

## Analiza przemysłowych instalacji biogazowych w aspekcie rozwoju technologii oczyszczania biogazu

### Analysis of industrial biogas plants in terms of the development of biogas treatment technologies

Artur Antosz, Stefan Ptak

*Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy*

**STRESZCZENIE:** Energia jest niezbędnym czynnikiem, który napędza wszystkie współczesne gospodarki. Według powszechnej opinii tradycyjne zasoby energetyczne, głównie paliwa kopalne, wyczerpują się, a ich użycie powoduje wzrost zanieczyszczenia środowiska naturalnego. Dlatego też na znaczeniu zyskują odnawialne źródła energii (OZE), które są neutralne dla otaczającego nas środowiska. Poprawa sytuacji energetycznej świata wymaga ukierunkowania na konieczność, a nie na opcję korzystania z zielonych nośników energii. Aby tak się stało, wymagane jest upowszechnianie odnawialnych źródeł energii oraz ich konkurencyjność ekonomiczna w porównaniu z pierwotnymi nośnikami energii, które w przyszłości ulegną wyczerpaniu. Warunkiem przeprowadzenia zielonej rewolucji jest eliminacja istotnych wad odnawialnych źródeł energii, takich jak: uzależnienie od zmienności warunków atmosferycznych, naturalna zmienność w cyklu rocznym oraz sprzyjające ukształtowanie terenu. Najbardziej perspektywicznym i stabilnym zielonym źródłem energii w naszych krajowych realiach jest biomasa, a dokładnie produkcja biogazu rolniczego z biomasy. Biogaz rolniczy i biogazownie rolnicze należą do najszybciej rozwijających się segmentów energetyki odnawialnej w Europie. W pierwszej części artykułu dokonano rozeznania literaturowego dotyczącego procesu wytwarzania biogazu, rodzajów biogazowni oraz surowców stosowanych do produkcji biogazu. Przedstawiono obecną sytuację rozwoju energetycznego rynku biogazu na każdym z kontynentów, poziom zróżnicowania pod względem liczby instalacji, stopnia ich skomplikowania oraz zastosowanych technologii i rozwiązań konstrukcyjnych, zwłaszcza w przypadku dużych, scentralizowanych biogazowni. Część doświadczalna obejmowała próby otrzymania surowego biogazu. W tym celu skonstruowano instalację umożliwiającą produkcję biogazu. Zastosowano surowce takie jak jabłka, marchew, trawę pochodzącą ze skoszenia terenów zielonych INiG – PIB oraz produkt uboczny powstający w procesie odśluzowania oleju rzepakowego. Na wyprodukowanych próbkach biogazu przeprowadzono porównawczą analizę intensywności pasm dwutlenku węgla do metanu FTIR, za pomocą której określono przybliżony udział tych dwóch składników. Na podstawie tej analizy wytypowano próbkę biogazu, który charakteryzował się największym udziałem metanu i dla którego wykonano pełną analizę składu gazu.

Słowa kluczowe: biogaz, oczyszczanie biogazu.

**ABSTRACT:** Energy is an essential factor that drives all modern economies. It is commonly considered that traditional energy resources, mainly fossil fuels, are depleting, and their use increases environmental pollution. Therefore, the significance of renewable energy sources (RES) neutral to the surrounding environment is growing. Improving the world's energy situation requires a focus on the necessity, rather than the option, of using green energy media. For this to happen, the spread of renewable energy sources is required, as well as their economic competitiveness when compared with primary energy carriers, which will eventually be exhausted. But the prerequisite for a green revolution is to eliminate significant disadvantages of renewable energy sources such as dependence on weather variability, natural variability in the annual cycle and favourable terrain. The most promising and stable green energy source in our domestic realities is biomass, or more precisely, the production of agricultural biogas from biomass. Agricultural biogas and agricultural biogas plants are among the fastest growing segments of the renewable energy in Europe. The first part of the article includes a literature survey of the methane fermentation process, types of biogas plants and raw materials used for biogas production. The current situation regarding the development of the biogas energy market on each continent, the level of differentiation in terms of the number of plants, their complexity and the technologies and design solutions used, especially for large centralised biogas plants, is presented. The research section includes trials to obtain raw biogas. For this purpose, a plant was constructed to produce biogas. Apples, carrots, grass from mowing green areas, and industrial waste which was a by-product of rapeseed oil desludging, were used as raw materials for methane fermentation. In the

---

Autor do korespondencji: A. Antosz, e-mail: [artur.antosz@inig.pl](mailto:artur.antosz@inig.pl)

Artykuł nadesłano do Redakcji: 16.01.2023 r. Zatwierdzono do druku: 21.07.2023 r.

biogas samples produced, a comparative FTIR analysis of the intensity of the carbon dioxide-to-methane bands was carried out with which the approximate proportion of these two components was determined. On the basis of this analysis, the biogas sample that had the highest proportion of methane was selected for which a full gas composition analysis was performed.

Key words: biogas, biogas purification.

## Wprowadzenie

Wraz z rozwojem cywilizacyjnym ludzkości następuje wzrost zapotrzebowania na energię. Energia stanowi niezbędny czynnik, który napędza wszystkie współczesne gospodarki. Jest wykorzystywana w wielu gałęziach przemysłu, a także w transporcie, rolnictwie oraz w gospodarstwach domowych. Warto zauważyć, że wraz z postępującą urbanizacją i wzrastającą liczbą ludności na świecie zapotrzebowanie na energię elektryczną i ciepłą z roku na rok jest coraz większe. Według powszechnej opinii tradycyjne zasoby energetyczne, głównie paliwa kopalne (węgiel, ropa naftowa, gaz ziemny), wyczerpują się, a ich użycie powoduje wzrost zanieczyszczenia środowiska naturalnego, głównie gazami cieplarnianymi. Dlatego też na znaczeniu zyskują odnawialne źródła energii (OZE), które są neutralne dla otaczającego nas środowiska (GUS, 2022). Na przestrzeni ostatnich lat odnawialne źródła energii zyskały na znaczeniu z powodu troski o środowisko, ale również z uwagi na wzrastające ceny pierwotnych nośników energii. W związku z tym w wielu państwach, a zwłaszcza w Unii Europejskiej, kładzie się duży nacisk na wykorzystanie odnawialnych źródeł energii, takich jak woda, słońce, wiatr i biomasa, pokrywając coraz większą część zapotrzebowania na energię (Wiese i Kujawski, 2006).

Zasoby energii pierwotnej w Polsce charakteryzują się bardzo niekorzystną strukturą rozkładu w odniesieniu do ich wpływu na środowisko. Dominują złoża stałych paliw kopalnych (węgiel kamienny i brunatny), charakteryzujących się małą efektywnością wykorzystania oraz największym negatywnym skutkiem emisji CO<sub>2</sub> oraz innych zanieczyszczeń do atmosfery. Odpowiada za to głównie krajowa produkcja energii elektrycznej i ciepłej bazująca na wykorzystaniu kopalnych paliw stałych (Krawiec, 2010; Niedziółka, 2010).

Mały udział odnawialnych źródeł energii w bilansie energetycznym nie dotyczy wyłącznie Polski, lecz jest problemem światowym. Poprawa sytuacji energetycznej świata pod tym względem wymaga ukierunkowania na konieczność korzystania z zielonych nośników energii. Aby tak się stało, wymagane jest upowszechnianie odnawialnych źródeł energii oraz ich konkurencyjność ekonomiczna w porównaniu z pierwotnymi nośnikami energii, które w przyszłości ulegną wyczerpaniu. Przytaczając słowa Ahmeda Zakiego Yamaniego (saudyjskiego szejka i polityka, ministra saudyjskiego Ministerstwa Ropy Naftowej i Surowców Mineralnych w latach 1962–1986):

„Epoka kamienia łupanego nie skończyła się z powodu braku kamieni, a epoka ropy naftowej skończy się długo przed tym, gdy na świecie skończy się ropa” (Saudi dove in the oil slick, 2001). Warunkiem do przeprowadzenia zielonej rewolucji jest eliminacja istotnych wad odnawialnych źródeł energii, takich jak: uzależnienie od kaprysów pogody, naturalna zmienność w zależności od pór roku oraz sprzyjające ukształtowanie terenu w przypadku budowy elektrowni wodnych. Najbardziej perspektywicznym i stabilnym zielonym źródłem energii w naszych krajowych realiach jest biomasa, a dokładniej: produkcja biogazu rolniczego z biomasy.

