

# Analiza porównawcza różnych technologii oczyszczania biogazu

## Comparative analysis of different biogas treatment technologies

Adam Kamiński\*

**Słowa kluczowe:** biogaz, biometan, metody uzdatniania, kontenerowe stacje uzdatniania.

### Streszczenie

W pracy przedstawiono problematykę związaną z produkcją oraz wykorzystaniem biogazu, a także uzdatnianiem jego do biometanu. Przeprowadzono szczegółową charakterystykę i porównanie różnych metod oczyszczania biogazu, w celu racjonalnego wyboru. Wykazano, że każda z wymienionych metod może przyczynić się do uzdatnienia biogazu na tyle, aby osiągnął parametry porównywalne do gazu ziemnego, co stwarza nowe perspektywy dla jego sze-rokiego wykorzystania jako paliwa. Należy jednak zauważyć, że proces uzdatniania biogazu niesie za sobą wysokie koszty. W ramach pracy przeprowadzono także analizę techniczno-ekonomiczną instalacji opartej na separacji membranowej, korzystając z danych udostępni-onych przez firmę go&biogas Sp. z o.o.

**Keywords:** biogas, biomethane, treatment methods, container treatment stations

### Abstract

Very high costs of constructions of large nuclear reactors and long terms of their construction diminished overall interest in this area. In response, a new strategy was introduced by nuclear reactors manufactures aimed at building smaller reactors, (small modular reactors – SMRs) which were expected to be faster to fabricate, safer to operate, and operate at lower cost per reactor. Many SMRs designs rely on a modular system, allowing customers to simply add modules to achieve a desired megawatt output (MWe). SMRs could potentially achieve safety advantages compared to large power plants and aim for a higher safety level especially through simplifications of design and development of active and passive safety systems. Especially passive safety systems will be dominated in SMRs. In article are also quoted world norms connected with safety of nuclear power plants.

## Wstęp

Biogaz stanowi obiecującą alternatywę energetyczną dla tradycyjnych paliw gazowych. Wzrost produkcji biogazu w Polsce może mieć znaczący wpływ na bezpieczeństwo energetyczne kraju. Obecnie w Polsce produkcja biogazu stanowi nieco ponad 4% szacowanego potencjału. Wyprodukowany biogaz przetwarzany jest na energię elektryczną oraz ciepłą w skojarzeniu. Jednym ze sposobów zwiększania zainteresowania biogazem jest możliwość oczyszczania go do biometanu, co stwarza możliwość wtłaczania otrzymanego produktu do sieci gazowych lub wykorzystania go jako paliwo w transporcie.

Produkcja biogazu zapewnia korzyści środowiskowe oraz społeczno-ekonomiczne. Przedsiębiorstwa oraz gospodarstwa rolne zajmujące się produkcją ekologicznego gazu, zapewniają nowe miejsca pracy oraz ułatwiają zagospodarowanie odpadów biodegradowalnych, powstających na terenach należących do gminy. Biogazownie rolnicze poprzez wykorzystanie do fermentacji metanowej obornika, gnojowicy lub gnojówki, ograniczają emisję uciążliwych zapachów, związanych ze stosowaniem tych nawozów naturalnych na polach.

## 1. Wiadomości ogólne

### 1.1. Definicja biogazu i rodzaje biogazowni

Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii określa biogaz, jako gaz uzyskany z biomasy, zwłaszcza z instalacji przeróbki odpadów zwierzęcych lub roślinnych, oczyszczalni ścieków oraz składowisk odpadów.

Biogaz jest to mieszanina gazów, w której dominuje metan (średnio 60% objętości) i dwutlenek węgla, zawarte są także niewielkie ilości azotu, siarkowodoru, pary wodnej, siloksanów i innych gazów.

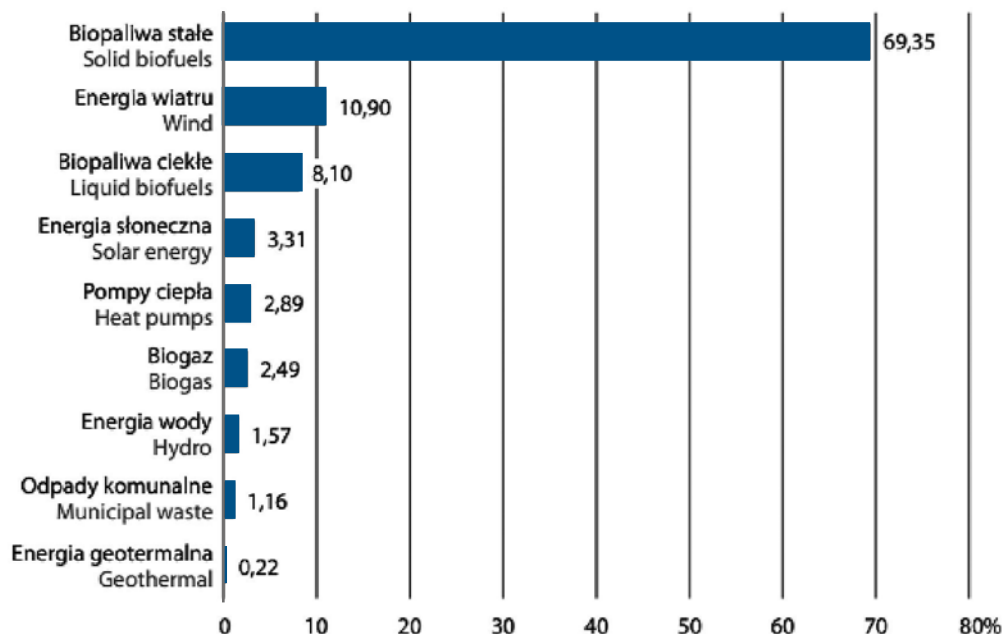
W produkcji biogazu wyróżniamy trzy typy instalacji [6]:

- biogazownie rolnicze, źródłami biomasy są uprawy energetyczne, pozostałości z produkcji roślinnej, odchody zwierzęce,
- w komorach fermentacyjnych osadów ściekowych w oczyszczalniach ścieków komunalnych,
- w instalacjach odgazowania składowisk odpadów komunalnych.

### 1.2. Znaczenie biogazu w kontekście energii odnawialnej

Projekt Unii Europejskiej, o nazwie Europejski Zielony Ład, zakłada zwiększenie produkcji i zużycia biogazu. Pozwoli to na zmniejszenie zużycia węgla i innych szkodliwych dla środowiska źródeł ciepła i energii elektrycznej. W wyniku konfliktu zbrojnego na Ukrainie zostały przerwane dostawy paliw kopalnych. W odpowiedzi na to, unijny system energetyczny ma na celu przekształcenie się w rekordowym tempie. W ciągu ośmiu lat planowane jest wybudowanie 1000 dużych biogazowni. W przekształceniu gospodarki dla bardziej przyjaznej dla środowiska ma sprzyjać budowa mikrobiogazowni. Firma GlobanHydrogen planuje w najbliższym czasie wprowadzić na rynek modułowe mikrobiogazownie o mocy do 5 kW, z przeznaczeniem dla małych i średnich gospodarstw rolnych. Produkcja energii elektrycznej oraz ciepłej ze spalania biogazu jest stabilna, niezależna od pogody i dostępna

\* Adam Kamiński, inż., Państwowa Akademia Nauk Stosowanych im. I. Mościckiego w Ciechanowie



Rys. 1. Struktura pozyskania energii ze źródeł odnawialnych wg nośników w Polsce w 2021 r. Źródło: GUS, Energia ze źródeł odnawialnych w 2021, Analizy statystyczne, Warszawa 2022.

Fig. 1. Structure of renewable energy generation by carrier in Poland in 2021

przez całą dobę. Przykładem biogazowni, produkującej ciepło dla sąsiadujących mieszkańców, jest doświadczalna bioga-zownia Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, zlokalizowana we wsi Przybroda w województwie Wielkopolskim. Inwestycja ta powstała w 2019 r., ma 58 odbiorców ciepła i wytwarza energię odpowiadającą spalaniu 800 ton węgla. Innowacją zastosowaną w tej bioga-zowni jest akcelerator biotechnologiczny (hydrolizer), który umożliwia przyspieszenie wstępnego procesu fermentacji substratów.

Z danych Głównego Urzędu Statystycznego (GUS) przedstawionych na rys. 1 wynika, że w strukturze pozyskanej energii ze źródeł odnawialnych, według nośników w 2021 r. zużycie biogazu wyniosło zaledwie 2,49%, natomiast, dominującą pozycję zajmowały biopaliwa stałe z udziałem 69,35%.

Rolnictwo w Polsce i w wielu krajach europejskich, mimo dużego potencjału produkcyjnego w produkcji energii odnawialnej, odgrywa stosunkowo niewielką rolę. Biogazownie rolnicze mogą zwiększyć swój udział w energetyce odnawialnej. Zaletą produkcji biogazu rolniczego jest także redukcja emisji metanu, powstającego w trakcie przechowywania nawozów naturalnych [28].

W Polsce w 2020 r. biogazownie rolnicze wyprodukowały około 325·106 m<sup>3</sup> biogazu, z którego wytworzono 689 GWh energii elektrycznej. Uzyskana energia elektryczna pokryła niespełna 0,4% krajowego zapotrzebowania. Do tej pory wytworzony w Polsce biogaz przekształcany był na energię elektryczną oraz ciepłą. Jednak w ostatnim czasie zaobserwowano wzmożone zainteresowanie alternatywnymi sposobami wykorzystania tego surowca, takimi jak paliwo gazowe, tj. BioCNG, BioLNG, lub jako biokomponent do produkcji biowodoru. Mimo ambitnych planów rozwojowych sprzed kilkunastu lat, branża biogazu pochodzenia rolniczego praktycznie wyhamowała. Głównie z powodu silnego uzależnienia od wsparcia finansowego z sektora publicznego. Biogaz ma wiele zalet istotnych z punktu widzenia Europejskiego Zielonego Ładu i to powinno przyspieszyć rozwój tej branży. Wprowadzenie uproszczeń formalnych oraz przedłużenie okresu wsparcia finansowego, może przyczynić się do tworzenia nowych instalacji [9].

