

# Pozyskiwanie biogazu w procesie fermentacji substratów rolniczych jako element rozwoju krajowego sektora OZE

Biogas production in the process of fermenting agricultural substrates as an element of the development of the national renewable energy sector

SANDRA STRZELECKA, IWONA ZAWIEJA, MAGDALENA MADEŁA

DOI: 10.17512/INSTAL.2026.05.04

Pozyskiwanie biogazu w procesie współfermentacji substratów rolniczych stanowi istotny element rozwoju krajowego sektora odnawialnych źródeł energii. Znaczenie biogazu w transformacji energetycznej oraz ograniczaniu emisji gazów cieplarnianych jest uwarunkowane stopniem wykorzystania odpadów i produktów ubocznych pochodzenia rolniczego. Celem artykułu jest analiza zagadnień związanych z pozyskiwaniem biogazu w procesie fermentacji substratów rolniczych jako elementu rozwoju krajowego sektora OZE. Ocenie poddano substraty powszechnie stosowane w biogazowniach, przebieg procesu współfermentacji, sposoby pozyskiwania biogazu oraz kierunki jego wykorzystania. Ponadto omówiono aspekty prawne odnoszące się do możliwości energetycznego wykorzystania biogazu. Wykazano, że dalszy rozwój sektora opartego na wykorzystaniu biogazu wymaga zarówno udoskonalenia technologii współfermentacji beztlenowej, jak i systemowego wykorzystania krajowego potencjału surowcowego. Stwierdzono, że rodzaj i właściwości substratów determinują przebieg procesu fermentacji beztlenowej oraz jego efektywność w odniesieniu do intensywności i stabilności pozyskiwania biogazu. Odnotowano również, że właściwości energetyczne biogazu, metody jego oczyszczania oraz wykorzystanie w produkcji energii z zastosowaniem istniejącej infrastruktury energetycznej determinują możliwości powszechnego wdrażania tego biopaliwa jako tzw. paliwa „drop in”.

Słowa kluczowe: współfermentacja beztlenowa, biogazownie rolnicze, biogaz, odpady rolno-spożywcze

Biogas production through the co-digestion of agricultural substrates constitutes an important element in the development of the national renewable energy sector. The importance of biogas in the energy transition and in reducing greenhouse gas emissions depends on the extent to which agricultural waste and by-products are utilized. The aim of this paper is to analyse issues related to biogas production from the fermentation of agricultural substrates as a component of the development of the national renewable energy sector. The analysis covers substrates commonly used in biogas plants, the course of the co-digestion process, biogas production methods, and its applications. In addition, legal conditions governing the energy use of biogas are discussed. It has been demonstrated that further development of the sector requires both improvements in anaerobic co-digestion technologies and the systematic utilization of domestic feedstock potential. It was found that the type and properties of substrates determine the course of the anaerobic digestion process and its efficiency in terms of the intensity and stability of biogas production. It was also noted that the energy properties of biogas, methods of its purification, and its use in energy production with the existing energy infrastructure determine the prospects for the widespread implementation of this biofuel as a so-called “drop-in” fuel.

Keywords: anaerobic co-fermentation, agricultural biogas plants, biogas, agro-food waste

## Wstęp

Podstawowymi substratami stosowanymi powszechnie w biogazowniach rolniczych są gnojowica, obornik oraz odpady rolno-spożywcze. W perspektywie rozwoju biogazowni rolniczych

w Polsce istotne jest przezwyciężenie istniejących barier technologicznych związanych z eksploatacją instalacji, zmiennością substratów oraz zagospodarowaniem pofermentu. W przypadku substratów rolniczych współfermentacja umożliwia łączenie odchodów zwierzęcych, takich

jak gnojowica i obornik, z pozostałościami roślinnymi lub odpadami rolno-spożywczymi. Odchody zwierzęce zapewniają stabilność procesu wynikającą z właściwości buforujących oraz obecności aktywnej mikroflory metanogennej. Substraty roślinne i odpady organiczne

mgr Sandra Strzelecka, Autor korespondencyjny: e-mail: sandra.strzelecka@pcz.pl, prof. dr hab. inż. Iwona Zawieja ORCID: 0000-0002-4480-8736, e-mail: iwona.zawieja@pcz.pl, dr inż. Magdalena Madeła ORCID: 0000-0003-3802-3454, e-mail: magdalena.madela@pcz.pl, Politechnika Częstochowska, Wydział Infrastruktury i Środowiska, ul. J.H. Dąbrowskiego 69, 42-200 Częstochowa

dostarczają biodegradowalnej materii organicznej o wyższym potencjale metanowym [1, 2, 3]. Za kluczowe, w odniesieniu do powszechnego wdrożenia biogazu jako tzw. paliwa „drop in”, należy uznać właściwości energetyczne biogazu, metody jego oczyszczania oraz możliwości wykorzystania go w produkcji energii z zastosowaniem istniejącej infrastruktury energetycznej. Celem artykułu jest analiza zagadnień związanych z pozyskiwaniem biogazu w procesie fermentacji substratów rolniczych jako elementu rozwoju krajowego sektora OZE. Ocenie poddano substraty stosowane powszechnie w biogazowniach, przebieg procesu współfermentacji, sposoby pozyskiwania biogazu oraz kierunki jego wykorzystania. Ponadto omówiono uwarunkowania prawne warunkujące energetyczne wykorzystanie biogazu. Za element nowości uznano ujęcie procesu współfermentacji w kontekście optymalizacji parametrów technologicznych oraz możliwości zwiększenia wydajności metanowej przy jednoczesnym ograniczeniu ryzyka inhibicji procesu. Podkreślono również znaczenie integracji technologii biogazowych z koncepcją gospodarki o obiegu zamkniętym, w szczególności w zakresie zagospodarowania pofermentu. W perspektywie rozwoju krajowego sektora OZE wskazano kierunki dalszych badań i wdrożeń obejmujące doskonalenie procesu fermentacji, wykorzystanie nowych substratów oraz poprawę efektywności energetycznej instalacji biogazowych. Niniejszy przegląd przygotowano w układzie narracyjno-tematycznym. W analizie wykorzystano literaturę naukową dostępną w bazach Scopus, Web of Science, ScienceDirect oraz Google Scholar. W procesie wyszukiwania zastosowano następujące słowa kluczowe i frazy: „osady ściekowe”, „współfermentacja beztlenowa”, „biogaz”, „biogazownie rolnicze”, „odpady rolnicze”, „dekarbonizacja”, „kofermentacja beztlenowa”, co pozwoliło uwzględnić zarówno technologiczny, jak i środowiskowy aspekt analizowanego zagadnienia. Analiza źródeł obejmowała recenzowane artykuły naukowe oraz raporty dostępne w języku angielskim i polskim. Dobór literatury miał charakter selektywny i obejmował analizę tytułów, streszczeń oraz pełnych tekstów publikacji. Ostatecznie do przeglądu włączono 42 publikacje, co zapewniło spójność i przejrzystość opracowania.