Biogaz rolniczy i biogazownie rolnicze należą do najszybciej rozwijających się segmentów energetyki odnawialnej w Europie, szczególnie w Niemczech. Na dynamiczny rozwój biogazowni rolniczych już od kilku lat pozwala priorytetowe traktowanie energii z odnawialnych źródeł przez ustawodawstwo Unii Europejskiej. Rola biogazowni rolniczych jest coraz powszechniej dostrzegana także przez władze (Czapiewska, 2010).

## Powstawanie biogazu

Biogaz produkowany jest przez mikroorganizmy beztlenowe w procesie fermentacji metanowej biomasy, która stanowi jedno z podstawowych odnawialnych źródeł energii. Pod względem chemicznym biogaz składa się głównie z metanu i dwutlenku węgla, aczkolwiek jego kompozycja w dużej mierze zależy od rodzaju surowców, z których jest pozyskiwany. W tabeli 1 przedstawiono skład chemiczny biogazu otrzymywanego z odpadów z gospodarstw domowych, osadów z oczyszczalni ścieków, odpadów rolniczych oraz odpadów z przemysłu rolno-spożywczego.

Fermentacja metanowa jest złożonym procesem biochemicznym zachodzącym w kontrolowanych warunkach beztlenowych w wilgotnych siedliskach bogatych w materię organiczną. W przyrodzie warunki takie występują na torfowiskach, polach ryżowych, wysypiskach śmieci, przykrytych zbiornikach gnojowicy oraz na dnie morskim lub w przewodzie pokarmowym przeżuwaczy. W warunkach odpowiednich do ciągłego odtwarzania się populacji bakterii metanotwórczych biogaz może uwalniać się nieprzerwanie, a jego ilość i skład zależy od wielu czynników, tworzących zespół warunków środowiska reakcji.

**Tabela 1.** Skład chemiczny biogazu pozyskiwanego z różnego rodzaju surowców (Biogas composition, 2009)**Table 1.** Chemical composition of biogas produced from different types of raw materials (Biogas composition, 2009)

Składnik	Jednostka	Odpady z gospodarstw domowych	Osady z oczyszczalni ścieków	Odpady rolnicze	Odpady z przemysłu rolno-spożywczego
CH <sub>4</sub>	% obj.	50–60	60–75	60–75	68
CO <sub>2</sub>		34–38	19–33	19–33	26
N <sub>2</sub>		0–5	0–1	0–1	–
O <sub>2</sub>		0–1	<0,5	<0,5	–
H <sub>2</sub> O	% obj. (w 40°C)	6	6	6	6
H <sub>2</sub> S	mg/m <sup>3</sup>	100–900	1000–4000	3000–10000	100
NH <sub>3</sub>		–	–	50–100	400
Związki aromatyczne		0–200	–	–	–
Związki chlorowcoorganiczne lub fluoroorganiczne		–	–	–	–

Produkcja metanu w wyniku fermentacji metanowej zachodzi w czterech fazach, przy udziale czterech grup mikroorganizmów, z których każda wymaga odpowiednich dla siebie, ściśle określonych warunków środowiska reakcji (Jędrzak, 2008).

### Podział technologii produkcji biogazu

Wybór technologii produkcji biogazu zależy przede wszystkim od rodzaju przetwarzanych substratów. Dlatego też rozwiązania technologiczne można podzielić według określonych kryteriów, do których zalicza się zawartość suchej masy

w komorze fermentacyjnej, temperaturę procesu, liczbę stopni procesu, stopień rozdzielania poszczególnych faz procesu fermentacji oraz sposób dozowania substratów.

Pod względem skali działania biogazownie można podzielić na dwa typy:

- biogazownie scentralizowane, które charakteryzują się dużymi gabarytami, a których dzienny wsad surowca poddawane fermentacji wynosi od 50 ton do 500 ton substratów. Znajdują się one w pobliżu ferm hodowlanych;
- biogazownie indywidualne o mniejszych powierzchniach i rozmiarach komór fermentacyjnych.

W tabeli 2 przedstawiono klasyfikację technologii produkcji biogazu.

**Tabela 2.** Klasyfikacja technologii produkcji biogazu (Kujawski, 2009)**Table 2.** Classification of biogas production technologies (Kujawski, 2009)

Kryterium	Rodzaj technologii	Cechy charakterystyczne
Temperatura procesu	mezofilna	35–37°C, najczęściej stosowana
	termofilna	55–60°C, stosowana rzadziej, często w przypadkach przetwarzania substratów podwyższonego ryzyka, np. odpadów poubojowych lub odchodów zwierzęcych. Proces prowadzony w tych warunkach jest bardziej wrażliwy na zakłócenia, ale przebiega z większą wydajnością
Zawartość suchej masy w komorze fermentacyjnej	fermentacja mokra	zawartość suchej masy w substratach procesu nie przekracza 15%, fermentowany materiał ma postać płynną
	fermentacja sucha	substraty o konsystencji stałej, charakteryzujące się wysoką zawartością suchej masy
Liczba stopni procesu	jednostopniowa	w instalacji znajduje się jedna komora fermentacyjna
	wielostopniowa	w instalacji znajduje się kilka połączonych szeregowo komór do fermentacji
Stopień rozdzielania faz procesu fermentacji	jednofazowa	hydroliza substratów i etap metanogenezy zachodzą w jednym reaktorze z równą intensywnością
	wielofazowa	hydroliza substratów i etap metanogenezy zachodzą w oddzielnych reaktorach
Sposób dozowania substratów	ciągły	dozowanie substratów równomiernie w sposób ciągły, co umożliwia stały stopień produkcji biogazu
	okresowy	napelnienie komory fermentacyjnej jednorazowo i jej opróżnienie po procesie. Stopień produkcji biogazu wyższy w początkowym okresie procesu, malejący wraz z upływem czasu

### Biogazownie na świecie

Poziom rozwoju energetycznego rynku biogazu na świecie jest zróżnicowany, zarówno pod względem liczby instalacji, stopnia ich skomplikowania, jak też zastosowanych technologii i rozwiązań konstrukcyjnych, zwłaszcza w przypadku dużych, scentralizowanych biogazowni. Rozwój sektora biogazu napędzany jest różnymi celami w zależności od potrzeb danego kraju, począwszy od rozwiązania problemów związanych z wysypiskami śmieci w Wielkiej Brytanii, wspierania produkcji energii ze źródeł odnawialnych w USA, poprzez poprawę dostępu mieszkańców do energii w Chinach, aż po promowanie alternatywnych paliw transportowych w Szwecji i wspieranie rolnictwa we Francji. Bardzo istotne jest wdrożenie odpowiedniej polityki, która działa jak katalizator rozwoju sektora biogazu w różnych krajach (ENEA Consulting, 2019).

#### Azja

W rozwijających się krajach azjatyckich produkcja biogazu jest zdominowana przez małe komory fermentacyjne, stanowiące alternatywne źródło energii dla gospodarstw domowych. Na tym kontynencie istnieje największa liczba instalacji biogazowych – szczególnie w Chinach, które są liderem Azji w produkcji biogazu. Chiny posiadają ponad 100 tys. nowoczesnych dużych biogazowni i około 43 mln małych, podwórkowych biogazowni (Nicolae et al., 2018).