### 1.3. Proces produkcji biogazu z biomasy

Proces fermentacji metanowej składa się z czterech faz. Pierwszą fazę stanowi hydroliza, która polega na rozkładzie złożonych związków organicznych do prostych związków organicznych, przy udziale wody i enzymów. Faza druga to acidogeneza, produkty hydrolizy ulegają dalszemu rozkładowi do lotnych kwasów tłuszczowych i etanolu. Na tym etapie powstający gaz zawiera ok. 80% dwutlenku węgla i 20% wodoru. W kolejnym etapie następuje dalszy rozpad lotnych kwasów tłuszczowych do kwasu octowego oraz dwutlenku węgla i wodoru. W ostatniej fazie zwanej metanogenezą zachodzi synteza metanu z powstałych związków. Wszystkie wymienione fazy zachodzą w komorze fermentacyjnej, przy udziale różnych grup mikroorganizmów [33].

Skład chemiczny biogazu zależy od zastosowanych substratów i przeprowadzonego procesu fermentacyjnego. Znaczący wpływ na proces fermentacji metanowej ma rodzaj zastosowanych mikroorganizmów, temperatura, odczyn pH, oraz wilgotność. Istotna jest ilość komór fermentacyjnych, a także w jaki sposób do komór dostarczane są substraty. Skład chemiczny biogazu, w zależności od źródła pochodzenia, został przedstawiony w tab. 1. [14]

Ilość i jakość biogazu zależy od rodzaju substratów i warunków przebiegu procesu w bioreaktorze. Najlepszym rozwiązaniem jest, gdy substrat znajduje się w fazie płynnej o zawartości nieprzekra-

Tabela 1. Skład chemiczny biogazu w zależności od źródła pochodzenia  
Table 1. Chemical composition of biogas depending on its source

Składnik	Jednostka	Odpady z gospodarstw domowych	Osad z oczyszczalni ścieków	Odpady rolniczych	Odpady z przemysłu rolnospożywczego
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	3000–10 000	100
NH <sub>3</sub>		-	-	50–100	400
Związki aromatyczne		0–200	-	-	-
Związki chlorowco-organiczne lub fluoroorganiczne		100–800	-	-	-

Źródło: J. Kwaśny, W. Balcerzak, P. Rezka, Biogaz i charakterystyka wybranych metod jego odsiarczania. Czasopismo Inżynierii Łądowej, Środowiska i Architektury, 63(2), 2016, s. 129-141.

czającej 12-15% suchej masy. Stwarza to możliwość zastosowania pomp do skutecznego dostarczania wsadu do komory fermentacyjnej oraz odprowadzania pofermentu. W trakcie fermentacji przygotowane substraty powinny generować maksymalną ilość metanu, również istotnym wymogiem stawianym substratom fermentacji jest występowanie w nich pierwiastków oraz substancji odżywczych, niezbędnych do funkcjonowania mikroorganizmów. Do takich pierwiastków zaliczamy: żelazo, nikiel, kobalt, selen, molibden i wolfram. Cukry proste oraz skrobia ulegają najszybszej fermentacji tworząc biogaz, w którym stosunek metanu i dwutlenku węgla wynosi 1:1. Wolniej fermentuje celuloza, następnie białka i związki tłuszczowe. Najwyższą zawartość metanu w biogazie zapewniają białka [31].

Stabilność procesu fermentacji metanowej w dużej mierze zależy od stosunku węgla do azotu (C/N) w zastosowanym podłożu. W przypadku nadmiernej zawartości węgla do azotu następuje zablokowanie całkowitej przemiany węgla, co skutkuje niską zawartością metanu. Natomiast, gdy nastąpi przewaga azotu, wytwarza się amoniak, powodujący wzrost zasadowości wsadu. W środowisku zbyt zasadowym (powyżej 8,5 pH) bakterie metanogenne przestają się rozwijać.

Optymalny odczyn pH dla procesu fermentacji metanowej mieści się w przedziale 6,7-7,5 i zależy od fazy procesu [15].

Do prawidłowego przebiegu procesu fermentacji metanowej stosunek węgla do azotu powinien znajdować się w przedziale od 10/1 do 40/1, natomiast optymalny stosunek węgla, azotu, fosforu i siarki powinien wynosić 600:15:5:1 [10].

Bakterie biorące udział w procesie konwersji biomasy w bioreaktorach możemy podzielić na trzy grupy: psychrofilowe, mezofilowe i termofilowe. Mikroorganizmy psychrofilowe do prawidłowego rozwoju potrzebują temperatury wynoszącej około 25°C. W takich warunkach bytowania bakterii nie jest konieczne podgrzewanie podłoża fermentacyjnego, aczkolwiek efektywność produkcji gazu jest obniżona. W następnej grupie bakterii, optymalna temperatura wzrostu i rozwoju wynosi między 32 a 42°C. W tym zakresie temperatur instalacje biogazowe są najbardziej rozpowszechnione, ponieważ w środowisku mezofilnym osiągamy stabilność procesu i duży uzysk biogazu. Do trzeciej grupy zaliczamy bakterie termofilne. Optymalna temperatura środowiska dla ich prawidłowego rozwoju wynosi od 50 do 57°C. Dla utworzenia wysokich warunków cieplnych w bioreaktorze, konieczne jest dostarczenie dodatkowej energii z zewnątrz oraz poprawa izolacyjności termicznej instalacji. Proces fermentacji metanowej, w tym zakresie temperatur, cechuje się większą wrażliwością na zakłócenia [31].

Proces produkcji biogazu może zostać zakłócony lub zahamowany z różnych powodów. Jednym z nich jest występowanie substancji szkodliwych (inhibitorów) w substratach i mieszaninach biogazowych. Do grupy substancji, powodujących nieprawidłową pracę biogazowni, zaliczamy: amoniak, metale ciężkie (miedź, cynk, ołów, rtęć, chrom, kadm, żelazo, nikiel, kobalt, molibden), jony metali lekkich (sód, potas, magnez, wapń), związki organiczne, a także związki lignocelulozowe. Substraty pochodzenia komunalnego są najczęściej źródłem metali ciężkich. Aby proces biochemiczny w bioreaktorach przebiegał prawidłowo należy wyeliminować inhibitory, które trafiają wraz z substratami do komory fermentacyjnej. Obecnie opracowywane są metody przystosowania bakterii do obecności związków hamujących rozwój oraz sposoby usuwania i przeciwdziałania powstaniu szkodliwych substancji [19].

## 1.4. Biometan w Polsce

### 1.4.1. Definicja biometanu oraz jego rozwój w Polsce

Biometan jest to biogaz pochodzący z fermentacji metanowej poddany uszlachetnieniu, dzięki czemu zyskuje podobne parametry kalometryczne jak gaz ziemny. Umożliwia to wtłaczanie biometanu do sieci gazowych lub zastosowanie go jako paliwo do silników samochodowych [20].

Polskie prawo określa biometan, jako biogaz, o cieple spalania w warunkach normalnych nie mniejszym niż 34 MJ/Nm<sup>3</sup>. Odpowiada to około 85% zawartości metanu w biogazie. Wtłaczanie biometanu do sieci dystrybucyjnej wymaga sprężania go do około 0,5 MPa, natomiast do sieci przesyłowej należy go sprężyć nawet do 8,4 MPa. W przypadku wykorzystania go jako BioCNG, sprężyć należy biometan do ciśnienia 20-25 MPa. Ostatnim sposobem przetworzenia biometanu jest jego skraplanie, wówczas przybiera nazwę BioLNG [21].

Produkcja biometanu w Polsce odbywa się wyłącznie w ośrodkach pilotażowo-badawczych. Planowane jest realizacja 20 projektów biometanowych, niektóre z nich są w trakcie budowy. Mechanizmy wspierania finansowego oraz uwarunkowania rynkowe sprzyjają rozwojowi biogazowni, opartych na produkcji energii elektrycznej i ciepła skojarzonego [12].

Potencjał produkcji biometanu w Polsce został określony na poziomie 8 mld Nm<sup>3</sup> w ciągu roku. Źródłem biogazu do uzdatniania mają zostać biogazownie rolnicze, instalacje przy oczyszczalni ścieków oraz składowiskach odpadów. Koncerny paliwowe wykazują duże zainteresowanie biometanem. Polski Koncern Naftowy Orlen w 2022 r. rozpoczął inwestycję w miejscowości Głębowo w województwie warmińsko-mazurskim. Przedsięwzięcie ma polegać na wykupie funkcjonującej biogazowni i rozbudowie jej w kierunku biometanowni o mocy ok. 4,6 MW. Uszlachetniony biogaz zostanie przekształcony w BioLNG i ma trafić do odbiorców cysternami. Ze względu na wysokie koszty oczyszczania biogazu, Prezes Polskiej Organizacji Biometanu ocenia, że opłacalność produkcji biometanu istnieje w instalacjach – powyżej 3-5 MW. Mniejsze biogazownie wybiorą kogenerację dla większego zysku.

Istotne znaczenie w rozwoju sektora biogazowego ma edukacja społeczeństwa w zakresie produkcji biogazu. Społeczeństwo, na przykładzie funkcjonujących instalacji, powinno przekonać się, że biogazownie nie oddziałują tak negatywnie na otoczenie jak o tym można usłyszeć w opinii publicznej, a jednocześnie przynoszą korzyści np. w postaci taniego ciepła systemowego [16].