### **Znaczenie biogazu w transformacji energetycznej i dekarbonizacji**

Biogaz, którego głównymi składnikami są metan, stanowiący wartościowe źródło energii, oraz dwutlenek węgla, jest odna-

wialnym paliwem gazowym wytwarzanym w procesie fermentacji beztlenowej materii organicznej z udziałem mikroorganizmów [4]. Biogaz jest mieszaniną gazów, w której metan stanowi objętościowo od ok. 50% do ok. 70%, natomiast dwutlenek węgla od ok. 30% do ok. 40%. Niewielki udział mają również azot i siarkowodor, który jest bezbarwnym gazem palnym. Biogaz pełni istotną rolę w procesie transformacji energetycznej oraz dekarbonizacji sektora energetycznego i rolno-spożywczego. Jego znaczenie wynika głównie z możliwości połączenia produkcji energii z zagospodarowaniem odpadów organicznych, co wpisuje się w ideę gospodarki o obiegu zamkniętym [5, 6]. W przeciwieństwie do odnawialnych źródeł energii charakteryzujących się zmiennością warunków pracy, takich jak energia wiatrowa czy słoneczna, biogaz wyróżnia się wysoką dyspozycyjnością i może być wykorzystywany w sposób ciągły, zarówno do produkcji energii elektrycznej, jak i ciepła. Po odpowiednim oczyszczeniu do postaci biometanu może zostać wykorzystany jako substytut gazu ziemnego [6, 7]. Rozwój technologii biogazowych przyczynia się do ograniczania emisji gazów cieplarnianych poprzez redukcję niekontrolowanej emisji metanu oraz zastępowanie paliw kopalnych w bilansie energetycznym tym wartościowym nośnikiem energii, stanowiącym paliwo typu „drop-in” [8, 9]. Wdrożony w obiektach biogazowni proces współfermentacji beztlenowej sprzyja zwiększeniu uzysków energetycznych w postaci biogazu, a w konsekwencji, dzięki wykorzystaniu tego wartościowego biopaliwa, pozyskaniu energii elektrycznej i ciepła w procesie kogeneracji.

### **Rola współfermentacji w zagospodarowaniu odpadów i produktów ubocznych z rolnictwa**

Współfermentacja odpadów i produktów ubocznych pochodzenia rolniczego stanowi efektywne rozwiązanie technologiczne umożliwiające ich przetwarzanie w warunkach beztlenowych, przy jednoczesnej intensyfikacji wydajności produkcji biogazu. Współfermentacja jest procesem polegającym na jednoczesnym prowadzeniu fermentacji metanowej dwóch lub większej liczby substratów. Zapewnia to lepsze dopasowanie parametrów wsadu, stabilizację przebiegu procesu oraz zwiększenie wydajności produkcji biogazu w porównaniu z konwencjonalną fermentacją pojedynczych substratów. Wykorzystanie mieszanin substratów, takich jak gnojowica, resztki roślinne czy odpady rolno-przemysłowe, pozwala na poprawę stabilności procesu oraz opty-

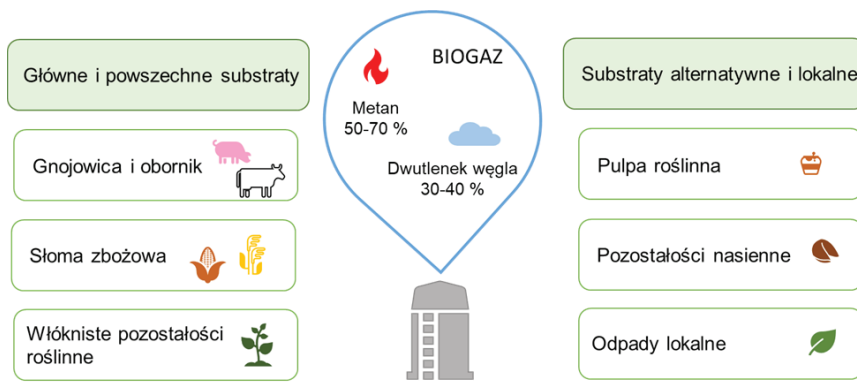
malne wykorzystanie potencjału energetycznego zastosowanej biomasy [10-12]. Zgodnie z danymi literaturowymi [11, 13] współfermentacja sprzyja wdrażaniu zasad biogospodarki o obiegu zamkniętym poprzez ograniczenie ilości odpadów oraz ich przekształcenie w odnawialne nośniki energii. Szerokie wdrożenie procesu współfermentacji w zagospodarowaniu odpadów rolniczych jest zasadne ze względu na możliwość wykorzystania odpadów pochodzenia roślinnego jako wartościowych energetycznie ko-substratów w procesach fermentacji beztlenowej. Przyczynia się to do racjonalnego zagospodarowania materiałów problematycznych dla środowiska, a także do zwiększenia produkcji biogazu i metanu przy zachowaniu zasad gospodarki o obiegu zamkniętym. Takie podejście promuje wielokierunkowe wykorzystanie biomasy, w którym odpady stają się cennym surowcem energetycznym, zgodnie z założeniami zrównoważonej transformacji sektora OZE. Proces współfermentacji niesie za sobą korzyści, ale wiąże się również z ograniczeniami. Pomimo szerokiego wachlarza dostępnych substratów dobór odpowiednich materiałów wsadowych stanowi wyzwanie ze względu na konieczność zachowania właściwych warunków technologicznych fermentacji metanowej oraz parametrów fizykochemicznych warunkujących przebieg procesu. Niewłaściwe zestawienie substratów może prowadzić do zaburzenia procesu, a w konsekwencji do jego zahamowania.

### **Charakterystyka substratów rolniczych wykorzystywanych w procesie pozyskiwania biogazu**

W procesach fermentacji beztlenowej w biogazowniach rolniczych wykorzystywane są różnorodne substraty pochodzenia rolniczego i rolno-spożywczego, obejmujące zarówno odchody zwierzęce, jak i odpady oraz produkty uboczne produkcji rolniczej.

Na rysunku 1 przedstawiono surowce wykorzystywane w praktyce do zasilania biogazowni rolniczych.

Najczęściej występującą pozostałością pochodzenia rolniczego jest słoma zbożowa, powstająca jako produkt uboczny zbioru roślin takich jak pszenica, żyto, ryż, kukurydza czy sorgo, przeznaczonych do celów spożywczych [10, 14]. Surowiec ten charakteryzuje się powszechną dostępnością, jednak jego cena podlega sezonowym wahaniom wynikającym m.in. z konkurencyjnego wykorzystania w żywieniu zwierząt oraz jako materiał ściółkowy.