W Indiach liczbę biogazowni szacuje się na około jednego miliona. W większości biogazownie te zostały wykonane sposobem gospodarczym i wykorzystują podziemne prymitywne, nieizolowane komory fermentacyjne przy gospodarstwach rolnych. Są to przydomowe mikroinstalacje o bardzo prostej konstrukcji, niewielkich rozmiarach, ale tanie i efektywne. Jako surowiec w procesie fermentacji beztlenowej stosuje się w nich głównie nawóz zwierzęcy i resztki organiczne z gospodarstw domowych, a następnie przerabia się go w trybie fermentacji periodycznej. Magazynowany biogaz wykorzystuje się głównie na potrzeby własne. Raporty dotyczące produkcji biogazu w Azji dotyczą głównie Chin oraz Indii, jednak biogazownie działają również w wielu innych krajach, m.in. w Wietnamie i Tajlandii. Mieszkańcy Azji mają ogromne doświadczenie w eksploatacji biogazowni niewymagających dużych nakładów finansowych. Ponadto wiele azjatyckich uniwersytetów oraz instytutów badawczych poświęca część swoich prac badaniom mającym na celu udoskonalenie technologii wytwarzania biogazu. W ciągu ostatnich kilku lat rynek biogazowni dynamicznie rozwinął się w Japonii oraz w Korei Południowej. Powstało tam wiele nowoczesnych biogazowni rolniczych. Podobnie jak w Niemczech czy Danii – w Japonii istnieją scentralizowane biogazownie oraz małe, lokalne biogazownie,

o wielkości dostosowanej do skali gospodarstw rolnych, tzn. wykorzystujące surowce z okolicznych gospodarstw (Igliński et al., 2020).

#### Australia i Oceania

W tej części świata jest niewiele pilotowych biogazowni, które służą do przetwarzania resztek zwierzęcych. Od pewnego czasu biogazownie działają przy uniwersytetach w celach badawczych. W ostatnich latach w tym regionie świata systematycznie wzrasta zainteresowanie produkcją biogazu i płynącymi z niej korzyściami dla środowiska i społeczeństwa. Australijski przemysł biogazowy jest w fazie powstawania. W 2017 roku w Australii istniały 242 biogazownie, z czego około połowy stanowiły składowiska odpadów gromadzące gaz wysypiskowy (ENEA Consulting, 2019).

#### Ameryka Północna i Południowa

W ostatnich latach systematycznie rozwija się sektor biogazu w Brazylii. W 2016 roku Brazylija ustaliła krajowy 10-letni plan energetyczny, według którego do 2026 roku 46% energii ma pochodzić ze źródeł odnawialnych. W 2017 roku na północnoamerykańskim rynku biogazu działało 2200 instalacji, z czego około 70% to beztlenowe komory fermentacyjne w oczyszczalniach ścieków. Pozostałe to zakłady odzysku gazu wysypiskowego ze składowisk odpadów oraz niewielka liczba biogazowni rolniczych. Choć Stany Zjednoczone nie podpisały protokołu z Kioto, to jednak usilnie dążą do wykorzystania energii odnawialnej. Podobnie jest w Kanadzie, gdzie dzięki wsparciu programów federalnych i stanowych ponownie odżywa sektor biogazowy (Igliński et al., 2020).

#### Afryka

Technologia produkcji biogazu jest wciąż w początkowym stadium w Afryce, gdzie krajowe programy wspomagające rozwój sektora biogazu wdrożono w Kenii, Ugandzie, Etiopii, Tanzanii, Rwandzie, Kamerunie, Burkina Faso i Beninie. Wymienione państwa Afryki odniosły znaczne korzyści społeczne i ekonomiczne dzięki rozwojowi przemysłu biogazowego i są wzorcami do naśladowania dla innych afrykańskich krajów, które są w stanie uruchomić podobne programy bez pomocy z zewnątrz. Technologia biogazu, w przeciwieństwie do innych form energii odnawialnej, ma wiele zalet, a jedną z nich jest alternatywny sposób przetwarzania odpadów, które stanowią istotny problem w Afryce (Roopnarain i Adeleke, 2017).

Technologia biogazowa w Kenii została uznana za jeden z głównych motorów służących eliminacji ubóstwa energetycznego w większości wiejskich gospodarstw domowych dzięki promowaniu i wsparciu rozprzestrzeniania technologii produkcji biogazu. Ocena implementacji i trwałości systemów

biogazowych w Kenii jest jednym z głównych tematów dyskusji na temat rozwoju biogazu (Nzila et al., 2012).

Potencjał wykorzystania energii z biogazu charakteryzuje się dużą rozpiętością w krajach afrykańskich, co uzależnione jest od położenia geograficznego i poziomu rozwoju rolnictwa w danym regionie. Najniższy potencjał produkcji biogazu ma Dżibuti, a najwyższy – Egipt (Kemausuor et al., 2018).

## Europa

Według publikacji *Biogas Barometer 2020* (Observ'ER, 2020) w profesjonalnym wykorzystaniu biogazu przoduje Europa – szczególnie Niemcy, Wielka Brytania, Francja i Włochy są liderami produkcji biogazu w Europie. Analiza danych z raportu wskazuje, że Niemcy wyróżniają się jako najważniejszy producent, odpowiadały za wytworzenie około 44% europejskiego biogazu w 2018 roku. Wielka Brytania miała udział na poziomie 17%, Włochy – 12%, zaś czwarte miejsce w Europie zajmowała Francja – 4%. Produkcję biogazu w Europie cechuje bardzo duża dynamika wzrostu. W ciągu ostatniej dekady liczba biogazowni wzrosła z 10 508 instalacji w 2010 roku do ponad 19 tys. działających instalacji w 2020 roku. Stało się tak w wyniku podjęcia przez kraje UE zobowiązań do redukcji emisji gazów cieplarnianych i promowania odnawialnych źródeł energii (OZE) (Scarlat et al., 2018; Observ'ER, 2020). Kraje Unii Europejskiej przystąpiły do działań mających na celu promocję produkcji biogazu poprzez zastosowanie skutecznych ekonomicznych mechanizmów stymulujących rozwój sektora.

Niektóre kraje wspierają inwestycje poprzez dotacje w fazie budowy instalacji, jednak najbardziej popularną metodą wsparcia jest gwarantowanie stałych cen zakupu energii elektrycznej, tzw. *feed-in tariff*. Taki system jest szczególnie korzystny w przypadku małych instalacji, które z uwagi na niższą rentowność i wyższe ogólne korzyści społeczne otrzymują rekompensatę w postaci wsparcia na etapie eksploatacji w postaci dopłat do produkcji i sprzedaży zielonej energii elektrycznej (Olineira et al., 2018; Saadabadi et al., 2019).

Europa jest wiodącym producentem biometanu na świecie, z 459 instalacjami w 2015 roku produkującymi szacunkowo 1,23 mld m<sup>3</sup> rocznie i 414 instalacjami w samej Unii Europejskiej, natomiast całkowita produkcja biogazu w tym samym roku wyniosła około 18 mld m<sup>3</sup>. Uszlachetnianie biogazu do biometanu odbywa się w 15 krajach europejskich, a włączanie do sieci gazu ziemnego – w 10 krajach. Najwięcej instalacji do produkcji biometanu znajduje się w Niemczech (185), Wielkiej Brytanii (80) i Szwecji (61). W pozostałych krajach wielkość produkcji biometanu jest nadal marginalna. W 2015 roku działało 697 stacji tankowania biometanu, odpowiedzialnych za dystrybucję 160 mln m<sup>3</sup> biometanu jako paliwa do pojazdów (Scarlat et al., 2018).