### 1.4.2. Prawne warunki projektu biometanowego

Uruchomienie instalacji biometanowej wymaga spełnienia wielu warunków. Pierwszym etapem inwestycji biometanowej jest znalezienie odpowiedniej lokalizacji pod kątem dostępności działki do dróg publicznych oraz systemu infrastruktury technicznej, z możliwością przyłączenia do sieci gazowej lub elektroenergetycznej. Planowana inwestycja powinna spełniać uwarunkowania środowiskowe nieruchomości gruntowej. W przypadku istnienia planu zagospodarowania przestrzennego należy pamiętać, żeby grunty przeznaczone pod budowę instalacji biometanowej były sklasyfikowane jako przemysłowe, a nie rolnicze. W sytuacji gdy na terenie planowanej inwestycji nie występuje taki plan, wówczas obowiązuje indywidualna decyzja o warunkach zabudowy, określająca dopuszczalną zabudowę i przeznaczenie danej nieruchomości. Kiedy już mamy wybraną lokalizację możemy przejść do uzyskania odpowiednich aktów administracyjnych na rozpoczęcie legalnej budowy. W przypadku instalacji większej niż 500 kW, na inwestorze spoczywa obowiązek przeprowadzenia raportu oceny oddziaływania na środowisko. Ten dokument jest niezbędny do uzyskania tzw., decyzji środowiskowej. Kwestie dotyczące raportu oddziaływania na środowisko reguluje *Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 września 2019r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko*.

Decyzję o środowiskowych uwarunkowaniach przedsięwzięcia wydaje wójt, burmistrz gminy lub Regionalny Dyrektor Ochrony Środowiska. Przedstawiona dokumentacja w procesie decyzji środowiskowej, a także raport oddziaływania na środowisko, są wyłożone do wglądu lokalnemu społeczeństwu. Na tym etapie mogą pojawić się konflikty z miejscową ludnością, co może przyczynić się do wydłużenia procedury o kilka lat lub całkowicie ją zablokować [23].

Ustawa z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne (Dz. U. 1997, Nr 54, poz. 348 ze zm.) określa, że operatorzy systemu dystrybucji (OSD) mają obowiązek przyłączenia do sieci gazowej, w obszarze swojego działania, instalacji produkującej biometan. Operator sieci dystrybucyjnej określa warunki techniczne przyłączenia biometanowni do sieci gazowej, na podstawie wniosku złożonego przez producenta biometanu. Gazowy OSD nie zajmuje się zakupem biometanu, jego zadanie polega na stworzeniu warunków przyłączenia biometanowni do sieci oraz świadczenie usług dystrybucji, na podstawie zawartej umowy ze Zleceniodawcą Usługi Dystrybucji (ZUD). Jednostka ZUD zajmuje się zakupem biometanu oraz jego sprzedażą odbiorcom końcowym [5].

### 1.4.3. Parametry jakościowe biometanu wprowadzanego do sieci gazowej

Przygotowując się do wprowadzenia biometanu do sieci gazowej, należy zadbać o jego parametry fizykochemiczne zgodne z określonymi przepisami. W tab. 2 zostały przedstawione parametry jakościowe dla biogazu z instalacji rolniczych na podstawie Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 24 sierpnia 2011 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku po-*twierdzania danych dotyczących wytwarzanego biogazu rolniczego wprowadzonego do sieci dystrybucyjnej gazowej*. Z przedstawionych parametrów jakościowych wynika, że dopuszczalne wartości parametrów, takich jak zawartość siarkowodoru, siarki bądź par rtęci, temperatura punktu rosy, są stałe dla każdej grupy gazu. Zmienne natomiast są wartości ciepła spalania oraz liczby Wobbego. Wprowadzenie biogazu do sieci wymaga oczyszczenia go do parametrów gazu wysokometanowego (grupa E) lub podgrupy gazów zaazotowanych (Lm, Ln, Ls, Lw) [20].

Wprowadzając biogaz rolniczy do sieci dystrybucyjnej należy spełnić wymagania jakościowe gazu obecnie transportowanego. W Polsce większość sieci dystrybucyjnych funkcjonują na gazie wysokometanowym. Z kolei gaz zaazotowany występuje w sieciach lokalnych.

## 2. Metody oczyszczania biogazu do biometanu

### 2.1. Oczyszczanie biogazu

Uzyskany biogaz, bezpośrednio po procesie fermentacji metanowej, w swoim składzie zawiera wiele substancji uniemożliwiających jego wykorzystanie. W zależności od sposobu jego przeznaczenia należy go poddać procesowi uzdatniania, polegającemu na usunięciu pary wodnej, siarkowodoru, dwutlenku węgla i siloksanów [31].

W procesie uzdatniania biogazu możemy założyć trzystopniową skalę oczyszczania biogazu. Pierwszy stopień polega na wyeliminowaniu pary wodnej oraz siarkowodoru do poziomu poniżej 1000 ppm, co jest wystarczające np. do spalania w silnikach kogeneracyjnych. Drugi stopień oczyszczania charakteryzuje się usunięciem dwutlenku węgla poniżej 5% objętości. Natomiast w trzecim stopniu usuwane są zanieczyszczenia do poziomu zawartych w normach lub wymaganych parametrów jakościowych, umożliwiających np. wtłoczenie do sieci dystrybucyjnej gazu.

### 2.2. Charakterystyka wybranych metod odsiarczania biogazu

Siarkowódor jest powszechnie występującym składnikiem biogazu, wpływa korozyjnie na instalacje biogazowe i kogeneracyjne. W wyniku spalania biogazu, zawierającego siarkowódor, powstają tlenki siarki, które dostając się do atmosfery ze spalinami stanowią potencjalne zagrożenie dla środowiska.

Do uzdatniania biogazu ze związków siarki mamy wiele dostępnych metod, opartych na procesach biologicznych, chemicznych i fizykalnych [31].

#### 2.2.1. Odsiarczanie biologiczne

Proces odsiarczania biologicznego może zostać przeprowadzony w bioreaktorze, przy obecności tlenu i mikroorganizmów Sulfobacteroxydans. Bakterie te są wszechobecne i niewymagane jest zaszczepianie nimi wsadu w fermentatorze. Potrzebny tlen dostarczony może zostać za pomocą kompresora. W obecności tlenu bakterie przemieniają siarkowódor w proste związki siarki. Istnieje możliwość przeprowadzania odsiarczania metodą biologiczną w oddzielnych pojemnikach. Dzięki tej technologii, proces odsiarczania jest bardziej precyzyjny i przewidywalny [26].

#### 2.2.2. Odsiarczanie chemiczne

Chemiczne metody odsiarczania biogazu, podobnie jak biologiczne, można przeprowadzić w fermentatorze oraz poza nim w specjalnie przygotowanych zbiornikach. W bioreaktorze metoda chemiczna opiera się na dodawaniu do podłoża substancji chemicznych, takich jak sole żelaza oraz ruda darniowa. Substancje te wiążą siarkę, uniemożliwiając produkcję siarkowodoru. Natomiast oczyszczanie poza bioreaktorem przeprowadza się przy użyciu ługu sodowego lub wodorotlenku sodu. Proces odsiarczania poza fermentatorem zapewnia wysoki stopień oczyszczenia biogazu, nawet powyżej 95%. Ponadto metody chemiczne nie niosą zagrożenia utleniania metanu, jak ma to miejsce w przypadku metod biologicznych [31].

### 2.3. Usuwanie dwutlenku węgla z biogazu

Technologia usuwania dwutlenku węgla z biogazu jest bardzo kosztowna, a proces uzdatniania wieloetapowy. Usunięcie dwutlenku węgla zwiększa liczbę Wobbego, co zwiększa możliwość wykorzystania powstałego gazu, jednakże z technicznego punktu widzenia istnieje możliwość spalania w silnikach biogazu bez oczyszczania. Proces uszlachetniania biogazu prowadzi do utraty pewnej ilości metanu. W związku z tym należy dobrać taką technologię, aby proces

Tabela 2. Parametry jakościowe biogazu rolniczego wprowadzonego do dystrybucyjnej sieci gazowej

Table 2. Quality parameters of agricultural biogas injected into the distribution gas network

Wielkość charakteryzująca jakość gazu	Jednostka	Wymagane wartości					grupa E
		podgrupa					
		Lm	Ln	Ls	Lw		
Liczba Wobbego	MJ/m <sup>3</sup>	23,0+27,0	27,0+32,5	32,5+37,5	37,5+45,0	45,0+54,0	
Ciepło spalania nie mniejsze niż	MJ/m <sup>3</sup>	18,0	22,0	26,0	30,0	34,0	
Zawartość siarkowodoru nie większa niż	mg/m <sup>3</sup>	7	7	7	7	7	
Zawartość siarki merkaptanowej nie większa niż	mg/m <sup>3</sup>	16	16	16	16	16	
Zawartość siarki całkowitej większa niż	mg/m <sup>3</sup>	40	40	40	40	40	
Zawartość par rtęci nie większa niż	µg/m <sup>3</sup>	30	30	30	30	30	
Temperatura punktu rosy wody przy ciśnieniu 5,5 MPa: – od 1.04 do 30.09 – od 1.10 do 31.03	°C	≤+3,7 ≤-5,0	≤+3,7 ≤-5,0	≤+3,7 ≤-5,0	≤+3,7 ≤-5,0	≤+3,7 ≤-5,0	

Źródło: J.Piskowska-Wasiak. Uzdatnianie biogazu do parametrów gazu wysokometanowego. Nafta-Gaz, 2(70), Kraków 2014, s. 94-105.