Rys. 1. Przegląd surowców do biogazowni rolniczych (opracowanie własne na podstawie [1, 10])  
Fig. 1. Overview of raw materials for agricultural biogas plants (own elaboration based on [1, 10])

Tańszą alternatywę stanowią włókniste pozostałości roślinne nieprzydatne do celów paszowych, które jednak ze względu na wysoką zawartość struktur lignocelulozowych wykazują ograniczoną podatność na biodegradację. Pozostałości nasienne, takie jak łuski kukurydzy, owsa czy innych roślin, oddzielane są w procesach przesiewania lub omlotu, cechując się niskimi kosztami pozyskania, natomiast z uwagi na niewielką gęstość nasypową wyróżniają się ograniczoną efektywnością energetyczną w przeliczeniu na jednostkę objętości. Z kolei pulpa roślinna powstająca po ekstrakcji soku z trzciny cukrowej lub pozostałości po przetwórstwie buraków cukrowych wykazuje wysoki potencjał energetyczny w aspekcie pozyskiwania biogazu. Dostępność tego typu substratów ma charakter lokalny. Należy jednak podkreślić, że wysoka zawartość wody oraz podatność na procesy gnilne ograniczają możliwości transportu i długotrwałego magazynowania. Produkty uboczne z agroleśnictwa mogą być wykorzystywane jako źródło węgla w bioreaktorach fermentacyjnych, jednak ich niska gęstość oraz wysoki udział lignocelulozy sprawiają, że czas rozkładu biologicznego wydłuża się. Sporadycznie spotykanymi substratami są odpady z produkcji serów oraz z działalności kwaciarskiej, które mogą stanowić wartościowe lokalne kosubstraty dla odchodów zwierzęcych, często dostępne nieodpłatnie. Należy jednak podkreślić, że każdy z wyżej wymienionych surowców charakteryzuje się zarówno określonymi zaletami, jak i ograniczeniami, niemniej wszystkie mogą być potencjalnie wykorzystane jako substrat w procesach produkcji biogazu [10, 14]. Gnojowica i obornik należą do podstawowych substratów wykorzystywanych w procesach fermentacji beztlenowej w biogazowniach rolniczych, głównie ze względu na ich stałą dostępność oraz bezpośrednie powiązanie z produkcją zwierzęcą. Substraty te wyróżniają się stosunkowo niską zawartością

suchej masy oraz umiarkowanym potencjałem metanowym w porównaniu z odpadami pochodzenia roślinnego lub rolno-spożywczego. Gnojowica i obornik zapewniają stabilność procesu fermentacji dzięki obecności buforujących form azotu oraz dobrze rozwiniętej mikroflory metanogennej. Obornik zwierzęcy stanowi odpad organiczny obejmujący głównie odchody zwierząt oraz mocz, może również zawierać dodatki w postaci materiałów ściółkowych, pozostałości paszy oraz fragmentów organicznych, takich jak sierść, włosie czy pióra. Skład obornika zwierzęcego może być wzbogacony o materiały obce, takie jak wapno czy trociny, których obecność zależy od rodzaju stosowanej ściółki w gospodarstwach hodowlanych. W zależności od zawartości suchej masy wyróżnia się obornik stały, półpłynny oraz gnojowicę. Zgodnie z danymi literaturowymi [15, 16] wykazano, że obornik bydlęcy charakteryzuje się wyższymi wartościami suchej masy (s.m.), suchej masy organicznej (s.m.o.), lotnych kwasów tłuszczowych (LKT) oraz chemicznego zapotrzebowania na tlen (ChZT) w porównaniu z obornikiem świńskim i kurzym. Odczyn pH odchodów byłby, trzody chlewnej i drobiu mieści się w zakresie od 7,0 do 8,0. Skład chemiczny obornika wykazuje jednak znaczną zmienność, uwarunkowaną m.in. regionem, rodzajem i jakością paszy oraz strawnością zwierząt, co podkreśla konieczność indywidualnej oceny właściwości tego substratu przed jego wykorzystaniem w procesach fermentacji beztlenowej [2, 17]. W artykule autorstwa Janiszewskiej i Ossowskiej [18] wykazano, że fermentacja gnojowicy i obornika nie tylko umożliwia wytwarzanie biogazu, lecz także ogranicza emisję metanu powstającą podczas tradycyjnego przechowywania odchodów zwierzęcych, co ma istotne znaczenie klimatyczne. Zwrócono również uwagę, że poferment powstający w biogazowniach może być wykorzystywany jako bardziej stabilny i efektywny nawóz niż surowe nawozy

naturalne, co sprzyja lepszemu wykorzystaniu składników pokarmowych przez rośliny i ograniczeniu strat azotu poprzez jego przenikanie do środowiska gruntowo-wodnego. W literaturze podkreśla się, że monofermentacja gnojowicy lub obornika często prowadzi do niższej wydajności produkcji biogazu. W związku z tym substraty te są powszechnie wykorzystywane jako podstawowy materiał zasilający komory fermentacyjne, w skojarzeniu z innym materiałem organicznym [3, 17-19]. Takie podejście pozwala na poprawę bilansu węgla do azotu (C/N), zwiększenie produkcji metanu oraz zapewnia efektywniejsze wykorzystanie potencjału energetycznego instalacji biogazowych [17, 20].

### Istota procesu oraz rola współfermentacji beztlenowej w przetwarzaniu substratów rolniczych

Pierwsze wzmianki dotyczące wspólnej fermentacji różnych substratów organicznych, odpowiadającej współczesnemu rozumieniu procesu współfermentacji beztlenowej, pojawiły się już na początku lat 80. XX wieku. Jednym z najwcześniejszych udokumentowanych badań w tym zakresie jest praca Fujity i in. z 1980 roku [21], w której autorzy przeanalizowali przebieg procesu fermentacji beztlenowej mieszaniny odchodów świńskich z dodatkiem pozostałości po uprawie kukurydzy. Wyniki tych badań wykazały, że połączenie substratów pochodzenia zwierzęcego i roślinnego prowadzi do zwiększenia produkcji biogazu w porównaniu z konwencjonalną fermentacją pojedynczego surowca. Badanie to stanowiło istotny punkt odniesienia dla późniejszego rozwoju koncepcji współfermentacji, ukazując potencjał synergicznego oddziaływania różnych frakcji biomasy w jednym układzie fermentacyjnym [22]. Kluczowym elementem współfermentacji jest efekt synergii, rozumiany jako uzyskanie wyższej produkcji biogazu z mieszaniny substratów niż suma uzysków osiąganych podczas ich oddzielnej fermentacji. Efekt ten wynika m.in. z lepszej dostępności składników odżywczych, rozcieńczenia substancji inhibujących, poprawy kinetyki rozkładu materii organicznej oraz bardziej stabilnego przebiegu kolejnych faz fermentacji beztlenowej [3, 23, 24]. W praktyce technologicznej współfermentacja beztlenowa substratów rolniczych obejmuje jednoczesne prowadzenie fermentacji metanowej mieszaniny co najmniej dwóch różnych substratów organicznych, charakteryzujących się odmiennymi właściwościami fizykochemicznymi i składem biochemicznym. Istotą tego procesu jest takie zestawienie surowców, aby

wykorzystać ich wzajemne oddziaływanie prowadzące do uzyskania warunków środowiskowych korzystnych dla bytowania mikroorganizmów fermentacyjnych. Korzystne warunki środowiskowe wpływają na zwiększenie efektywności produkcji biogazu w porównaniu z fermentacją pojedynczych substratów. Optymalne prowadzenie współfermentacji w aspekcie technologicznym gwarantuje uzyskanie stabilności energetycznej procesu, czego wyrazem jest intensywna produkcja biogazu o wysokiej kaloryczności. Poszczególne substraty rolnicze charakteryzują się różną podatnością na rozkład zachodzący podczas pierwszej fazy procesu, tj. hydrolizy. Podatność na upłynnienie zawartych w badanych substratach substancji organicznych warunkuje uzyskanie w kolejnych etapach procesu odmiennych wartości stężenia lotnych kwasów tłuszczowych, których tempo generowania odpowiada z kolei za intensywność produkcji biogazu [2, 3, 23, 25].