## Polska

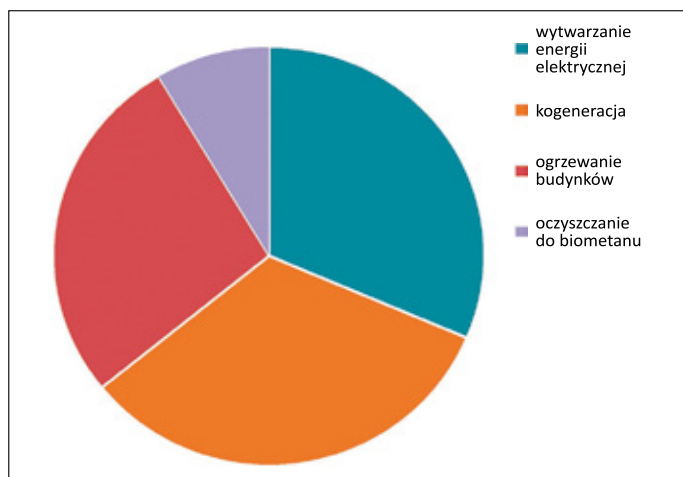
Początkowo biogazownie powstawały najczęściej w dużych gospodarstwach rolnych, głównie ze względu na dostępność znacznych ilości gnojowicy i kiszonki kukurydzy. Obecnie nastąpiła zmiana preferencji inwestorów, zwłaszcza w zakresie realizacji większych instalacji, a biogazownie są teraz chętniej lokalizowane przy zakładach przetwórstwa rolno-spożywczego (cukrownie, gorzelnie, ubojnie, zakłady przetwórstwa mięsnego i owocowo-warzywnego oraz mleczarnie). Powodem jest możliwość regularnego pozyskiwania tanich substratów odpadowych oraz gwarancja rocznego odbioru ciepła z agregatu kogeneracyjnego, co ma kluczowe znaczenie dla ekonomiki przedsięwzięcia (Pilarska i Pilarski, 2013; Szymańska i Lewandowska, 2015).

Obecny stan rozwoju rynku biogazownictwa w Polsce jest w dużej mierze wynikiem obowiązującego systemu wsparcia dla odnawialnych źródeł energii. Efektem budowy tego systemu był dynamiczny rozwój sektora biogazowego oraz preferowanie przez inwestorów dużych inwestycji w przedziale 0,5–1,5 MWh, które stanowią około 55% projektów na rynku. Obecnie w Polsce nie działa żadna komercyjna instalacja do oczyszczania biogazu do biometanu, produkowany biogaz jest zużywany do produkcji energii elektrycznej i ciepłej w silnikach kogeneracyjnych (Igliński et al., 2020).

Polskie biogazownie najczęściej wykorzystują mieszaninę kilku substratów, dzięki czemu oprócz możliwości uzyskania lepszych parametrów zostaje zapewnione bezpieczeństwo dostaw substratów. Zgodnie z ogólnie przyjętą zasadą zrównoważonego rozwoju w pierwszej kolejności wykorzystuje się odpady organiczne, a dopiero później stosuje się celowe rośliny uprawne. Najważniejszym substratem do produkcji biogazu rolniczego jest gnojowica (ponad 21,3%), następnie odpady gorzelniane (20,1%), resztki owoców i warzyw (19,9%) oraz kiszonka kukurydzy (12,4%). Pozostałe substraty to m.in. przeterminowana żywność, odpady z przemysłu mleczarskiego, produkty uboczne z browarów (Olineira et al., 2018).

## Oczyszczanie surowego biogazu

W większości pracujących biogazowni produkowany gaz jest wykorzystywany do wytwarzania energii elektrycznej w agregatach prądotwórczych lub wytwarzania energii elektrycznej i ciepłej w układach kogeneracyjnych, łączących produkcję energii elektrycznej i ciepła. Energia elektryczna jest wytwarzana przez generator napędzany silnikiem spalinowym lub turbiną. Ciepło jest natomiast odzyskiwane poprzez wymienniki ciepła z układu chłodzenia silnika i wymiennika ciepła na wylocie spalin. W urządzeniach tego typu sprawność pozyskiwania energii elektrycznej wynosi 30–40%, a odzysku



**Rysunek 1.** Struktura zagospodarowania biogazu w Europie (IEA, 2022)

**Figure 1.** Structure of biogas use in Europe (IEA, 2022)

ciepła – 40–45%. Układy kogeneracyjne współpracujące z biogazowniami przystosowane są do spalania gazu o zawartości metanu od 45% (Igliński et al., 2012). Na rysunku 1 przedstawiono strukturę zagospodarowania biogazu w Europie.

Bez wątpienia kogeneracja nie oferuje pełnego wykorzystania potencjału biogazowego, jakim jest zatłoczenie do sieci gazowych gazu ziemnego. Niemniej jednak obecnie istnieje możliwość zatłoczenia do sieci gazowej takiego biometanu, który został oczyszczony do czystości, jaką powinien się charakteryzować gaz ziemny. Takie rozwiązanie zapewniłoby bezpieczeństwo zarówno samych sieci gazowych, jak i odbiorców końcowych tego paliwa, jednak obecnie w Polsce nie ma, ze względów technologicznych i ekonomicznych, wdrożonych rozwiązań tego rodzaju.

Układy kogeneracyjne również wymagają wstępnego oczyszczenia surowego biogazu z siarkowodoru, którego stężenie może sięgać nawet 3000 ppm. Siarkowódor w takim stężeniu może powodować korozję urządzeń i wymagane jest obniżenie jego stężenia co najmniej do 700 ppm. Jedną z powszechnie stosowanych metod jest biologiczne usuwanie siarkowodoru poprzez wytrącanie siarki przez bakterie pracujące w środowisku z niewielkim, kontrolowanym dostępem tlenu. Jest to najpopularniejsza metoda usuwania siarkowodoru, sprawdzająca się w biogazowniach z układem kogeneracji. Innym sposobem na odsiarczenie biogazu jest przepuszczenie go przez zbiornik wypełniony rudą darniową. Stosowane są również kolumny filtracyjne ze związkami żelaza, węglem aktywnym i innymi substancjami (Curkowski et al., 2011; Holewa et al., 2012).

W celu wspomnianego wcześniej pełnego wykorzystania potencjału biogazu konieczne jest jego oczyszczenie do biometanu. W ciągu ostatniej dekady na naszym kontynencie, oprócz ciągle powiększającej się liczby biogazowni, zaobserwowano

jeszcze bardziej gwałtowny wzrost liczby instalacji do oczyszczania biogazu do biometanu – ze 187 zakładów w 2010 roku do 880 działających zakładów w 2020 roku. Szczególnie znaczący postęp można dostrzec w okresie zaledwie dwóch lat od 2018 do 2020 roku. Obecnie produkcja biometanu w Europie odbywa się w 18 krajach, najwięcej instalacji do produkcji biometanu znajduje się na terenie Niemiec, około 232 (Pavičić et al., 2022). W tabeli 3 przedstawiono liczbę instalacji do produkcji biogazu i biometanu w UE w latach 2010–2020.

**Tabela 3.** Liczba instalacji do produkcji biogazu i biometanu w UE w latach 2010–2020 (Pavičić et al., 2022)

**Table 3.** Number of biogas and biomethane production facilities in the EU from 2010 to 2020 (Pavičić et al., 2022)

Zakład	Rok					
	2010	2012	2014	2016	2018	2020
Biogazownie	10 508	13 812	16 834	17 432	18 943	ponad 19 000
Instalacje biometanowe	187	232	367	477	627	880

Biogaz oczyszczony do poziomu jakości gazu wysokometanowego jest równoważny i wymienny z gazem ziemnym, dzięki czemu może częściowo zastąpić gaz ziemny. Często określany jest jako odnawialny gaz ziemny (RNG) lub substytut gazu ziemnego (SNG). Procesy oczyszczania biogazu obejmują głównie metody fizyczne i chemiczne, ale dostępne są również metody biologiczne/biochemiczne, które można stosować nawet na małą skalę (Osorio i Torres, 2009). W tabeli 4 przedstawiono metody oczyszczania biogazu.