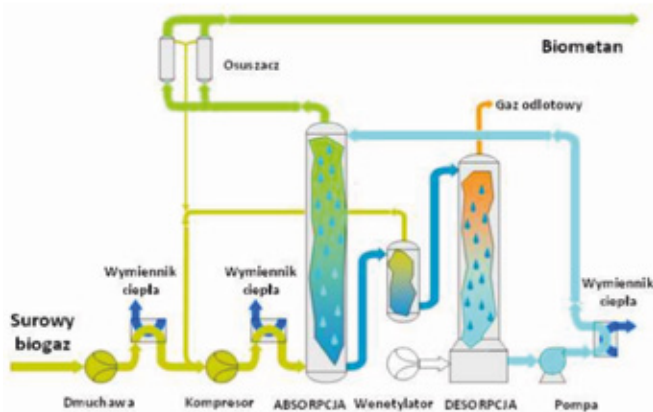


przeprowadzany był ekonomiczny oraz ekologiczny. Metan jest aż 21-krotnie bardziej szkodliwym gazem cieplarnianym niż dwutlenek węgla.

Technologie oraz procesy uzdatniania biogazu są na etapie doskonałości. Obecnie można wyodrębnić siedem metod uszlachetniania biogazu. Zaliczamy do nich: fizyczną i chemiczną absorpcję, ciśnieniową adsorpcję, membranową separację, kriogeniczną separację, biologiczną konwersję, a także rzadko spotykaną metodę *in situ* [22].

### 2.3.1. Fizyczna absorpcja

W technologii wykorzystywana jest różnica rozpuszczalności w wodzie między dwutlenkiem węgla a metanem. Technologia wodna należy do najczęściej stosowanych. Charakteryzuje się niskim kosztem inwestycyjnym, niewymagane jest dostarczanie do procesu chemikaliów oraz ciepła. Dodatkowo technologia zakłada odzysk ciepła oraz minimalizację użycia wody.



Rys. 2. Płuczka wodna

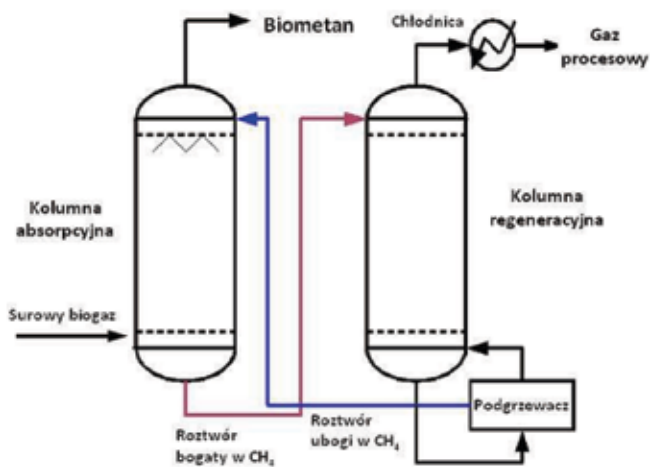
Fig. 2. Water scrubber

Źródło: P. Mroczkowski, M. Seiffert. Oczyszczanie i zatłaczanie biogazu na przykładzie Niemiec. Możliwość wdrożenia technologii w Polsce. 2011.

Uproszczony schemat technologii płuczki wodnej został przedstawiony na rys 2. Proces uzdatniania rozpoczyna się sprężaniem biogazu do około 10 barów i dostarczeniem go do kolumny absorpcyjnej, która wypełniona jest materiałem stałym, aby zwiększyć powierzchnię wymiany masy. W kolumnie absorpcyjnej strumień wody rozpylany jest od góry i spływa w dół. Natomiast sprężony biogaz wpuszczany jest od dołu i przepływa przeciwnie do wody. Biometan uwalniany jest w górnej części kolumny absorpcyjnej, podczas gdy woda zawierająca dwutlenek węgla oraz siarkowodor kierowana jest do płuczki, w której obniżane jest ciśnienie. Na tym etapie odzyskiwany jest metan, który uległ rozpuszczeniu w wodzie. W kolejnej części procesu woda zawierająca dwutlenek węgla oraz siarkowodor transportowana jest do kolumny desorpcyjnej. W niej następuje regeneracja wody płuczacej, a powstałe gazy odpędzane są za pomocą powietrza. W ostatnim etapie procesu powstały gaz poddawany jest osuszeniu. W technologii fizycznej absorpcji przy wykorzystaniu wody, możemy uzyskać biometan o zawartości 98% metanu, a straty metanu mogą wynieść od 1 do 2%.

### 2.3.2. Chemiczna absorpcja

Technologia opiera się na absorpcji dwutlenku węgla za pomocą płuczki aminowej. W większości użytkowanych instalacjach stosowana jest monoetyloamina. Chemiczne roztwory zawierające aminy charakteryzują się wysoką absorpcyjnością do usuwania dwutlenku węgla, jednakże etap regeneracji jest dużym utrudnieniem. Do procesu regeneracji potrzebne jest doprowadzenie wysokotemperaturowego ciepła (około 160°C). Otrzymywany biometan może zawierać nawet 99,4% metanu, a straty metanu mogą wynieść poniżej 0,1%.



Rys. 3. Płuczka aminowa

Fig 3: Amine scrubber

Źródło: P. Mroczkowski, M. Seiffert. Oczyszczanie i zatłaczanie biogazu na przykładzie Niemiec. Możliwość wdrożenia technologii w Polsce. 2011.

Na rys. 3 przedstawiono przykład metody chemicznej absorpcji, opartej na technologii płuczki aminowej. Technologia ta polega na wprowadzeniu biogazu od dołu kolumny absorpcyjnej do przeciwnieprądowego strumienia roztworu aminowego. Proces wychwytywania dwutlenku węgla odbywa się w niskich temperaturach (-40 do -50°C). Natomiast proces regeneracji w wysokich temperaturach. Ponowne wykorzystanie roztworu rozpuszczalnika wymaga schłodzenia go do temperatur w przedziale -40 do -50°C.

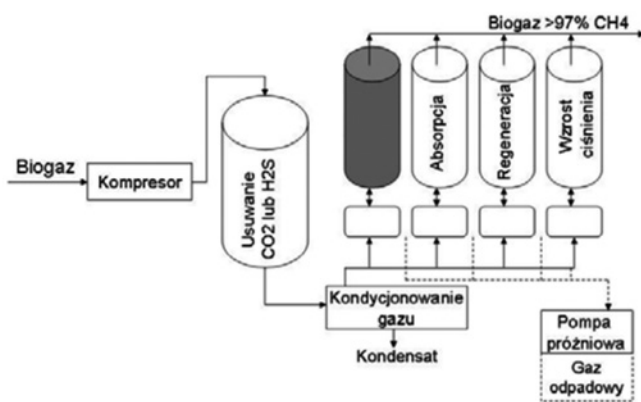
W procesie absorpcji chemicznej straty metanu są poniżej 0,1%. Przed rozpoczęciem procesu absorpcji w płuczce aminowej wskazane jest usunięcie siarkowodoru. Rozpuszczalnik zaabsorbowany siarkowodorem w procesie regeneracji będzie wymagał jeszcze wyższych temperatur [13].

### 2.3.3. Adsorpcja zmiennociśnieniowa

Technologia oczyszczania biogazu, wykorzystująca metodę adsorpcji zmiennociśnieniowej PSA (Pressure Swing Adsorption), oparta jest na szybkich zmianach ciśnienia, dzięki czemu możliwa jest adsorpcja dwutlenku węgla przez węgiel aktywny zawarty w kolumnach adsorpcyjnych. Technologia wymaga, aby biogaz został wcześniej oczyszczony metodą biologiczną z siarkowodoru oraz osuszony.

Na rys. 4 przedstawiono schemat zachodzących procesów w metodzie PSA. Pierwszym działaniem oczyszczania metodą PSA jest sprężanie surowego biogazu do ciśnienia 10 barów. Następnie sprężony biogaz trafia do reaktora. W komorze tej dwutlenek węgla sorbowany jest w złożu do stanu nasycenia. Po osiągnięciu tego stanu kolumna zostaje zamknięta, a surowy biogaz zostaje doprowadzony do wolnej komory. W zamkniętej kolumnie należy obniżyć ciśnienie do około 3 barów, przez połączenie z wolną kolumną. W wyniku tego działania uzyskujemy mieszaninę gazu o zawartości metanu i dwutlenku węgla, która zostaje przeznaczona do ponownego oczyszczania. Do przeprowadzenia regeneracji złoża, ciśnienie w reaktorze należy podnieść do 0,1 bara. Umożliwia to uwolnienie dwutlenku węgla ze złoża, a gaz odpadowy uwalniany jest do środowiska. Przygotowanie kolumny do następnego procesu uszlachetniania biogazu, odbywa się na zasadzie wyrównania ciśnienia przy połączeniu z inną kolumną.

W zależności od parametrów jakościowych gazu, jakie mają być osiągnięte, proces oczyszczania może być powtarzany. Zastosowanie metody adsorpcji zmiennociśnieniowej umożliwia uzyskanie biometanu o stężeniu 97% metanu, a straty metanu mogą wynieść od 2 do 4%.



Rys. 4. Schemat technologii PSA  
Fig. 4. Diagram of PSA technology

Źródło: K. Biernat, I. Samson-Bręk. Przegląd technologii oczyszczania biogazu do jakości gazu ziemnego. Chemik, tom 65, nr 5, Warszawa 2011.

### 2.3.4. Separacja membranowa

Techniki membranowe uzdatniania biogazu umożliwiają separację głównie dwutlenku węgla oraz siarkowodoru. Technologia ta jest wciąż nowa ale z potencjałem. Prowadzone badania nad procesem separacji membranowej mogą zwiększyć skuteczność oraz zmniejszyć koszty uszlachetniania biogazu.