### Właściwości energetyczne biogazu rolniczego i metody jego oczyszczania

Właściwości energetyczne biogazu rolniczego wynikają bezpośrednio z udziału metanu w mieszaninie gazowej oraz obecności zanieczyszczeń, które ograniczają jego efektywne wykorzystanie. Surowy biogaz cechuje się niższą wartością opałową w porównaniu z gazem ziemnym, co skutkuje obniżoną sprawnością wytwarzania energii elektrycznej i ciepła oraz zwiększonym zużyciem paliwa w jednostkach energetycznych. Wartość opałowa biogazu rolniczego wynosi ok. 18-26 MJ/m<sup>3</sup>, co odpowiada 5-7 kWh/m<sup>3</sup> [26], przy czym zależy ona bezpośrednio od zawartości metanu w mieszaninie gazowej. Dodatkowo obecność siarkowodoru i pary wodnej prowadzi do intensyfikacji procesów korozyjnych oraz przyspieszonego zużycia elementów instalacji energetycznych, co wpływa na wzrost kosztów eksploatacyjnych. Siarkowódor, nawet w stężeniach rzędu kilkudziesięciu ppm, wykazuje silne właściwości korozyjne, prowadząc do degradacji instalacji oraz elementów silników i turbin [14, 28]. Z kolei wysoka zawartość CO<sub>2</sub> obniża wartość opałową paliwa i uniemożliwia jego włączanie do sieci gazowej bez wcześniejszego oczyszczenia. Właściwości energetyczne biogazu rolniczego są ściśle powiązane z rodzajem zastosowanych substratów oraz ich składem biochemicznym. Surowce pochodzenia rolniczego, na przykład gnojowica, obornik, kizzonki roślinne czy odpady z przetwórstwa rolno-spożywczego, różnią

się zawartością suchej masy organicznej oraz udziałem węglowodanów, białek i tłuszczu. Wpływa to bezpośrednio na potencjał metanowy mieszaniny fermentacyjnej [16]. Substraty bogate w łatwo rozkładalne związki organiczne, zwłaszcza węglowodany i tłuszcze, umożliwiają uzyskanie wyższej wydajności biogazu oraz większego udziału metanu w jego składzie, podczas gdy materiały włókniste o wysokiej zawartości lignocelulozy wolniej ulegają rozkładowi i wymagają dłuższego czasu retencji [15, 16]. W przypadku biogazowni rolniczych istotne znaczenie ma łączenie substratów o zróżnicowanych właściwościach fizykochemicznych. Dodatek gnojowicy lub obornika sprzyja stabilizacji procesu fermentacji poprzez dostarczenie mikroorganizmów oraz składników buforujących. Kizzonki roślinne i odpady rolno-spożywcze są źródłem łatwo przyswajalnej materii organicznej, dzięki czemu możliwe jest uzyskanie większej produkcji biogazu i wyższej efektywności energetycznej [15]. Odpowiednie zestawienie surowców pozwala na poprawę bilansu energetycznego instalacji oraz uzyskanie biogazu o wysokiej zawartości metanu, co przekłada się na wyższą wartość opałową biopaliwa. W tabeli 1 zestawiono główne grupy substratów rolniczych wykorzystywanych w procesie współfermentacji i ich potencjał w produkcji biogazu.

metry energetyczne paliwa. Najczęściej stosowane technologie obejmują fizyczne metody absorpcyjne, w tym płukanie wodne, adsorpcję zmienności ciśnieniową (PSA), separację membranową oraz metody chemiczne. Skuteczność usuwania CO<sub>2</sub> w nowoczesnych instalacjach przekracza 90-97%, a straty metanu mogą być ograniczone do poziomu poniżej 2% przy odpowiedniej konfiguracji układu. Procesy upgradingu umożliwiają uzyskanie biometanu o właściwościach zbliżonych do gazu ziemnego, co pozwala na jego zastosowanie w wysokosprawnych układach kogeneracyjnych, w sektorze transportu oraz na wprowadzenie go do sieci gazowej [27, 28, 29]. Skutecznie przeprowadzony proces oczyszczania prowadzi do znacznego wzrostu wartości opałowej paliwa, poprawy niezawodności oraz trwałości infrastruktury energetycznej wykorzystującej biogaz rolniczy. W literaturze wyróżnia się metody fizyczne, chemiczne, membranowe, kriogeniczne oraz biologiczne, a także ich konfiguracje hybrydowe, dobierane w zależności od skali instalacji i wymaganej jakości końcowej gazu. Pierwszą metodą jest absorpcja fizyczna, czyli płukanie wodne. Polega ona na selektywnym rozpuszczaniu CO<sub>2</sub> i H<sub>2</sub>S w wodzie przy podwyższonym ciśnieniu, podczas gdy metan pozostaje w fazie gazowej. Proces ten nie wymaga

Tabela 1. Wpływ rodzaju substratów rolniczych na potencjał produkcji biogazu (opracowanie własne na podstawie [15, 16])  
Table 1. The influence of the type of agricultural substrates on biogas production potential (own elaboration based on [15, 16])

Typ substratu	Główne składniki organiczne	Potencjał pozyskiwania biogazu
Gnojowica/obornik	Związki organiczne o umiarkowanej biodegradowalności, wysoka wilgotność	Umożliwia stabilny przebieg fermentacji, jednak prowadzi do uzyskania biogazu o umiarkowanej zawartości metanu i niższej wartości opałowej w porównaniu z substratami roślinnymi
Kizzonki roślinne, np. kukurydza	Cukry, łatwo fermentujące węglowodany	Sprzyjają zwiększeniu wydajności produkcji biogazu oraz wzrostowi zawartości metanu, co bezpośrednio przekłada się na wyższą wartość opałową paliwa
Odpady rolno-spożywcze	Materia organiczna o wysokiej podatności na rozkład biologiczny	Mogą znacząco zwiększać uzysk biogazu i poprawiać jego parametry energetyczne, pod warunkiem odpowiedniego dozowania substratów i kontroli procesu
Resztki włókniste, słoma i resztki poźniwne	Lignoceluloza	Powolny rozkład tego surowca powoduje obniżenie tempa produkcji metanu, co może ograniczać chwilową wartość energetyczną biogazu bez wcześniejszej obróbki surowca