Płuczki wodne są szeroko stosowane do uszlachetniania biogazu ze względu na dużą tendencję rozpuszczania CO<sub>2</sub> w wodzie i znikomą rozpuszczalność w wodzie metanu. W związku z tym dwutlenek węgla rozpuszcza się w większym stopniu niż metan, zwłaszcza w niższych temperaturach. W efekcie przepuszczenia biogazu przez płuczkę wzrasta stężenie metanu w fazie gazowej. Jeśli woda ma być poddana procesowi recyklingu, jest ona przenoszona do kolumny deskrypcyjnej, gdzie odbywa się proces uwolnienia dwutlenku węgla – najczęściej poprzez obniżenie ciśnienia, po czym woda zostaje zawrócona do płuczki (Biernat i Samson-Bręk, 2011; Piskowska-Wasiak, 2014).

Adsorpcja zmiennociśnieniowa (PSA, ang. *pressure swing adsorption*) jest najbardziej rozpowszechnioną techniką oczyszczania biogazu. W metodzie tej dwutlenek węgla jest usuwany z biogazu poprzez adsorpcję na powierzchni węgla aktywnego bądź na sitach molekularnych z zeolitu pod zwiększonym ciśnieniem. Po wykorzystaniu pojemności adsorpcyjnej złoża materiał adsorpcyjny poddawany jest procesowi regeneracji i może być ponownie użyty. Regeneracja odbywa się przez

**Tabela 4.** Metody oczyszczania biogazu oraz zasady ich działania (Pavičić et al., 2022)**Table 4.** Biogas purification methods and their principles of operation (Pavičić et al., 2022)

Metoda		Zasada działania
Absorpcja	płuczka wodna	różnice w rozpuszczalności H <sub>2</sub> S, CO <sub>2</sub>
	płuczka z cieczą organiczną	
	płuczka z chemikaliami	usunięcie CO <sub>2</sub> wskutek reakcji chemicznej w roztworach zasadowych
	wytrącanie chemiczne	stosowane chemikalia wiążą siarczki w nierozpuszczalne metaliczne związki siarczkowe lub siarkę elementarną
	tlenki metali Al, Fe, Mn, Co, Cu, Zn	H <sub>2</sub> S zostaje związany jako siarczek metalu – metoda skuteczna w usuwaniu merkaptanów
Adsorpcja	adsorpcja zmiennociśnieniowa (PSA)	metoda wykorzystuje selektywne powinowactwo CO <sub>2</sub> do powierzchni sorbentu stałego pod różnymi ciśnieniami
	węgiel aktywny	katalizuje utlenienie H <sub>2</sub> S do siarki elementarnej
Biologiczne		mikroorganizmy przekształcają H <sub>2</sub> S w siarkę elementarną
Membrany		różnica przepuszczalności gazów przez włókno membranowe
Metody kriogeniczne		różnice temperatur wrzenia CO <sub>2</sub> i CH <sub>4</sub>

obniżenie ciśnienia, w wyniku którego następuje desorpcja dwutlenku węgla. W celu zachowania ciągłości procesu instalacja taka składa się z kilku kolumn (Biernat i Samson-Bręk, 2011; Bauer et al., 2013).

Płuczki z cieczami organicznymi działają podobnie jak płuczki wodne, a jedyna różnica jest taka, że dwutlenek węgla jest absorbowany w rozpuszczalniku organicznym. W tego typu płuczках często stosuje się glikol polietylenowy, charakteryzujący się wyższą niż woda rozpuszczalnością dwutlenku węgla. Glikol polietylenowy może być następnie regenerowany przez ogrzewanie lub obniżenie ciśnienia. Płuczki organiczne są zdecydowanie rzadziej stosowane niż płuczki wodne. Instalacje, w których znalazła zastosowanie ta technika, znajdują się głównie w Niemczech (Biernat i Samson-Bręk, 2011; Croce et al., 2016).

Płuczki chemiczne, zwane również aminowymi, wykorzystują chemiczne wiązanie dwutlenku węgla w wodnych roztworach amin. Najczęściej przeprowadza się to przy zastosowaniu wodnych roztworów monoetanolaminy (MEA) lub dimetyloetanolaminy (DMEA). Dwutlenek węgla obecny w biogazie reaguje z aminą i przechodzi w formie soli do roztworu. Ciecz, w której jest związany chemicznie dwutlenek węgla, jest regenerowana przez ogrzewanie. Reakcja jest bardzo selektywna, dzięki czemu straty metanu są nieznaczne (Biernat i Samson-Bręk, 2011; Piskowska-Wasiak, 2014).

Techniki membranowe pozwalają na oczyszczanie biogazu z dwutlenku węgla i siarkowodoru. Membrana stanowi filtr, przez który może przenikać bez przeszkód przynajmniej jeden ze składników rozdzielanej mieszaniny, podczas gdy inne są przez nią zatrzymywane ze względu na ich wielkość lub powinowactwo. Jest to związane z różną przepuszczalnością membrany. Przenikanie przez membranę umożliwia różnica potencjałów chemicznych występująca między jedną a drugą

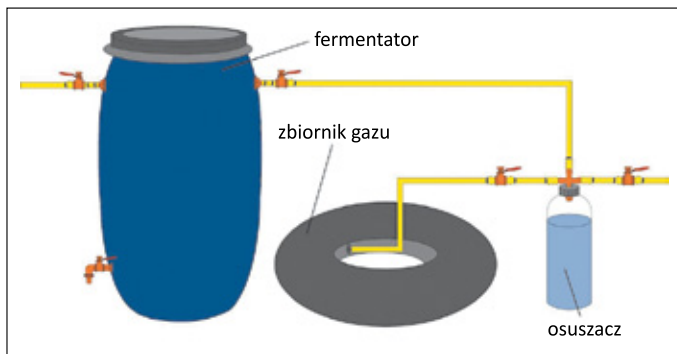
stroną membrany, która może być spowodowana różnicą ciśnienia, stężenia, temperatury lub potencjału elektrycznego po obu stronach membrany. Separacja membranowa jest jedną z podstawowych metod oczyszczania gazu wysypiskowego (Biernat i Samson-Bręk, 2011; Pavičić et al., 2022).

## Część doświadczalna

### Instalacja do produkcji biogazu

Sercem każdej biogazowni jest komora fermentacyjna, w której zachodzi fermentacja metanowa. Komora fermentacyjna w biogazowni rolniczej powinna być podgrzewana i dobrze zaizolowana w celu ograniczenia strat ciepła procesowego oraz utrzymania stałej temperatury procesu fermentacji metanowej. Jednak najistotniejszą cechą takiej komory jest jej szczelność, zapewniająca odpowiednią, pozbawioną tlenu, atmosferę wymaganą do fermentacji metanowej.

W wyniku przeprowadzonej analizy możliwości zakupu dostępnych w sprzedaży artykułów, które na tym etapie prac można zaadaptować na komorę fermentacyjną, wybrano beczkę z tworzywa sztucznego o objętości 120 litrów. W górnej części beczki umieszczono dwa króćce z zaworami kulowymi, jeden do odbioru biogazu do dalszej części instalacji, a drugi umożliwiający podpięcie butli ze sprężonym azotem. Przedmuch azotem przewidziano w celu pozbycia się tlenu z komory fermentacyjnej po jej napełnieniu substratem do fermentacji. Zbiornik fermentacyjny został umieszczony w pomieszczeniu wolnostojącym obok budynków magazynowych wyposażonym w programowalny układ do utrzymywania stałej temperatury. Pomieszczenie to wcześniej służyło jako komora termiczna do badania stabilności paliw podczas wielokrotnych cykli zmiany temperatury. Dzięki umieszczeniu komory fermentacyjnej



**Rysunek 2.** Schemat instalacji do produkcji biogazu  
**Figure 2.** Diagram of the biogas installation

w tym pomieszczeniu zrezygnowano z izolacji cieplnej omawianej komory. Na rysunku 2 przedstawiono schemat instalacji do produkcji biogazu.