Oczyszczanie prowadzone jest na filtrach, wykonanych z polimerów i kopolimerów w postaci płaskiej folii lub wydrążonych włókien. Zadaniem filtra jest przepuszczenie jednego ze składników mieszaniny, a zatrzymanie innego, ze względu na różnicę wielkości cząsteczek. Proces ten oparty jest na różnicy potencjałów chemicznych, występujących po obu stronach membrany. Różnica energii potencjalnej może wynikać z różnic ciśnień, stężenia, temperatury oraz z potencjału elektrycznego. Cząsteczki siarkowodoru oraz dwutlenku węgla są mniejsze niż cząsteczki metanu, co umożliwia ich szybsze przeniknięcie przez membranę. Wtłaczany do instalacji biogaz rozdziela się na dwa strumienie (rys. 5). Pierwszy przechodzący przez membranę i bogaty w dwutlenek węgla, określany jest jako permeat, natomiast strumień metanu zostający

przed membraną to retentat. Aby zwiększyć wydajność oraz jakość biometanu stosuje się kilka modułów separacji membranowej, a biogaz powinien być oczyszczony z siarkowodoru.

Cechy określające membrany to przepuszczalność oraz selektywność. Ważnymi czynnikami charakteryzującymi jest również wytrzymałość mechaniczna lub odporność na szkodliwe substancje. Stosowanie modułów membranowych i precyzyjnie dobranych materiałów, zgodnie z określonymi celami, takimi jak czystość czy stopień odzysku metanu, może prowadzić do potencjalnie wyższej efektywności niż zastosowanie procesu absorpcji chemicznej na bazie monoetyloaminy do wychwytywania dwutlenku węgla.

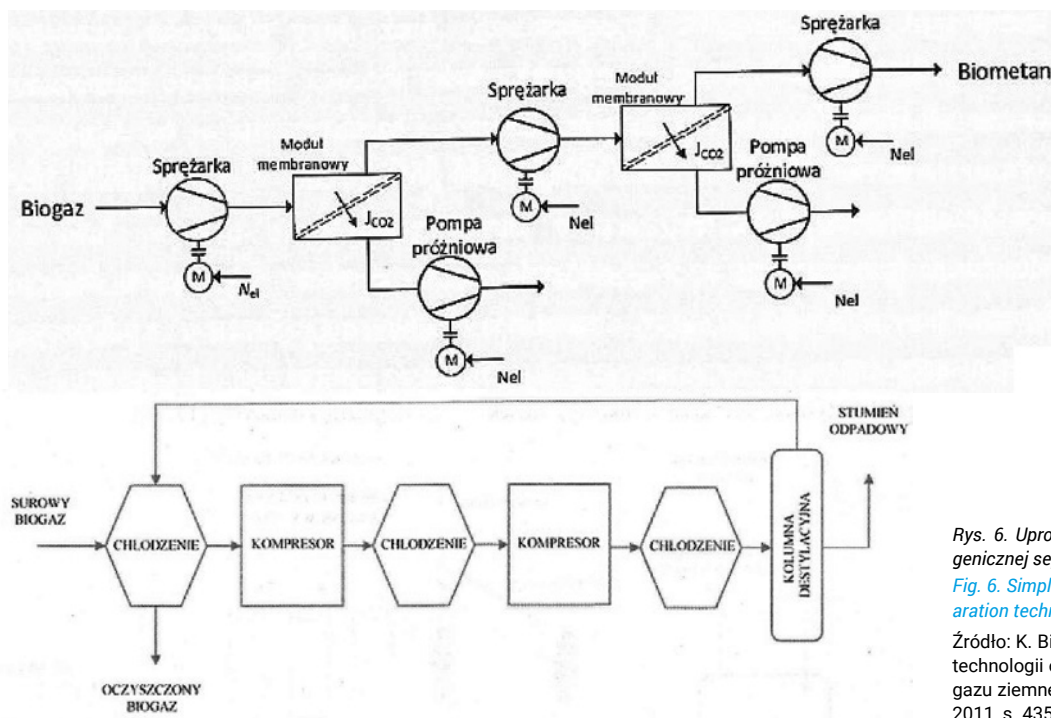
W zależności od ilości zastosowanych modułów membran, uzyskany biometan może mieć zawartość metanu w przedziale 92-98%, a straty metanu mogą wynieść 2% [31].

### 2.3.5. Separacja kriogeniczna

Uszlachetnianie biogazu metodą separacji kriogenicznej przebiega w niskich temperaturach (-160°C) oraz wysokich ciśnieniach (około 40 bar). Proces wykorzystuje różnice w temperaturach kondensacji poszczególnych składników biogazu [1].

Uproszczony schemat procesów zachodzących przy uzdatnianiu biogazu metodą kriogeniczną został przedstawiony na rys. 6. W pierwszym etapie procesu następuje wstępne osuszanie i sprężanie surowego biogazu do około 80 bar. Usunięcie wilgoci chroni instalację przed korozją oraz uszkodzeniami związanymi z tworzeniem się lodu. W następnym etapie biogaz poddawany jest stopniowemu ochładzaniu do temperatury -110°C, co umożliwia na początku usunięcie na przykład siloksanów, chlorowców, a następnie dwutlenku węgla. Technologia oparta na separacji kriogenicznej przynosi obiecujące rezultaty pomimo, że jest na etapie rozwoju. W związku z tym nakłady inwestycyjne oraz operacyjne na razie są na wysokim poziomie. W procesie uzdatniania zachodzą jeszcze duże straty metanu, a instalacje potrafią zostać zablokowane ze względu na fazę stałą. Zwiększenie zainteresowania technologią może nastąpić, zwłaszcza jeśli produktem końcowym stanie się BioLNG.

Proces separacji kriogenicznej umożliwia wyprodukowanie biometanu o zawartości 94-98% metanu, a straty metanu mogą wynieść 0,5%.



Rys. 5. Schemat dwustopniowego układu membranowego  
Fig. 5. Scheme of a two-stage membrane system

Źródło: A. Skorek-Osikowska, Efektywność energetyczna, ekologiczna i ekonomiczna wybranych układów do produkcji biometanu. Monografie, Gliwice 2021, s. 40.

Rys. 6. Uproszczony schemat technologii kriogenicznej separacji gazów  
Fig. 6. Simplified diagram of cryogenic gas separation technology

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

### 2.3.6. Biologiczna konwersja

Biologiczna konwersja jest metodą biologicznego uzdatniania biogazu, która jest w fazie badań naukowych. Na tym etapie możemy wyróżnić trzy metody biologicznego uszlachetniania: chemosyntetyczną, fotosyntetyczną, a także miejscową desorpcję w trakcie procesu fermentacji. Metoda konwersji chemosyntetycznej wykorzystuje metanogeny wodorotroficzne. Mikroorganizmy te pozyskują energię z wodoru, a dwutlenek węgla dostarcza im węglę. Proces ten oparty jest na wtlaczaniu wodoru do reaktora lub oddzielnego zbiornika, w których zawarte są metanogeny [22].

Konwersja fotosyntetyczna to zdolność organizmów powszechnie nazywanych mikroalgami, do przekształcania dwutlenku węgla z biogazu w biomasę mikroalgową. Ten proces wykorzystuje elektrony uwolnione podczas fotolizy wody.

Uzdatnianie biogazu metodą konwersji fotosyntetycznej pozwala na efektywne wykorzystanie nadmiaru dwutlenku węgla do generowania biomasy mikroalgotowej. Ta biomasa może być następnie wykorzystywana do produkcji różnorodnych biopaliw, takich jak biogaz, bioetanol czy biodiesel. Ponadto, uzyskane produkty mikroalgotowe znajdują zastosowanie w branży farmaceutycznej i kosmetycznej, dodając wartość temu procesowi.

Ostatnią metodą, zaliczaną do konwersji biologicznej, jest miejscowa desorpcja w trakcie fermentacji metanowej. Polega na wtlaczaniu do reaktora fermentacyjnego dodatkowej komory desorpcyjnej. Działanie tej komory opiera się na wtlaczaniu od dołu powietrza, które wypycha zawarty dwutlenek węgla w cieczy fermentacyjnej podawanej od góry komory [22].

### 3. Porównanie technologii usuwania dwutlenku węgla z biogazu

W niniejszym rozdziale porównano technologie uzdatniania biogazu, obejmujące oddzielanie dwutlenku węgla od metanu. Porównano pięć różnych metod uzdatniania biogazu omówionych poprzednio. Pominięto metodę biologicznej konwersji, ponieważ jest w trakcie badań naukowych.

#### 3.1. Zawartość oraz straty metanu po procesach uzdatniania biogazu

W tab. 3 przeprowadzono porównanie technologii uzdatniania biogazu pod względem zawartości metanu oraz strat metanu. W tym zestawieniu najbardziej efektywną metodą okazała się absorpcja chemiczna, która charakteryzuje się bardzo wysokim stopniem oczyszczenia i równocześnie niewielkimi stratami metanu.

W separacji membranowej obserwuje się duże różnice w zawartości metanu po procesie uzdatniania, co wynika przede wszystkim z ilości zastosowanych membran.

Tabela 3. Zawartość oraz straty metanu po procesie uzdatniania

Table 3. Methane content and loss after the treatment process

Technologia	Zawartość metanu po procesie (%)	Straty metanu
Absorpcja fizyczna	98	1-2
Absorpcja chemiczna	99-99,4	<0,1
Absorpcja zmiennociśnieniowa	97	2-4
Separacja membranowa	92-98	ok. 2
Separacja kriogeniczna	94-98	0,5

Źródło: opracowanie własne na podstawie zebranej literatury przedstawionej w poprzednim rozdziale.

### 3.2. Zapotrzebowanie na energię, media oraz odzysk ciepła w procesach uzdatniania

Najbardziej energochłonną technologią oczyszczania biogazu jest separacja kriogeniczna (tab. 4). Procesy w tej technologii zachodzą dzięki energii elektrycznej, która umożliwia sprężanie oraz schładzanie biogazu. Odzyskana energia cieplna może zostać wykorzystana do podgrzania wsadu w bioreaktorze.