Dobór substratów rolniczych i ich właściwe skojarzenie warunkuje uzyskanie optymalnego składu biogazu o możliwie najwyższej kaloryczności. Kluczowym etapem wykorzystania biogazu jest jego oczyszczanie i uszlachetnianie (upgrading), prowadzące do poprawy jakości gazu i zwiększenia stężenia metanu do poziomu 96-98% obj., przy jednoczesnym usunięciu składników obniżających para-

stosowania reagentów chemicznych, jednak wiąże się z koniecznością regeneracji wody procesowej oraz dużym zużyciem energii na sprężanie gazu [29]. Absorpcja chemiczna wykorzystuje reakcje CO<sub>2</sub> z roztworami aminowymi, prowadząc do niemal całkowitego usunięcia tego składnika ze strumienia gazowego. Metoda ta umożliwia uzyskanie bardzo wysokiej czystości metanu, jednak wymaga znacznych

nakładów energetycznych na regenerację adsorbentu oraz cechuje się dużą złożonością instalacyjną [27]. Z kolei metoda adsorpcji zmiennociśnieniowej (PSA) opiera się na selektywnym wiązaniu CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S i wilgoci na powierzchni porowatych adsorbentów przy podwyższonym ciśnieniu oraz ich desorpcji podczas obniżania ciśnienia. Kolejnymi metodami oczyszczania są separacja membranowa i separacja kriogeniczna. Pierwsza z nich polega na zróżnicowanej przenikalności składników biogazu przez membrany polimerowe, przez które CO<sub>2</sub> przenika szybciej niż CH<sub>4</sub>. Uzyskanie biometanu zwykle wymaga zastosowania układów wielostopniowych lub połączenia tej metody z innymi technikami oczyszczania. Separacja kriogeniczna wykorzystuje różnice temperatur skraplania CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> poprzez schładzanie biogazu do niskich temperatur. Proces ten umożliwia jednoczesne uzyskanie biometanu o wysokiej czystości oraz odzysk ciekłego CO<sub>2</sub>, jednak wiąże się z wysokim zużyciem energii i znacznymi kosztami inwestycyjnymi [27, 29]. Metoda biologicznej metanizacji CO<sub>2</sub> polega na konwersji dwutlenku węgla z udziałem wodoru i mikroorganizmów metanogennych. Biologiczna metanizacja może być prowadzona w reaktorze fermentacyjnym lub w oddzielnej jednostce technologicznej, zwiększając całkowity uzysk metanu zamiast jego separacji. Ostatnią z omawianych grup metod są układy hybrydowe, łączące różne technologie oczyszczania biogazu. Najczęściej łączy się technologię separacji membranowej z adsorpcją zmiennociśnieniową lub z procesami kriogenicznymi. Takie rozwiązania pozwalają na ograniczenie strat metanu, poprawę efektywności energetycznej oraz dostosowanie jakości biogazu do wymagań końcowych. W praktyce najczęściej stosowane są metody fizyczne oczyszczania biogazu, w szczególności płukanie wodne, czyli absorpcja fizyczna, oraz adsorpcja zmiennociśnieniowa (PSA). Wynika to z relatywnie prostej budowy instalacji oraz braku konieczności stosowania reagentów chemicznych. Możliwości wykorzystania biogazu rolniczego w Polsce koncentrują się przede wszystkim na produkcji energii elektrycznej i ciepła w układach kogeneracyjnych. Taka forma zagospodarowania gazu pozwala na jednoczesne wytwarzanie dwóch nośników energii, co zwiększa sprawność całego procesu i poprawia bilans energetyczny instalacji. Biogazownie rolnicze funkcjonujące w kraju wykorzystują wytwarzany biogaz głównie w silnikach gazowych sprzężonych z generatorami prądu. Odzyskane ciepło znajduje zastosowanie na potrzeby własne obiektów lub w systemach grzewczych, co przyczynia

się do ograniczenia zużycia paliw kopalnych oraz redukcji emisji zanieczyszczeń powietrza [30]. Poza klasycznym zastosowaniem w kogeneracji biogaz rolniczy może być także przetwarzany na biometan o jakości sieciowej, który po procesie oczyszczania można wprowadzać do krajowej sieci gazowej lub wykorzystywać jako paliwo silnikowe. Takie rozwiązanie zwiększa elastyczność wykorzystania biogazu rolniczego oraz umożliwia jego zastosowanie poza miejscem wytworzenia, co wpisuje się w kierunki rozwoju gospodarki niskoemisyjnej i dywersyfikacji źródeł energii [9, 31].

### Uwarunkowania prawne dotyczące wykorzystywania biogazu rolniczego w UE i w Polsce

Rozwój produkcji biometanu powinien opierać się przede wszystkim na wykorzystaniu odpadów organicznych oraz pozostałości pochodzenia leśnego i rolnego, co pozwala na racjonalne gospodarowanie użytkami gruntowymi oraz ograniczenie potencjalnych zagrożeń dla bezpieczeństwa żywnościowego [19, 20]. Zgodnie z komunikatem Komisji Europejskiej REPowerEU [34] z 8 marca 2022 r., przygotowanym w ramach działań na rzecz ograniczenia zależności od importu gazu z Federacji Rosyjskiej, założono istotne zwiększenie produkcji biometanu do poziomu 35 mld Nm<sup>3</sup> rocznie do 2030 r. Zgodnie z tą koncepcją przewidziano przeznaczenie 37 mln euro na rozwój technologii pozyskiwania biometanu. Biogaz i biometan mogą jednocześnie przyczyniać się do realizacji celów klimatycznych Unii Europejskiej w sektorach trudnych do dekarbonizacji oraz wzmacniać bezpieczeństwo energetyczne dzięki wykorzystaniu lokalnych substratów rolniczych [7, 16, 35]. Produkcja biogazu z substratów rolniczych, takich jak gnojowica, obornik czy biomasa roślinna, przyczynia się do zwiększenia udziału OZE w krajowym sektorze energetycznym oraz do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych pochodzących z sektora rolnego [36, 37]. Uwarunkowania prawne dotyczące wykorzystywania biogazu rolniczego w Polsce, wraz z rozwojem krajowego sektora odnawialnych źródeł energii, ulegają ciągłym zmianom. W obowiązującym przed 2010 r. polskim prawodawstwie nie istniała jednoznaczna definicja pojęcia biogazu, co ograniczało rozwój technologii jego wykorzystania, a w konsekwencji przemysłowe funkcjonowanie biogazowni rolniczych. Wraz z nowelizacją Prawa energetycznego w 2010 r. sytuacja ta uległa zmianie. Biogaz rolniczy został formalnie zdefiniowany jako paliwo