Przewód odprowadzający biogaz z komory fermentacyjnej wyprowadzono na zewnątrz pomieszczenia i podłączono do szklanej butelki pełniącej rolę osuszacza biogazu z wilgoci. Obok łapacza skroplonej wilgoci umieszczono zbiornik na biogaz, za który posłużyła duża dętka stosowana w samochodach ciężarowych. Od łapacza skroplin wyprowadzono dodatkowy przewód służący do pobierania próbek uzyskanego biogazu oraz umożliwiający odbiór do większego zbiornika magazynowego. Dodatkowo z komory fermentacyjnej wyprowadzono króciec umożliwiający pomiar ciśnienia panującego wewnątrz za pomocą manometru cieczowego zbudowanego z tak zwanej U-rurki wypełnionej wodą. W dolnej części komory fermentacyjnej umieszczono króciec, którym pobierano próbki fermentującego wsadu w celu zbadania pH. Zdecydowano, że na tym etapie mieszanie zawartości zbiornika fermentacyjnego będzie realizowane ręcznie poprzez jego kołysanie.

**Metoda badawcza z wykorzystaniem spektrometru IR INVENIO R**

Do analizy uzyskanych próbek biogazu wykorzystano spektrometr IR INVENIO R z zainstalowanym detektorem DLaTGS, pokrywającym zakres pomiarowy 350–8000 cm<sup>-1</sup>, oraz szklaną kuwetą gazową firmy Bruker umożliwiającą dokonywanie pomiarów dla regulowanej drogi optycznej od 0,8 m do 8 m. Przed przystąpieniem do eksperymentu konieczne było wytypowanie odpowiednich pików, charakterystycznych dla obecności metanu i CO<sub>2</sub>. W tym celu dokonano rejestracji widma IR próbki biogazu pochodzącej z przemysłowej biogazowni.

**Surowce do badań**

W ramach pracy przeprowadzono badania z zastosowaniem:

- jabłek;
- marchwi;

- trawy oraz siana – oba surowce pochodziły ze skoszenia terenów zielonych INiG – PIB;
- odpadu przemysłowego, którym był produkt uboczny powstający w procesie odsłuzowania oleju rzepakowego.

Przed zadozowaniem do komory fermentacyjnej – jabłka i marchew zostały zmiksowane za pomocą blendera. Dostępna skoszona trawa była już wystarczająco rozdrobniona przez kosiarkę do trawy. W celu zmagazynowania materiału do produkcji biogazu trawa została wysuszona i była przechowywana w pomieszczeniu obok fermentora.

W zastosowanych surowcach została oznaczona sucha masa – wyniki zawarto w tabeli 5.

**Tabela 5.** Wyniki oznaczeń suchej masy w surowcach do produkcji biogazu

**Table 5.** Results of dry matter determinations in biogas feedstocks

Surowiec	Sucha masa [% m/m]
Jabłka	14,04
Marchew	9,11
Ziemniaki	19,86
Trawa	28,00
Odpad z produkcji FAME	39,10

**Uruchomienie biogazowni, próba z zastosowaniem jabłek (P-1)**

W celu uruchomienia skonstruowanej biogazowni wprowadzono inokulum (próbkę mikroorganizmów służącą do założenia kultury komórkowej) w ilości 50 litrów z działającą biogazowni przemysłowej.

System podgrzewania w pomieszczeniu, w którym umieszczono komorę fermentacyjną, został ustawiony na utrzymanie temperatury 38°C (±1°C). Część instalacji za króćcem odbioru biogazu, obejmująca dętkę służącą jako zbiornik magazynowy oraz łapacz skroplin, została pozbawiona powietrza poprzez odessanie pompą próżniową podłączoną do króćca umożliwiającego pobór próbek biogazu. Po ogrzaniu pomieszczenia do zadanej temperatury przelano inokulum do komory fermentacyjnej i dodano miąższ ze zmiksowanych jabłek w ilości 15 kg oraz wodę w ilości 15 litrów. Następnie szczelnie zakręcono pokrywę beczki i rozpoczęto przepuszczanie azotu przez komorę fermentacyjną przez około 15 minut. Po tym czasie podpięto przewód łączący wcześniej odgazowaną część instalacji do komory fermentacyjnej i kontynuowano przedmuch instalacji azotem przez 5 minut. Podczas tego przedmuchu zakręcony był zawór doprowadzający gaz do dętki. Po zakończonym przedmuchu azotem zakręcano zawór umieszczony przy króćcu do poboru próbek oraz zawór dostarczający azot do beczki i otwierano zawór do dętki.



**Tabela 6.** Parametry technologiczne oraz właściwości biogazu uzyskanego z próby P-1**Table 6.** Technological parameters and properties of biogas obtained from the P-1 trial

Próba	P-1 (jabłka)
<i>Parametry technologiczne</i>	
Temperatura komory fermentacyjnej [°C]	38
Czas trwania procesu	7 dni
Odczyn pH	odnotowano ciągły spadek pH z początkowego 7,6 do końcowego 6,5
<i>Otrzymany biogaz</i>	
Stosunek intensywności pasm FTIR dwutlenku węgla do metanu	2,3
Siarka [mg/m <sup>3</sup> ]	~900
Azot (występujący w związkach bez azotu cząsteczkowego) [mg/m <sup>3</sup> ]	~0,2

Próbkę prowadzono przez 7 dni, podczas których codziennie pobierano próbkę zawartości fermentora do badania pH. Badany odczyn pH systematycznie spadał w trakcie doświadczenia. W miarę napełniania dętki obserwowano minimalny wzrost ciśnienia na manometrze wodnym. Po zakończeniu testu pobrano próbki do worków tedlarowych oraz badano stosunek intensywności pasm FTIR dwutlenku węgla do metanu. Parametry technologiczne oraz właściwości biogazu uzyskanego z próby P-1 przedstawiono w tabeli 6.

#### *Próba z zastosowaniem marchwi (P-2)*

Podobnie jak podczas uruchamiania biogazowni przed przystąpieniem do próby ogrzano pomieszczenie z komorą fermentacyjną. W kolejnych próbach następujących po sobie również stosowano inokulum pochodzące z poprzedniej fermentacji. Inokulum odbierano króćcem umieszczonym w dolnej części beczki w postaci płynnej z niewielką zawartością stałych drobin, natomiast szlam pozostały w komorze fermentacyjnej usuwano przed kolejną próbą.

W próbie zastosowano 58 kg inokulum pochodzącego z poprzedniego wsadu i dodano miąższ ze zmiśowanej marchwi w ilości 15 kg oraz wodę w ilości 10 litrów. Następnie szczelnie zakręcono pokrywę beczki i rozpoczęto przepuszczanie azotu przez komorę fermentacyjną przez około 15 minut. Po tym

czasie podpięto przewód łączący dalszą część instalacji do komory fermentacyjnej i kontynuowano przedmuch instalacji azotem przez 5 minut. Podczas tego przedmuchu zakręcony był zawór doprowadzający gaz do dętki. Po zakończonym przedmuchu azotem zakręcano zawór umieszczony przy króćcu do poboru próbek oraz zawór dostarczający azot do beczki i otwierano zawór do dętki.

Odczyn pH był systematycznie monitorowany i w razie konieczności regulowany, aby utrzymywał się w przedziale od 7,2 do 7,6. Parametry technologiczne oraz właściwości biogazu uzyskanego z próby P-2 przedstawiono w tabeli 7.