Tabela 4. Zapotrzebowanie na energię, media oraz możliwość odzysku ciepła w procesach uzdatniania

Table 4. Demand for energy, utilities and the possibility of heat recovery in treatment processes

Technologia	Zapotrzebowanie energii (kWh/Nm <sup>3</sup> )	Zapotrzebowanie na media	Odzysk ciepła
Absorpcja fizyczna	Sprężanie: 0,20-0,30	Energia elektryczna + woda	Tak
Absorpcja chemiczna	0,12-0,65	Energia elektryczna + roztwory amin + ciepło	Tak
Absorpcja zmiennociśnieniowa	0,14	Energia elektryczna + adsorbent	-
Separacja membranowa	0,19-0,77	Energia elektryczna	-
Separacja kriogeniczna	1,30-1,50	Energia elektryczna	Tak

Źródło: opracowanie własne na podstawie: A. Skorek-Osikowska, op. cit; B. Smerkowska, op. cit.

#### 3.3. Koszty technologii uzdatniania biogazu

Wysokość kosztów inwestycyjnych oraz operacyjnych, związanych z uzdatnianiem biogazu w przeliczeniu na biometan, w odniesieniu do każdej technologii uzdatniania biogazu są odwrotnie proporcjonalne do wielkości instalacji (tab. 5). W separacji membranowej występuje przedział kosztów inwestycyjnych oraz operacyjnych, który odnosi się do ilości zastosowanych modułów membran, co także przekłada się na zawartość metanu w biometanie.

Najtańszą technologią dla najmniejszych (100m<sup>3</sup>/h) oraz średnich (250m<sup>3</sup>/h) instalacji jest separacja membranowa. Rozpatrywane koszty inwestycyjne w zakresie instalacji o wydajności 500 m<sup>3</sup>/h, pozostają na zbliżonym poziomie dla każdej technologii uzdatniania.

Jeśli przyjmiemy najwyższe koszty operacyjne dla separacji membranowej, to najbardziej korzystną technologią uzdatniania biogazu dla najmniejszych (100m<sup>3</sup>/h) i średnich instalacji (250m<sup>3</sup>/h) jest adsorpcja zmiennociśnieniowa. Dla instalacji o wydajności 500 m<sup>3</sup>/h najniższe koszty operacyjne generuje absorpcja fizyczna.

Dodatkowo, istotne jest zrozumienie, że proces uszlachetniania biogazu wiąże się z dodatkowymi procesami, które generują dodatkowe koszty. Do tych procesów zalicza się m.in. odsiarczanie, osuszanie.

Tabela 5. Koszty inwestycyjne oraz operacyjne technologii uzdatniania biogazu

Table 5. Investment and operating costs of biogas treatment technology

Technologia	Koszty inwestycyjne [(€/m <sup>3</sup> /h) biometanu] dla instalacji o wydajności:			Koszty operacyjne [(€/m <sup>3</sup> /h) biometanu] dla instalacji o wydajności:		
	100 m <sup>3</sup> /h biometanu	250 m <sup>3</sup> /h biometanu	500 m <sup>3</sup> /h biometanu	100 m <sup>3</sup> /h biometanu	250 m <sup>3</sup> /h biometanu	500 m <sup>3</sup> /h biometanu
Absorpcja fizyczna	10100	5500	3500	14,0	10,3	9,1
Absorpcja chemiczna	9500	5000	3500	14,4	12,0	11,2
Absorpcja zmiennociśnieniowa	10400	5400	3700	12,8	10,1	9,2
Separacja membranowa	7300-7600	4700-4900	3500-3700	10,8-15,8	7,7-11,6	6,5-10,1

Źródło: J. Kurcek, J. Czrnota. Metody oczyszczania biogazu do jakości gazu wysokometanowego. Bezpieczeństwo energetyczne – filary i perspektywa rozwoju, Księga Posterów Naukowych, Rzeszów 2020.



### 3.4. Instalacja uzdatniania biogazu firmy EnviTec Biogas

Instalacja uzdatniania biogazu, oparta na technologii separacji membranowej, została opisana dzięki informacjom od firmy go&biogas Sp. z o.o., która zajmuje się projektami technologii firmy EnviTec Biogas na terytorium Polski. Dodatkowo, informacje zostały pozyskane ze strony internetowej producenta technologii.

EnviTec Biogas jest niemiecką firmą założoną w 2002 r. specjalizującą się m. in. w projektowaniu, produkcji oraz montażu instalacji biogazu i biometanu. Firma EnviTec Biogas opracowała instalacje biometanową o nazwie EnviThan. Jest to kontenerowa stacja uzdatniania biogazu, która obejmuje wstępną obróbkę surowego biogazu, poprzez uzdatnianie biogazu do postaci biometanu (rys. 7). Instalacje można wyposażyć w układ sprzedaży biometanu do sieci gazowej lub w postaci BioCNG, BioLNG. System oczyszczania biogazu oparty jest na technologii separacji membranowej. Producent podkreśla, że separacja metanu z biogazu przeprowadzana jest z wysoką efektywnością, co umożliwia uzyskanie metanu powyżej 99% w biometanie, a strata metanu może nie przekraczać 1%.



Rys. 7. Kontenerowa stacja uzdatniania biogazu firmy EnviTec Biogas w Chinach  
Fig. 7. Container biogas treatment plant by EnviTec Biogas in China  
Źródło: www.envitec-biogas.pl

System oczyszczania gazów EnviThan może zostać dostarczony w kompletnie zmontowanym i przetestowanym kontenerze. Po dostarczeniu na miejsce, jest instalowany na poziomie gruntu, na wcześniej przygotowanych fundamentach listwowych. Zarówno połączenia rurowe, jak i elektryczne są dostarczane w gotowym stanie do montażu i instalowane na miejscu docelowym.

Na rys. 8 przedstawiono schemat kontenerowej stacji uzdatniania biogazu omawianej firmy. Od lewej strony stacja zaczyna się pomieszczeniem kontrolnym. Jest to pomieszczenie technologiczne z klimatyzacją. Zawiera szafy sterownicze, które są centralną częścią sterowania instalacją. W tych szafach znajduje się wizualizacja procesu sterowania, dystrybucja napięcia, urządzenia przełączające i oceniające, a także przetwornice częstotliwości. Pomieszczenie sterowania jest całkowicie odseparowane gazoszczelnie od głównego pomieszczenia z urządzeniami i ma własny dostęp z zewnątrz.

Pomieszczenie membranowe to niewielka i bardzo kompaktowa przestrzeń. Wewnątrz znajdują się moduły membranowe, zamontowane na standardowych stojakach, połączone przez system orurowania. Wszystkie niezbędne zawory sterujące oraz czujniki temperatury, ciśnienia, przepływu i jakości gazu są już zainstalowane i przetestowane. Aby zapewnić optymalną wydajność procesu oczyszczania, komora membranowa jest izolowana i podgrzewana, aby działać sprawnie także w zimie. Kontener jest wyposażony w drzwi, umieszczone w odpowiednich miejscach, ułatwiające inspekcję i konserwację.

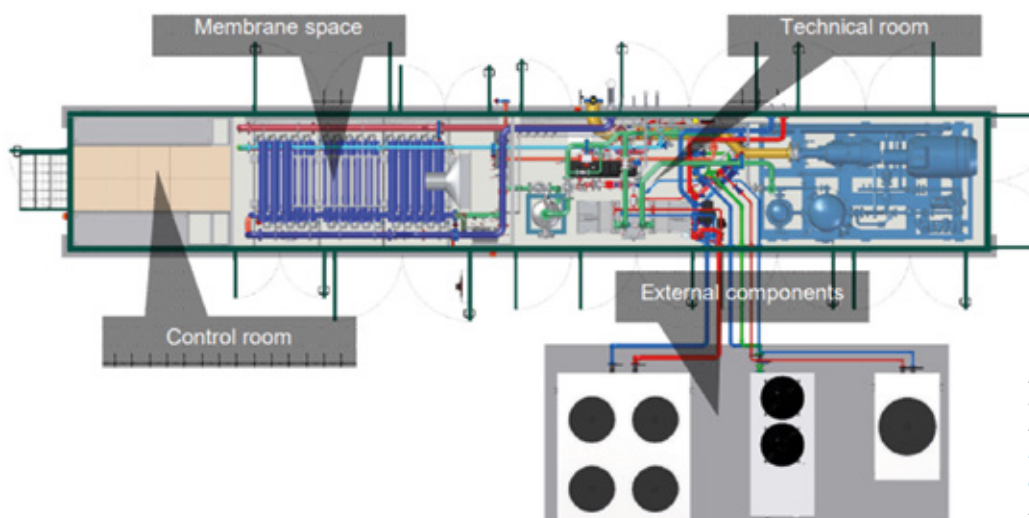
Wszystkie główne elementy mechaniczne, takie jak kompresory, systemy chłodzenia gazu oraz filtry, razem z czujnikami monitorującymi temperaturę, ciśnienie i przepływ, są umieszczone w dźwiękoszczelnym pomieszczeniu technicznym.

Urządzenia zainstalowane na zewnątrz, takie jak chłodnice stołowe, agregaty chłodnicze i ewentualnie systemy oczyszczania powietrza wywiewanego, są montowane na fundamentach. Odpowiednie przewody chłodnicze są prefabrykowane i łączone kołnierzowo. Komponenty znajdujące się wewnątrz lub na zewnętrznej powierzchni kontenera, takie jak klimatyzator sterowni, schody, kanały wentylacyjne, dmuchawy, oraz przyciski sygnalizacyjne i awaryjne, są również przygotowywane i demontowane do transportu.