gazowe wytwarzane w procesie fermentacji metanowej z surowców rolniczych i produktów ubocznych [38]. Aktualne regulacje krajowe odnoszące się do wykorzystania biogazu rolniczego pozostają bezpośrednio powiązane z unormowaniami prawnymi Unii Europejskiej. Biometan i biogaz są postrzegane jako istotne komponenty transformacji energetycznej, dekarbonizacji oraz realizacji zasad biogospodarki o obiegu zamkniętym. Informacje dotyczące sektora biogazu rolniczego zostały również ujęte w krajowych dokumentach strategicznych, w tym w Polityce Energetycznej Polski do 2040 r. (PEP2040) [39], przyjętej przez Radę Ministrów w lutym 2021 r. W dokumencie tym biogaz określono jako ważny komponent realizacji celów OZE. Podkreślono konieczność dalszego rozwoju sektora OZE, wymagającego stabilnych i przewidywalnych regulacji prawnych, zarówno krajowych, jak i europejskich, oraz stałego systemu wsparcia. Czynniki te warunkują pełne wykorzystanie potencjału surowców rolniczych w Polsce w procesie współfermentacji beztlenowej [40]. Biogaz odgrywa istotną rolę w realizacji celów energetycznych UE dotyczących wykorzystania OZE w ogólnym bilansie energetycznym, szczególnie w kontekście zapewnienia stabilności pracy systemów elektroenergetycznych oraz dywersyfikacji źródeł energii. W przeciwieństwie do źródeł niestabilnych, takich jak energia wiatru i promieniowania słonecznego, biogaz umożliwia bilansowanie systemu w okresach niedoboru energii. W związku z tym przyczynia się do poprawy bezpieczeństwa energetycznego i elastyczności systemu. W tym kontekście szczególnego znaczenia nabiera podejście inżynierskie, uwzględniające zarówno aspekty technologiczne, jak i eksploatacyjne funkcjonowania instalacji biogazowych. Z punktu widzenia projektowania i eksploatacji istotne jest uwzględnienie zmienności dostępności substratów oraz ich właściwości fizykochemicznych, co determinuje dobór technologii fermentacji, objętość komór fermentacyjnych oraz sposób prowadzenia procesu. W praktyce inżynierskiej konieczne jest również dostosowanie parametrów pracy instalacji do lokalnych warunków surowcowych i energetycznych, co ma kluczowe znaczenie dla stabilności procesu oraz opłacalności inwestycji. Uzyskane wyniki analiz mogą stanowić podstawę do podejmowania decyzji projektowych, optymalizacji pracy istniejących instalacji oraz planowania rozwoju rozproszonych systemów biogazowych na poziomie regionalnym i lokalnym, z uwzględnieniem wymagań środowiskowych oraz założeń gospodarki niskoemisyjnej.

## Perspektywy rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce

Perspektywy rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce są związane z dużą dostępnością surowców pochodzenia rolniczego oraz rosnącą potrzebą zagospodarowania odpadów organicznych w sposób bezpieczny dla środowiska. Na początku 2026 roku w Polsce zarejestrowanych było 168 wytwórców biogazu rolniczego [41]. W Polsce istnieje duży potencjał pozyskiwania energii w oparciu o biogazownie rolnicze, które mogą działać w sposób ciągły, niezależnie od warunków pogodowych. Potencjał surowcowy obejmuje przede wszystkim gnojowicę, obornik, resztki poźniwe oraz odpady przetwórstwa rolno-spożywczego, które w wielu regionach kraju występują w ilościach umożliwiających rozwój lokalnych instalacji biogazowych. Wykorzystanie tych zasobów mogłoby przyczynić się zarówno do zwiększenia krajowej produkcji energii odnawialnej, jak i do ograniczenia emisji metanu powstającego podczas tradycyjnego składowania i przechowywania odchodów zwierzęcych [40]. Dalszy rozwój sektora może być związany z upowszechnieniem mniejszych biogazowni zlokalizowanych bezpośrednio przy pojedynczych gospodarstwach rolnych lub funkcjonujących w ramach kilku połączonych ze sobą gospodarstw. Takie rozwiązania pozwalają na ograniczenie kosztów transportu substratów, ułatwiają lokalne wykorzystanie ciepła oraz sprzyjają zagospodarowaniu pofermentu jako nawozu naturalnego. Ponadto rozwój technologii fermentacji beztlenowej umożliwia coraz efektywniejsze przetwarzanie substratów o niższej podatności na rozkład, co poszerza bazę surowcową możliwą do wykorzystania w biogazowniach rolniczych. Istotnym kierunkiem rozwoju biogazowni jest optymalizacja procesów fermentacji poprzez precyzyjne sterowanie parametrami pracy reaktorów, w tym temperaturą, czasem retencji oraz składem mieszaniny wsadowej. Wdrożenie nowoczesnych systemów monitoringu i automatyzacji pozwala ograniczyć ryzyko zakłóceń biologicznych oraz zapewnić stabilną produkcję biogazu, co wpływa na zwiększenie efektywności energetycznej i ekonomicznej eksploatacji instalacji [42]. Rosnące znaczenie technologii oczyszczania biogazu do biometanu może w przyszłości umożliwić szersze wykorzystanie tego paliwa poza miejscem jego wytwarzania. Jednocześnie tempo rozwoju biogazowni rolniczych w Polsce pozostaje uzależnione od przezwyciężenia barier technologicznych. Problemy związane z niejednorodnością substratów, utrzymaniem stabilnej fermentacji czy efektywnym oczyszczaniem biogazu

nadal ograniczają pełne wykorzystanie potencjału tych instalacji. Dlatego dalsze badania koncentrują się na optymalizacji składu mieszanin wsadowych, udoskonalaniu konstrukcji reaktorów oraz rozwijaniu metod uzdatniania gazu i zagospodarowania pofermentu. Pomimo dużego potencjału surowcowego rozwój tego sektora wciąż napotyka istotne bariery. Surowce mogą różnić się zawartością suchej masy, związków azotu czy tłuszczów, co wpływa na przebieg procesu metanogenezy i może prowadzić do spadku wydajności produkcji biogazu. Wyzwanie stanowi także zapewnienie niezawodnych systemów oczyszczania biogazu i zagospodarowania pofermentu, co wymaga dodatkowych nakładów technicznych i inwestycyjnych [40]. Ograniczeniem pozostaje ponadto poziom zaawansowania technologicznego części istniejących instalacji, które nie zawsze są przystosowane do pracy w zmiennych warunkach obciążenia lub do produkcji biometanu o jakości sieciowej. Dalszy rozwój biogazowni rolniczych w Polsce będzie w dużej mierze zależał od modernizacji technologii, poprawy efektywności procesów fermentacji oraz lepszej integracji instalacji z lokalnymi systemami energetycznymi [42]. W tabeli 2 zestawiono najczęściej wskazywane bariery technologiczne, które mogą utrudniać stabilną i efektywną pracę instalacji biogazowych.