#### *Próba z zastosowaniem jako substratu odpadu z produkcji FAME P-3*

Do kolejnej próby z zastosowaniem odpadowego surowca z produkcji FAME P-3 (powstającego podczas procesu odśluzowania oleju) dodano inokulum pochodzące z poprzedniej próby w ilości 50 litrów, 2 kg surowca odpadowego i 15 litrów wody. Następnie powtórzono procedurę z przedmchem azotu stosowaną podczas wcześniejszych prób. Odczyn pH był systematycznie monitorowany i w razie konieczności regulowany, tak aby utrzymywał się w przedziale od 7,2 do 7,6. Wyniki analiz powstałego biogazu oraz parametry procesu fermentacji przedstawiono w tabeli 8.

**Tabela 7.** Parametry technologiczne oraz właściwości biogazu uzyskanego z próby P-2**Table 7.** Technological parameters and properties of biogas obtained from P-2 trial

Próba	P-2 (marchew)
<i>Parametry technologiczne</i>	
Temperatura komory fermentacyjnej [°C]	38
Czas trwania procesu	7 dni
Odczyn pH	7,2–7,6
<i>Otrzymany biogaz</i>	
Stosunek intensywności pasm FTIR dwutlenku węgla do metanu	2,5
Siarka [mg/m <sup>3</sup> ]	~1100
Azot (występujący w związkach bez azotu cząsteczkowego) [mg/m <sup>3</sup> ]	~2

**Tabela 8.** Parametry technologiczne oraz właściwości biogazu uzyskanego z próby P-3

**Table 8.** Technological parameters and properties of biogas obtained from P-3 trial

Próba	P-3 (odpad z produkcji FAME)
<i>Parametry technologiczne</i>	
Temperatura komory fermentacyjnej [°C]	38
Czas trwania procesu	7 dni
Odczyn pH	7,2–7,6
<i>Otrzymany biogaz</i>	
Stosunek intensywności pasm FTIR dwutlenku węgla do metanu	1,7
Siarka [mg/m <sup>3</sup> ]	~1000
Azot (występujący w związkach bez azotu cząsteczkowego) [mg/m <sup>3</sup> ]	~3,5

**Próba z zastosowaniem jako substratu trawy (P-4)**

W próbie zastosowano 55 kg inokulum pochodzącego z poprzedniego wsadu i dodano świeżo skoszoną trawę w ilości 15 kg oraz wodę w ilości 10 litrów. Następnie powtórzono procedurę z przedmuchaem azotu stosowaną podczas wcześniejszych prób. Próba z przetwarzaniem trawy trwała 4 tygodnie. W drugim, trzecim i czwartym tygodniu próby dodawano świeżą porcję wysuszonej trawy w ilości 1,5 kg; dodawanie kolejnej porcji substratu było możliwe po rozszczelnieniu układu. W związku z tym po każdej dodanej porcji konieczne było przedmuchiwanie układu azotem według wcześniejszych procedur. Poziom pH był badany codziennie i w razie konieczności regulowany. Odbierany w trakcie trwania tej próby biogaz przetłaczano do jednego z zamówionych zbiorników magazynowych wykonanych z tkaniny poliestrowej pokrytej PCV 1150 g/m<sup>2</sup>, w kształcie poduszki o objętości około 1 m<sup>3</sup> (rysunek 3).

Po zakończonej próbie pobrano próbki uśrednianego biogazu ze zbiornika magazynowego do worków tedlarowych i wykonano analizę składu gazu oraz pomiar stosunku intensywności



**Rysunek 3.** Zbiornik magazynowy o objętości 1 m<sup>3</sup>

**Figure 3.** Storage tank with a volume of 1 m<sup>3</sup>

pasem FTIR dwutlenku węgla do metanu. Wyniki dla otrzymanego biogazu przedstawiono w tabeli 9.

Na podstawie analizy stosunku intensywności pasm FTIR dwutlenku węgla do metanu wytypowano próbkę biogazu z najniższym stosunkiem intensywności pasm FTIR i przekazano do pełnej analizy składu biogazu. Wytypowaną próbką był biogaz z próby z trawą P-4. Biogaz ten charakteryzował się zawartością metanu na poziomie 64,5%, a dwutlenku węgla na poziomie 19,8%. Zawierał również 4,5% tlenu oraz 11,3% azotu. Tlen i azot prawdopodobnie dostały się do biogazu w trakcie dodawania kolejnych porcji surowca. Podczas prób zakładano, że tlen z powietrza zostanie usunięty podczas przedmucha azotem, jednak jak wykazały wyniki badań, tlen nie został usunięty, prawdopodobnie z powodu zbyt krótkiego przedmucha instalacji azotem.

Analiza stosunku intensywności pasm dwutlenku węgla do metanu w wykonanych widmach pozwala na określenie przybliżonego składu dwutlenku węgla i metanu w uzyskanych próbkach. Wyniki pomiaru stosunku intensywności pasm FTIR dwutlenku węgla do metanu dla próbek P-1 i P-2 mogą świadczyć o mniejszej zawartości metanu i większej zawartości dwutlenku węgla w stosunku do próbki uzyskanej w próbie P-4. Natomiast próbka P-3 wykazywała bardzo podobny do P-4 stosunek intensywności pasm dwutlenku węgla do metanu.

**Podsumowanie**

W pierwszej części pracy dokonano rozeznania literaturowego dotyczącego procesu fermentacji metanowej, rodzajów biogazowni oraz surowców stosowanych do produkcji biogazu. Przedstawiono obecną sytuację rozwoju energetycznego rynku biogazu na każdym z kontynentów, poziom zróżnicowania pod względem liczby instalacji, stopnia ich skomplikowania oraz zastosowanych technologii i rozwiązań konstrukcyjnych, zwłaszcza dla dużych, scentralizowanych biogazowni. W badaniach laboratoryjnych przeprowadzono próby uzyskania

**Tabela 9.** Skład biogazu uzyskanego podczas próby P-4**Table 9.** Composition of biogas obtained from P-4 trial

Składnik biogazu	Próbka biogazu
	P-4 (trawa)
<i>Parametry technologiczne</i>	
Temperatura komory fermentacyjnej [°C]	38
Czas trwania procesu	28 dni
Odczyn pH	7,2–7,6
<i>Otrzymany biogaz</i>	
Metan [% mol/mol]	64,50
Ditlenek węgla CO <sub>2</sub> [% mol/mol]	19,80
Ditlenek węgla [% mol/mol] w odniesieniu do sumy CO <sub>2</sub> + CH <sub>4</sub>	23,00
Tlen [% mol/mol]	4,50
Azot [% mol/mol]	11,30
Stosunek intensywności pasm FTIR ditlenku węgla do metanu / czas poboru [min]	1,60
Siarkowodor [mmol/kmol]	0,46
Siarczek karbonylu [mmol/kmol]	<0,1
Merkaptan metylowy [mmol/kmol]	<0,1
Merkaptan etylowy [mmol/kmol]	<0,1
Siarczek dimetylu [mmol/kmol]	<0,1
Disiarczek węgla [mmol/kmol]	<0,1
Merkaptan i-propylowy [mmol/kmol]	<0,1
Merkaptan tert-butylowy [mmol/kmol]	<0,1
Merkaptan n-propylowy [mmol/kmol]	<0,1
Siarczek metylowo-etylowy [mmol/kmol]	<0,1
Merkaptan s-butylowy [mmol/kmol]	<0,1
Merkaptan i-butylowy [mmol/kmol]	<0,1
Siarczek dietylu [mmol/kmol]	<0,1
Merkaptan n-butylowy [mmol/kmol]	<0,1
Disiarczek dimetylu [mmol/kmol]	<0,1
Siarczek dipropylu [mmol/kmol]	<0,1
Disiarczek dietylu [mmol/kmol]	<0,1
Siarka [mg/m <sup>3</sup> ]	~1
Azot związany [mg/m <sup>3</sup> ]	~1

biogazu z czterech różnych surowców. Zawartość metanu w próbkach szacowano na podstawie analizy stosunku intensywności pasm IR dwutlenku węgla do metanu oraz wytypowano próbkę biogazu P-4 z próby z trawą. Na wytypowanej próbce przeprowadzono pełną analizę składu biogazu.