#### 3.4.1. Technologia wstępnego oczyszczania biogazu

Przed wprowadzeniem do membranowej instalacji uszlachetniania, surowy biogaz musi być poddany wstępnemu oczyszczaniu z siarkowodoru, pary wodnej, amoniaku oraz lotnych związków organicznych (LZO), aby zapobiec uszkodzeniu membran.

Na rys. 9 przedstawiono proces wstępnego oczyszczania biogazu, jaki oferuje firma EnviTec. W pierwszym etapie biogaz przeprowadzany jest przez jednostkę chłodzącą, a zgromadzony kondensat zostaje odprowadzany do szybu kondensatu. Na tym etapie w razie potrzeby może zostać zastosowana płuczka amoniakalna. Następnie schłodzony biogaz zostaje sprężony do około 8-10 kPa, za pomocą sprężarki zamontowanej na zewnątrz kontenera. Proces wstępne-



Rys. 8. Schemat kontenerowej stacji uzdatniania biogazu firmy EnviTec Biogas

Fig. 8. Scheme of the EnviTec Biogas container biogas treatment plant

Źródło: go&biogas Sp. z o.o.





Rys. 9. Proces wstępnego oczyszczania biogazu zastosowany w technologii EnviThan

Fig. 9. Biogas pre-purification process used in EnviThan technology

Źródło: go&biogas Sp. z o.o.

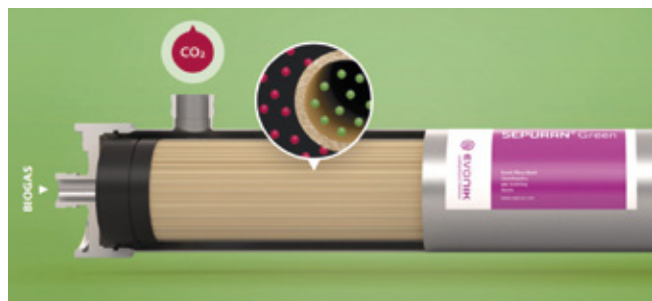
go oczyszczania kończy się na filtrach wypełnionych węglem aktywnym, na których oczyszczany jest biogaz z siarkowodoru oraz z LZO. Do prawidłowego wychwytywania zanieczyszczeń na węglu aktywnym wymagana jest zawartość tlenu na poziomie 0,2-0,3% oraz wilgotność względna wynosząca 50%. Aby osiągnąć wskazany poziom wilgotności względnej, biogaz musi mieć temperaturę 20 °C przy punkcie rosy 10 °C. Konstrukcja filtrów jest w ten sposób zaprojektowana, aby ułatwić wymianę wkładu w momencie gdy staje się nieskuteczny. Wymiana stanowi część kosztów operacyjnych.

Technologia umożliwia pomiar przepływu biogazu w rurze gazowej i mierzy przepływ surowego biogazu wpływającego do filtrów z węglem aktywnym. Dodatkowo przeprowadzana jest analiza surowego biogazu przed wejściem do filtra LZO i na wylocie filtra oczyszczającego z siarkowodoru. Analiza surowego biogazu polega na pomiarze stężenia: metanu, siarkowodoru oraz tlenu. Zmierzone wartości wyświetlane są na urządzeniach pomiarowych oraz w systemie wizualizacji EnviThan. Po przekroczeniu zadanych wartości, uruchamiany jest system bezpieczeństwa oraz alarm.

### 3.4.2. Proces separacji membranowej

W instalacjach do uzdatniania biogazu wykorzystano moduły SEPURAN® Green firmy Evonik Industries.

Moduły membran składają się z kilku tysięcy cylindrycznych, pustych w środku włókien polimerowych, owiniętych w osłonę ze stali nierdzewnej. Firma Evonik oferuje obudowy przeznaczone dla ciśnień do: 2MPa, 2,5MPa, oraz 4 MPa. Instalacja, w zależności od ilości przepływającego biogazu, może składać się od kilku do kilkudziesięciu modułów membran [31].



Rys. 10. Moduł SEPURAN® Green firmy Evonik Industries

Fig. 10. SEPURAN® Green module from Evonik Industries

Źródło: <https://www.biogasworld.com/wp-content/uploads/2023/03/SEPURAN-Biogas-Membranes.pdf>

Jeśli wartości permeatu oraz retentatu po przejściu przez moduły membran, nie spełniają ustalonych wymagań, strumień gazu są zawracane i poddawane kolejnemu cyklowi procesu uzdatniania.

Biogaz po wstępnym oczyszczeniu, poddawany jest procesowi chłodzenia i sprężania do ciśnienia 1,5 MPa. Zastosowane moduły w instalacji pozwalają na operowanie w zakresie od 0 do 100% przepływu. Dzięki temu instalacja może dostosowywać się do zmieniających się warunków procesowych, zapewniając stabilną pracę i optymalną wydajność. Kompaktowa, modułowa zabudowa z możliwością swobodnej rozbudowy sprawia, że instalacja jest nie tylko efektywna,

ale również elastyczna i łatwo dostosowuje się do rosnących potrzeb. Minimalne wymogi obsługi i serwisu redukują koszty utrzymania, co jest istotnym czynnikiem ekonomicznym. Dodatkowo, niskie zapotrzebowanie na energię oraz brak konieczności używania chemikaliów i wody w procesie uzdatniania biogazu, wpływają pozytywnie na środowisko oraz zmniejszają koszty eksploatacji.

### 3.4.3. Dodatkowa instalacja do odzysku dwutlenku węgla

Instalacja uzdatniania biogazu firmy EnviTec umożliwia efektywne pozyskiwanie dwutlenku węgla o wysokiej czystości, który może być później sprzedawany jako drugi produkt gazowy. Instalacja jest zaprojektowana, aby oczyszczać i skraplać dwutlenek węgla.

Strumień dwutlenku węgla wydzielony z biogazu, trafia do zbiornika buforowego. Następnie gaz zostaje sprężony do 1,8-2 MPa za pomocą dwustopniowej bezolejowej, chłodzonej cieczą sprężarki. Do wstępnego chłodzenia i częściowego osuszania gazu, CO<sub>2</sub> zastosowano wymiennik ciepła z automatycznym separatorem kondensatu. W kolejnym etapie surowy dwutlenek węgla trafia do filtra z węglem aktywnym, na którym gaz oczyszczany jest z siarkowodoru oraz tlenosiarczku węgla. Po oczyszczeniu z zanieczyszczeń gazowych, dwutlenek węgla trafia do zespołu osuszacza, w który składa się z dwóch zbiorników wypełnionych adsorbentem na bazie sita molekularnego. Zbiorniki te pracują na zmianę, aby można było przeprowadzić za pomocą ciepłego powietrza proces regeneracji sita molekularnego. Do usuwania porwanych cząstek ze zbiornika adsorbenta ( $\leq 3 \mu\text{m}$ ) zastosowano filtr przeciwpylowy. Następnie dwutlenek węgla trafia do reboilera, w którym w temperaturze od  $-30$  do  $-33^\circ\text{C}$  zostaje skroplony i gromadzi się w przeznaczony do tego studzience. Natomiast gazy obojętne takie jak tlen, azot i metan zostają oddzielone od dwutlenku węgla. Usunięta mieszanina gazów w połączeniu z biometanem może zostać spalona i ogrzać komorę fermentatora.

### 3.4.4. Szacunkowe koszty inwestycji oraz szacunkowe zużycie energii elektrycznej

W tab. 6 przedstawiono koszty inwestycyjne, związane z instalacją uzdatniania biogazu firmy EnviTec, w zależności od przepływów biogazu. Warto zauważyć, że koszty inwestycyjne nie obejmują układów do sprzedaży biometanu i odzysku dwutlenku węgla. W tabeli uwzględniono także odpowiadające przepływowi przez instalację biogazu zużycie energii elektrycznej. Najistotniejszym wnioskiem płynącym z analizy jest obserwacja malejących kosztów jednostkowych ( $\text{€}/\text{m}^3/\text{h}$ ) oraz spadającego zużycia energii elektrycznej wraz z zwiększeniem instalacji uzdatniania.

Tabela 6. Koszt zakupu instalacji EnviThan oraz zużycie energii elektrycznej w procesie uzdatniania biogazu

Table 6. Cost of purchasing the EnviThan installation and electricity consumption in the biogas treatment process

Instalacja o przepływie biogazu ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Koszty inwestycyjne [( $\text{€}/\text{m}^3/\text{h}$ ) biogazu]	Zużycie energii elektrycznej [( $\text{kWh}/\text{m}^3$ ) biogazu]
250	4200	0,325
300	3166	0,248
500	2360	0,256

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych z firmy go&biogas Sp. z o.o.

## Podsumowanie

Rolnictwo w Polsce jest kluczowym sektorem, który może odegrać istotną rolę w przemianach energetycznych, mających na celu ograniczenie wykorzystania tradycyjnych paliw kopalnianych. Produkcja rolna może stanowić ważne źródło surowców do produkcji biopaliw oraz biogazu, które mogą zastąpić konwencjonalne paliwa.

Biogaz, który uzyskujemy bezpośrednio po procesie fermentacji metanowej, zawiera różnorodne substancje, utrudniające jego efektywne wykorzystanie. W składzie tego gazu znajdują się m.in. para wodna, siarkowodor, dwutlenek węgla oraz siloksany, które mogą negatywnie wpływać na instalacje spalającą. Dlatego też konieczne jest poddanie go procesowi uzdatniania, mającemu na celu usunięcie tych niepożądanych składników. Proces ten pozwala na uzyskanie wysokiej jakości biometanu, który spełnia wymagania gazu transportowanego w sieci gazowej lub jako paliwo w silnikach spalinowych.