Tabela 2. Główne bariery technologiczne rozwoju biogazowni rolniczych (opracowanie własne na podstawie [40, 42])  
 Table 2. Main technological barriers to the development of agricultural biogas plants (own elaboration based on [40, 42])

Obszar technologiczny	Istota problemu	Wpływ na funkcjonowanie biogazowni
Zmienność składu substratów	Różna zawartość suchej masy, azotu i tłuszczów w odpadach	Niestabilna fermentacja, spadek produkcji metanu
Mieszanie i hydraulika reaktora	Sedymentacja, tworzenie kożucha, martwe strefy	Pogorszenie kontaktu mikroorganizmów z substratem
Oczyszczanie biogazu	Konieczność usuwania H <sub>2</sub> S, wilgoci i zanieczyszczeń	Większa liczba urządzeń oraz wyższe koszty eksploatacji
Zagospodarowanie pofermentu	Wysoka zawartość wody, potrzeba magazynowania	Problemy logistyczne i środowiskowe

Przedstawione bariery pokazują, że dalszy rozwój biogazowni rolniczych wymaga nie tylko wsparcia organizacyjnego i finansowego, lecz także udoskonalenia rozwiązań technicznych, poprawy kontroli przebiegu procesu fermentacji oraz optymalizacji systemów oczyszczania biogazu i wykorzystania pofermentu. W kontekście dalszego rozwoju biogazowni

rolniczych w Polsce coraz częściej podkreśla się potrzebę łączenia produkcji energii z racjonalnym zagospodarowaniem nawozów naturalnych. Rozwój biogazowni rolniczych może pełnić podwójną rolę: energetyczną i środowiskową, wspierając jednocześnie produkcję energii odnawialnej oraz poprawę gospodarki rolnej.

## Podsumowanie

Współfermentacja substratów rolniczych stanowi efektywną metodę zwiększania wydajności produkcji biogazu, wpływając na stabilność przebiegu procesu fermentacji beztlenowej poprzez optymalizację składu wsadu i stosunku C/N. Biogaz rolniczy pełni istotną rolę w rozwoju sektora OZE jako stabilne i dyspozycyjne źródło energii, wspierające bilansowanie systemu energetycznego. Jednocześnie jego wykorzystanie przyczynia się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz zagospodarowania odpadów rolniczych. Dalszy rozwój sektora wymaga jednak doskonalenia technologii oraz eliminacji barier związanych z eksploatacją instalacji i zmiennością składu substratów.

## Bibliografia

- [1] S. Astals, D. J. Batstone, J. Mata-Alvarez, and P. D. Jensen, "Identification of synergistic impacts during anaerobic co-digestion of organic wastes," *Bioresour. Technol.*, vol. 169, pp. 421–427, Oct. 2014, doi: 10.1016/j.biortech.2014.07.024.
- [2] R. Kadam, S. Jo, J. Lee, K. Khanthong, H. Jang, and J. Park, "A Review on the Anaerobic Co-Digestion of Livestock Manures in the Context of Sustainable Waste Management," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 3, p. 546, Jan. 2024, doi: 10.3390/en17030546.
- [3] A. H. Ulukardesler, "Anaerobic co-digestion of grass and cow manure: kinetic and GHG calculations," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, p. 6320, Apr. 2023, doi: 10.1038/s41598-023-33169-0.
- [4] P. Weiland, "Biogas production: current state and perspectives," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, vol. 85, no. 4, pp. 849–860, Jan. 2010, doi: 10.1007/s00253-009-2246-7.
- [5] D. Mignogna, P. Ceci, C. Cafaro, G. Corazzi, and P. Avino, "Production of Biogas and Biomethane as Renewable Energy Sources: A Review," *Applied Sciences*, vol. 13, no. 18, p. 10219, Sep. 2023, doi: 10.3390/app131810219.
- [6] P. Gupta, C. Kurien, and M. Mittal, "Biogas (a promising bioenergy source): A critical review on the potential of biogas as a sustainable energy source for gaseous fuelled spark ignition engines," *Int. J. Hydrogen Energy*, vol. 48, no. 21, pp. 7747–7769, Mar. 2023, doi: 10.1016/j.ijhydene.2022.11.195.
- [7] G. Ślusarz, D. Twaróg, B. Gołębiowska, M. Cierpiał-Wolan, J. Gołębiwski, and P. Plutecki, "The Role of Biogas Potential in Building the Energy Independence of the Three Seas Initiative Countries," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 3, p. 1366, Jan. 2023, doi: 10.3390/en16031366.
- [8] P. Sulewski, E. Majewski, and A. Wąs, "MIEJSCE I ROLA ROLNICTWA W PRODUKCJI ENERGII ODNAWIALNEJ W POLSCE I UE," *Problems of Agricultural Economics*, vol. 350, no. 1, pp. 50–74, Mar. 2017, doi: 10.5604/00441600.1234428.

