuan, M. Enhancing Biogas Production from the Anaerobic Treatment of Municipal Wastewater by Forward Osmosis Pretreatment. *J. Clean. Prod.* **2021**, *315*, 128140, doi:<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.128140>.
- Zajac, G.; Szyszlak-Bargłowicz, J.; Słowik, T. Production and use of biogas in the "Hajdów" sewage treatment plant. *Gaz, Woda Tech. Sanit.* **2013**, *2*, 93–95.
- Zamojska-Jaroszewicz, A.; Matuszewska, A.; Owczuk, M.; Wardzińska, D. Methanogenic potential of mixtures of agricultural substrates. *Studia Ecol. Bioethicae UKSW* **2013**, *2*, 147–159.
- Zawadzka, A.; Imbierowicz, M. Biogas, 17–31 and Technologies and devices for biogas plants, p. 153–168. In *Collective Work Investing in Renewable Energy. Ecological, Technological, Financial and Benchmarking Aspects*; Polish Academy of Sciences, Łódź Branch, Environmental Protection Commission, Pro-Akademia Association of Economic Advisors: **2010**; ISBN 978-83-86492-59-6.

- Zbytek, Z.; Talarczyk, W. Slurry and environmental protection, *Forest Horticulture Agricultural Technique* **2008**, 4
- Zdeb, M. An Efficiency of H₂S Removal from Biogas via Physicochemical and Biological Methods—A Case Study. *Annu. Set Environ. Prot.* **2013**, 15, 551–563.
- Zhang, G.; Jiang, Z. Overview of hydrogen storage and transportation technology in China. *Unconv. Resour.* **2023**, 3, 291–296. <https://doi.org/10.1016/j.uncred.2023.07.001>.
- Zhang, Y.; Jiang, Y.; Wang, S.; Wang, Z.; Liu, Y.; Hu, Z.; Zhan, X. Environmental Sustainability Assessment of Pig Manure Mono- and Co-Digestion and Dynamic Land Application of the Digestate. *Renew. Sustain. Energy Rev.* **2020a**, 137, 110476, doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110476>.
- Zhang, T.; Liu, L.; Song, Z.; Ren, G.; Feng, Y.; Han, X.; Yang, G. Biogas production by co-digestion of goat manure with three crop residues. *PLoS ONE* **2013**, 8, e66845.
- Zhang, J.; Zhang, G.; Zhang, J. A hybrid artificial photosynthesis system with molecular catalysts covalently linked onto TiO₂ as electron relay for efficient photocatalytic hydrogen evolution. *J. Mater. Sci. Technol.* **2020b**, 50, 147–152. <https://doi.org/10.1016/j.jmst.2019.12.028>.
- Zicari, S.M. Removal of Hydrogen Sulphide from Biogas Using Cow-Manure Compost. Master's Thesis, Cornell University in Partial Fulfilment. Available online: <http://www.green-trust.org/> (accessed on 20 May **2021**).
- Żarczyński, A.; Rosiak, K.; Anielak, P.; Wolf, W. Practical methods of purifying biogas from hydrogen sulphide. Part. 1. Application of solid sorbents. *Acta Innov.* **2014**, 12, 24–35. Available online: http://www.proakademia.eu/gfx/baza_wiedzy/255/praktyczne_metody_oczyszczania_biogazu_z_siarkowodoru.pdf (accessed on 3 December 2015).
- Żarczyński, A.; Rosiak, K.; Anielak, P.; Ziemiński, K.; Wolf, W. Practical methods of hydrogen sulphide removal from biogas. II. Application of sorption solutions and biological methods. *Acta Innov.* **2015**, 15, 57–71
- Żyłka R.; Dąbrowski, W.; Malinowski, P.; Karolinczak, B. Modeling of Electric Energy Consumption during Dairy Wastewater Treatment Plant Operation. *Energies* **2020**, 13, 3769.