W artykule dokonano charakterystyki oraz porównania metod uzdatniania biogazu, obejmujących oddzielenie dwutlenku węgla od metanu. Porównując te metody możemy dojść do wniosku, że każda z tych technologii może uzdatnić biogaz do właściwości gazu ziemnego. Duże znaczenie w wyborze technologii uzdatniania biogazu mają koszty inwestycyjne oraz eksploatacyjne. Zauważono, że koszty inwestycyjne dla małych i średnich instalacji istotnie się różnią, natomiast przy dużych instalacjach koszty są na zbliżonym poziomie.

Analiza porównawcza różnych technologii oczyszczania biogazu jest kluczowa dla racjonalnego wyboru najlepszej metody oczyszczania, która spełni wymagania ekonomiczne, środowiskowe i operacyjne. Istnieje wiele różnych technologii oczyszczania biogazu, które mają swoje zalety i ograniczenia, które należy uwzględnić podczas wyboru. Przeprowadzenie analizy porównawczej, pozwala zidentyfikować kluczowe czynniki decyzyjne, takie jak koszty inwestycji i eksploatacji, wydajność procesu, zużycie energii, emisje gazów cieplarnianych. Ponadto, należy również wziąć pod uwagę lokalne uwarunkowania, dostępność surowców i infrastruktury, oraz przyszłe trendy rozwojowe.

W Polsce brakuje obecnie funkcjonujących biometanowni, jednakże projekty tego typu zaczynają się rozwijać i realizować. W ostatnich latach zainteresowanie biometanizacją wzrosło, z uwagi na rosnące zanieczyszczenie środowiska oraz poszukiwanie alternatywnych źródeł energii. W związku z tym na polskim rynku pojawiły się firmy, oferujące kontenerowe instalacje do oczyszczania biogazu. Taką firmą jest go&biogas Sp. z o.o., która oferuje technologię uzdatniania biogazu opartą na separacji membranowej firmy EnviTec Biogas. Zaletą tej instalacji jest duża czystość otrzymanego biometanu i niewielkie straty metanu w procesie uzdatniania. Zastosowanie modułów membranowych umożliwia dostosowanie się instalacji do zmieniających warunków przepływu biogazu. Dodatkowo możemy wyposażyć instalację w układ przygotowujący do sprzedaży biometanu do sieci gazowej lub w postaci BioLNG, BioCNG. Należy także zwrócić uwagę na możliwość dołożenia instalacji do produkcji dwutlenku węgla w postaci ciekłej, co może przyczynić się do osiągnięcia dodatkowego dochodu i ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Niestety, zakup instalacji wiąże się wysokimi kosztami, cena najmniejszej zaprezentowanej instalacji wynosi około 1 miliona euro.

## LITERATURA

- [1] Biernat K., Gis W., Samson-Bręk I.2012. „Przegląd wybranych technologii oczyszczania biogazu do jakości gazu ziemnego”. *Silniki spalinowe* (51):33-39.
- [2] Biernat K., Samson-Bręk I.2011. „Przegląd technologii oczyszczania biogazu do jakości gazu ziemnego”. *Chemik*, 65(5): 435-444.
- [3] Butlewski K.2016. „Metody uzdatniania biogazu z uwzględnieniem możliwości integracji termicznej z procesem fermentacji biomasy”. *Problemy Inżynierii Rolniczej. Z. 2* (92): 67–83.
- [4] Czarkowska A., Czarkowski M.2022. „Wykorzystanie technologii energetyki biogazowej w systemie bezpieczeństwa energetycznego”. *Zeszyty Naukowe Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Witelona w Legnicy*, nr 4 (41): 11-34.
- [5] Grządzielski W., Dziadowiec M.2019. „Uwarunkowania rozwoju dystrybucyjnej sieci gazowej zasilanej skroplonym gazem ziemnym lub biogazem/biometanem” Lublin 2019 r., s. 55-57.
- [6] Grzesik K.2005. „Wykorzystanie biogazu jako źródła energii”. *Zielone prądy w edukacji – II edycja*, Polskie Towarzystwo Inżynierii Ekologicznej Oddział Krakowski. Wyd. Art-Tekst. Kraków :21-30.
- [7] GUS, Energia ze źródeł odnawialnych w 2021, Analizy statystyczne, Warszawa 2022.
- [8] Holewa-Rataj J., Kukulska-Zajac E.2022. „Biogaz rolniczy w Polsce – produkcja i możliwość wykorzystania”. *Nafta-Gaz* (12): 872-877.
- [9] Ignaciuk W., Sulewski P.2021. „Uwarunkowania rozwoju sektora biogazu rolniczego w Polsce w kontekście doświadczeń historycznych i wyzwań Europejskiego Zielonego Ładu”. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej* 3(368):55-77.
- [10] Jędrzak A.2007. „Biologiczne przetwarzanie odpadów”. Wyd Nauk PWN, Warszawa :85-100.
- [11] Kierunek.2023. „Biometan,” Raport Polskiej Organizacji Biometanu: 44-49.
- [12] Koch-Kopyszko S., Rogulska M.2021. „Biometan – czas na zielony gaz”, *Przegląd Gazowniczy*, Wydanie Specjalne, Magazyn Izby Gospodarczej Gazownictwa, styczeń 2021, : 17-20.
- [13] Kowalski Ł., Smerkowska B.2012. „Uzlachetnianie biogazu do jakości biometanu – studium przypadku dla warunków polskich”. *Silniki Spalinowe*, R. 51, nr 1.
- [14] Kwaśny J., Balcerzak W., Rezka P.2016. „Biogaz i charakterystyka wybranych metod jego odsiarczania”. *Czasopismo Inżynierii Lądowej, Środowiska i Architektury*, 63(2): 129-141.
- [15] Lewandowski W.2007. „Proekologiczne odnawialne źródła energii”, *Bio-gaz*. WNT.
- [16] Łukomska A. 2023. „Aktualna Sytuacja w branży Biogazowej. Raport, Biogaz i Biometan w Polsce”. *Magazyn Biomasa* : 22-25.
- [17] Mroczkowski P., M. Seiffert.2011. „Oczyszczanie i zatłaczanie biogazu na przykładzie Niemiec. Możliwość wdrożenia technologii w Polsce”.
- [18] Nitkiewicz S., Duda D.2011. „Uzdatnianie metanu pofermentacyjnego”. *Silniki Spalinowe*, R. 50, nr 3.
- [19] Pilarska A., Witaszek K. Krystofiak A., Pilarski K.2015. „Inhibitory w procesie fermentacji metanowej”. *Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna* (2): 9-11.
- [20] Piskowska-Wasiak J.2014. „Uzdatnianie biogazu do parametrów gazu wysokometanowego”. *Nafta-Gaz* 2(70):94-105.
- [21] Piłuta M.2023. „BioLNG w Polsce – technologie, koszty i zapotrzebowanie. Raport, Biogaz i Biometan w Polsce”. *Magazyn Biomasa*: 61-65.
- [22] Podgórska M., Narloch P.2022. „Przegląd metod oczyszczania biogazu do biometanu”. *Rynek Energii*, nr 6 (163):16-23.
- [23] Rachoń H., Sasim R.2015. „Administracyjno-prawne aspekty inwestycji bioenergetycznych w Polsce”. *Biogazownie. Rynek, konkurencyjność, analiza efektywności*: 35-36.
- [24] Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 września 2019 r. w sprawie przedsięwzięć mogących znacząco oddziaływać na środowisko.
- [25] Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 24 sierpnia 2011 r. w sprawie szczegółowego zakresu obowiązku potwierdzania danych dotyczących wytwarzanego biogazu rolniczego wprowadzonego do sieci dystrybucyjnej gazowe.
- [26] Scholwin F., Gattermann H. Uzdatnianie gazu i możliwości jego zastosowania. Biogaz-produkcja i wykorzystanie, s. 127-129.
- [27] Skorek-Osikowska A.2021. „Efektywność energetyczna, ekologiczna i ekonomiczna wybranych układów do produkcji biometanu”. *Monografie* s. 41.
- [28] Sulewski P., Majewski E., Was A. 2017. „Miejsce i rola rolnictwa w produkcji energii odnawialnej w Polsce i UE”. *Zagadnienia Ekonomiki Rolnej*: 50-70.
- [29] USTAWA z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz.U. 2015 poz. 478).
- [30] USTAWA z dnia 10 kwietnia 1997 r. – Prawo energetyczne (Dz. U. 1997, Nr 54, poz. 348 ze zm.).
- [31] Wiącek D., Tys J.2015. „Biogaz-wytwarzanie i możliwości jego wykorzystania. Instytut Agrofizyki im. Bohdana Dobrzańskiego PAN, s. 14.
- [32] Zarczyński A., Rosiak K., Anielak P., Ziemiński K., Wolf W.2015. „Praktyczne metody usuwania siarkowodoru z biogazu. II. Zastosowanie rozwiązań sorpcyjnych i metod biologicznych”. *Acta Innovations* (15): 57-71.
- [33] Żygadlo M.,Schalk P., Orman Ł. 2004. „Czy warto segregować? Mechaniznobiologiczna przeróbka odpadów komunalnych”. *Przegląd Komunalny* (11):62-63.
- [34] <https://magazynbiomasa.pl/biogazownie-szansa-na-oszczednosci-i-dbalosc-o-srodowisko/>, dostęp: 3 grudnia 2023 rok.
- [35] <https://www.biogasworld.com/wp-content/uploads/2023/03/SEPURAN-Biogas-Membranes.pdf>, dostęp: 25.02.2024 r.
- [36] <https://wysokienapiecie.pl/88241-biometan-wkracza-do-polskiego-prawo-ale-czy-trafi-na-rynek/>, dostęp: 15.12.2023 r.
- [37] [www.envitec-biogas.pl](http://www.envitec-biogas.pl), dostęp: 25.02.2024 r.21