Artykuł opracowano na podstawie pracy statutowej pt. *Analiza przemysłowych instalacji biogazowych w aspekcie rozwoju technologii oczyszczania biogazu*, praca INiG – PIB; nr zlecenia: 0040/TO/2022, nr archiwalny: DK-4100-0028/2022.

#### Literatura

Bauer F., Hulteberg C., Persson T., Tamm D., 2013. Biogas upgrading – Review of commercial technologies. *SGC Rapport 2013:270*.

<<http://www.sgc.se/ckfinder/userfiles/files/SGC270.pdf>> (dostęp: wrzesień 2022).

Biernat K., Samson-Bręk I., 2011. Przegląd technologii oczyszczania biogazu do jakości gazu ziemnego. *Chemik*, 65(5): 435–444.

Biogas composition, 2009. Biogas renewable energy. <[https://www.biogas-renewable-energy.info/biogas\\_composition.html](https://www.biogas-renewable-energy.info/biogas_composition.html)> (dostęp: wrzesień 2022).

Croce S., Wei Q., D'Imporzano G., Dong R., Adani F., 2016. Anaerobic digestion of straw and corn stover: the effect of biological process optimization and pre-treatment on the total bio-methane yield and energy performance. *Biotechnology Advances*, 34: 1289–1304. DOI: 10.1016/j.biotechadv.2016.09.004.

Curkowski A., Oniszk-Popławska A., Mroczkowski P., Zowski M., Wiśniewski G., 2011. Przewodnik dla inwestorów zainteresowanych budową biogazowni rolniczych. *Ministerstwo Gospodarki, Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa*.

- Czapiewska G., 2010. Rola biogazowni rolniczych w rozwoju energetyki odnawialnej. [W:] Brodziński Z., Karman M., Sławomirski A. (red.), *Energia odnawialna wizytówką nowoczesnej gospodarki. Wydawnictwo Adam Marszałek, Toruń*.
- ENEA Consulting, 2019. Biogas Opportunities for Australia. <<https://www.energynetworks.com.au/resources/reports/biogas-opportunities-for-australia-enea-consulting/>> (dostęp: wrzesień 2022).
- GUS, 2022. Energia ze źródeł odnawialnych w 2020 roku. <<https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/energia-ze-zrodel-odnawialnych-w-2020-roku,3,15.html>> (dostęp: wrzesień 2022).
- Holewa J., Kukulska-Zajac E., Pęgielska M., 2012. Analiza możliwości wprowadzenia biogazu do sieci przesyłowej. *Nafta-Gaz*, 68(8): 523–529.
- Igliński B., Buczkowski R., Iglińska A., Cichosz M., Piechota G., Kujawski W., 2012. Agricultural biogas plants in Poland: investment process, economical and environmental aspects, biogas potential. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(7): 890–4900. DOI: 10.1016/j.rser.2012.04.037.
- Igliński B., Piechota G., Iwański P., Skarżatek M., Pilarski G., 2020. 15 Years of the Polish agricultural biogas plants: their history, current status, biogas potential and perspectives. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 1–29. DOI: 10.1007/s10098-020-01812-3.
- International Energy Agency (IEA), 2022. Outlook for Biogas and Biomethane: Prospects for Organic Growth. *IEA Publications*. <[https://iea.blob.core.windows.net/assets/03aeb10c-c38c-4d10-bcec-de92e9ab815f/Outlook\\_for\\_biogas\\_and\\_biomethane.pdf](https://iea.blob.core.windows.net/assets/03aeb10c-c38c-4d10-bcec-de92e9ab815f/Outlook_for_biogas_and_biomethane.pdf)> (dostęp: wrzesień 2022).
- Jędrzak A., 2008. Biologiczne przetwarzanie odpadów. *Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa*.
- Kemausuor F., Adaramola M.S., Morken J., 2018. A review of commercial biogas systems and lessons for Africa. *Energies*, 11: 1–21. DOI: 10.3390/en11112984.
- Krawiec F. (red.), 2010. Odnawialne źródła energii w świetle globalnego kryzysu energetycznego. Wybrane problemy. *Wydawnictwo Difin S.A., Warszawa*.
- Kujawski O., 2009. Przegląd technologii produkcji biogazu. Cz. I. *Czysta Energia*, 12: 23–25.
- Nicolae S., Jean-Francois D., Fernando F., 2018. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129: 457–472. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.006.
- Niedziółka D., 2010. Rynek energii w Polsce. *Wydawnictwo Difin S.A., Warszawa*.
- Nzila Ch., Dewulf J., Spanjers H., Tuigong D., Kiriamiti H., van Langenhove H., 2012. Multi criteria sustainability assessment of biogas production in Kenya. *Applied Energy*, 93: 496–506. DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.12.020.
- Observ'ER, 2020. Biogas Barometer 2020. <<https://www.eurobserv-er.org/biogas-barometer-2020/>> (dostęp: wrzesień 2022).
- Olineira J.V., Alves M.M., Costa J.C., 2018. Biochemical methane potential of brewery by-products. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 20: 435–440. DOI: 10.1007/s10098-017-1482-2.
- Osorio F., Torres J.C., 2009. Biogas purification from anaerobic digestion in a wastewater treatment plant for biofuel production. *Renewable Energy*, 34: 2164–2171. DOI: 10.1016/j.renene.2009.02.023.
- Pavičić J., Novak Mavar K., Brkić V., Simon K., 2022. Biogas and Biomethane Production and Usage: Technology Development, Advantages and Challenges in Europe. *Energies*, 15(8): 2940. DOI: 10.3390/en15082940.
- Pilarska A., Pilarski K., 2013. Perspektywy i problemy rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce. *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna*, 4: 1–4.
- Piskowska-Wasiak J., 2014. Uzdatnianie biogazu do parametrów gazu wysokometanowego. *Nafta-Gaz*, 70(2): 94–105.
- Roopnarain A., Adeleke R., 2017. Current status, hurdles and future prospects of biogas digestion technology in Africa. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 67: 1162–1179. DOI: 10.1016/j.rser.2016.09.087.
- Saadabadi S.A., Thattai A.T., Fan L., Lindeboom R.E., Spanjers H., Aravind P., 2019. Solid Oxide Fuel Cells fuelled with biogas: Potential and constraints. *Renewable Energy*, 134: 194–214. DOI: 10.1016/j.renene.2018.11.028.
- Saudi dove in the oil slick, 2001. *The Guardian*, 14.01. <<https://www.theguardian.com/business/2001/jan/14/globalrecession.oilandpetrol>> (dostęp: wrzesień 2022).
- Scarlat N., Dallemand J.F., Fahl F., 2018. Biogas: Developments and perspectives in Europe. *Renewable Energy*, 129: 457–472. DOI: 10.1016/j.renene.2018.03.006.
- Szymańska D., Lewandowska A., 2015. Biogas power plants in Poland – structure, capacity, and special distribution. *Sustainability*, 7(12): 16801–16819. DOI: 10.3390/su71215846.
- Wiese J., Kujawski O., 2006. Biogaz zyskuje na znaczeniu. *Czysta Energia*, 10: 1–4.



Mgr inż. Artur ANTOSZ  
Starszy specjalista badawczo-techniczny  
w Zakładzie Olejów, Środków Smarowych i Asfaltów  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków  
E-mail: [artur.antosz@inig.pl](mailto:artur.antosz@inig.pl)



Dr inż. Stefan PTAK  
Kierownik Zakładu Olejów, Środków Smarowych  
i Asfaltów  
Instytut Nafty i Gazu – Państwowy Instytut Badawczy  
ul. Lubicz 25 A, 31-503 Kraków  
E-mail: [stefan.ptak@inig.pl](mailto:stefan.ptak@inig.pl)