- [9] Ł. Mamica, M. Mazur-Bubak, and R. Wróbel-Rotter, "Can Biogas Plants Become a Significant Part of the New Polish Energy Deal? Business Opportunities for Poland's Biogas Industry," *Sustainability*, vol. 14, no. 3, p. 1614, Jan. 2022, doi: 10.3390/su14031614.
- [10] J. Frankowski and W. Czekala, "Agricultural Plant Residues as Potential Co-Substrates for Biogas Production," *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 11, p. 4396, May 2023, doi: 10.3390/en16114396.
- [11] D. Hernández et al., "Anaerobic Co-Digestion of Agro-Industrial Waste Mixtures for Biogas Production: An Energetically Sustainable Solution," *Sustainability*, vol. 16, no. 6, p. 2565, Mar. 2024, doi: 10.3390/su16062565.
- [12] A. Phillip, S. M. Bhatt, N. Sharma, and B. Poudel, "Enhanced Biogas Production Using Anaerobic Co-digestion of Animal Waste and Food Waste: A Review," *J. Sci. Res. Rep.*, vol. 30, no. 8, pp. 761–781, Aug. 2024, doi: 10.9734/jsrr/2024/v30i82297.
- [13] B. Dhungana, S. P. Lohani, and M. Marsolek, "Anaerobic Co-Digestion of Food Waste with Livestock Manure at Ambient Temperature: A Biogas Based Circular Economy and Sustainable Development Goals," *Sustainability*, vol. 14, no. 6, p. 3307, Mar. 2022, doi: 10.3390/su14063307.
- [14] M. K. Jameel et al., "Biogas: Production, properties, applications, economic and challenges: A review," *Results Chem.*, vol. 7, p. 101549, Jan. 2024, doi: 10.1016/j.rchem.2024.101549.
- [15] K. Piłarski, A. A. Piłarska, and M. B. Pietrzak, "Biogas Production in Agriculture: Technological, Environmental, and Socio-Economic Aspects" *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 21, p. 5844, Nov. 2025, doi: 10.3390/en18215844.
- [16] M. J. B. Kabeyi and O. A. Olanrewaju, "Biogas Production and Applications in the Sustainable Energy Transition," *Journal of Energy*, vol. 2022, pp. 1–43, Jul. 2022, doi: 10.1155/2022/8750221.
- [17] G. Ma, P. Ndegwa, J. H. Harrison, and Y. Chen, "Methane yields during anaerobic co-digestion of animal manure with other feedstocks: A meta-analysis," *Science of The Total Environment*, vol. 728, p. 138224, Aug. 2020, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.138224.
- [18] D. Janiszewska and L. Ossowska, "Possibilities of Producing Agricultural Biogas from Animal Manure in Poland," *Agriculture*, vol. 16, no. 3, p. 301, Jan. 2026, doi: 10.3390/agriculture16030301.
- [19] M. M. Søndergaard, I. A. Fotidis, A. Kovalovszki, and I. Angelidaki, "Anaerobic Co-digestion of Agricultural Byproducts with Manure for Enhanced Biogas Production," *Energy & Fuels*, vol. 29, no. 12, pp. 8088–8094, Dec. 2015, doi: 10.1021/acs.energyfuels.5b02373.
- [20] I. M. Nasir, T. I. Mohd Ghazi, and R. Omar, "Anaerobic digestion technology in livestock manure treatment for biogas production: A review," *Eng. Life Sci.*, vol. 12, no. 3, pp. 258–269, Jun. 2012, doi: 10.1002/elsc.201100150.
- [21] M. Fujita, J. M. Scharer, and M. Moo-Young, "Effect of corn stover addition on the anaerobic digestion of swine manure," *Agricultural Wastes*, vol. 2, no. 3, pp. 177–184, Jul. 1980, doi: 10.1016/0141-4607(80)90014-1.
- [22] H. Wang et al., "Long-Term Mesophilic Anaerobic Co-Digestion of Swine Manure with Corn Stover and Microbial Community Analysis," *Microorganisms*, vol. 8, no. 2, p. 188, Jan. 2020, doi: 10.3390/microorganisms8020188.
- [23] J. Mata-Alvarez, J. Dosta, S. Macé, and S. Astals, "Codigestion of solid wastes: A review of its uses and perspectives including modeling," *Crit. Rev. Biotechnol.*, vol. 31, no. 2, pp. 99–111, Jun. 2011, doi: 10.3109/07388551.2010.525496.
- [24] S. Jo, R. Kadam, H. Jang, D. Seo, and J. Park, "Elucidating Synergistic Effects of Anaerobic Co-Digestion of Slaughterhouse Waste with Livestock Manures," *Energies (Basel)*, vol. 17, no. 12, p. 3027, Jun. 2024, doi: 10.3390/en17123027.
- [25] S.-Y. Pan, C.-Y. Tsai, C.-W. Liu, S.-W. Wang, H. Kim, and C. Fan, "Anaerobic co-digestion of agricultural wastes toward circular bioeconomy," *iScience*, vol. 24, no. 7, p. 102704, Jul. 2021, doi: 10.1016/j.isci.2021.102704.
- [26] A. Rejman-Burzyńska, H. Maksymiak-Lach, E. Jedryś, "Potencjał energetyczny biogazu – ocena zasobów surowcowych do produkcji biogazu w Polsce", *CHEMIK* 2013, 67, 5, 446–453.
- [27] A. Ijaola et al., "Biogas Production, Upgrading, and Utilization: A Comprehensive Review," *Journal of Engineering and Applied Sciences*, vol. 11, no. 1, p. 17, 2024, doi: 10.5455/jeas.2024010502.
- [28] H. Karne, U. Mahajan, U. Ketkar, A. Kohade, P. Khadilkar, and A. Mishra, "A review on biogas upgradation systems," *Mater. Today Proc.*, vol. 72, pp. 775–786, 2023, doi: 10.1016/j.matpr.2022.09.015.
- [29] B. Foret et al., "Biogas Upgrading into Renewable Natural Gas: Part II—An Assessment of Emerging Technologies," *Energies (Basel)*, vol. 18, no. 21, p. 5760, Oct. 2025, doi: 10.3390/en18215760.
- [30] J. Holewa-Rataj and E. Kukulska-Zajac, "Biogaz rolniczy w Polsce – produkcja i możliwości wykorzystania," *Nafta-Gaz*, vol. 78, no. 12, pp. 872–877, Dec. 2022, doi: 10.18668/NG.2022.12.03.
- [31] I. Samson-Bręk and K. Biernat, "Możliwości wykorzystania biogazu rolniczego do produkcji paliwa silnikowego," *Studia Ecologiae et Bioethicae*, vol. 7, no. 2, pp. 79–90, Dec. 2009, doi: 10.21697/seb.2009.7.2.07.
- [32] A. Ogonowska and K. Maćkowiak, "Agricultural biogas in Poland: What you need to know in 2024." (Dostęp 09 lutego 2026 r.). Dostępny w sieci: <https://codozasady.pl/en/p/agricultural-biogas-in-poland-what-you-need-to-know-in-2024>
- [33] R. Pytko and I. Hanas, "Where does the biogas market stand in Poland?" (Dostęp 09 lutego 2026 r.). Dostępny w sieci: <https://codozasady.pl/en/p/where-does-the-biogas-market-stand-in-poland->
- [34] Komisja Europejska, „Komunikat Komisji do Parlamentu Europejskiego, Rady Europejskiej, Rady Europejskiego Komitetu Ekonomiczno-Społecznego i Komitetu Regionów. REPowerEU: wspólne europejskie działania w kierunku bezpiecznej i zrównoważonej energii po przystępnej cenie”. (Dostęp 09 lutego 2026 r.). Dostępny w sieci: <https://www.gov.pl/web/mniejszosci-narodowe-i-etniczne/komunikat-komisji-do-parlamentu-europejskiego-rady-europejskiego-komitetu-ekonomiczno-spolecznego-i-komitetu-regionow>
- [35] A. Czarkowska and M. Czarkowski, "The use of biogas energy technology in the energy security system," *Zeszyty Naukowe Państwowej Wyższej Szkoły Zawodowej im. Witelona w Legnicy*, vol. 4, no. 41, pp. 11–34, Dec. 2021, doi: 10.5604/01.3001.0015.7769.
- [36] B. Iglirski, R. Buczkowski, A. Iglirska, M. Cichosz, G. Piechota, and W. Kujawski, "Agricultural biogas plants in Poland: Investment process, economical and environmental aspects, biogas potential," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 7, pp. 4890–4900, Sep. 2012, doi: 10.1016/j.rser.2012.04.037.
- [37] W. Gostomczyk, "Rynek biogazu rolniczego w Polsce i wykorzystywane surowce w latach 2011-2014," *Zeszyty Naukowe SGGW w Warszawie - Problemy Rolnictwa Światowego*, vol. 15, no. 3, pp. 30–39, Sep. 2015, doi: 10.22630/PRS.2015.15.3.35.
- [38] K. Błażejewski, „Przegląd prawa rolnego”, Wydawnictwo Naukowe UAM, 2010. (Dostęp 09 lutego 2026 r.). Dostępny w sieci: <http://hdl.handle.net/10593/1322>
- [39] Polish Council of Ministers, "Energy Policy of Poland Until 2040", 2021. (Dostęp 09 lutego 2026 r.). Dostępny w sieci: <https://www.gov.pl/web/climate/energy-policy-of-poland-until-2040-epp2040>
- [40] A. Bednarek, A. Klepacka, and A. Siudek, "Development barriers of agricultural biogas plants in Poland," *Economics and Environment*, vol. 84, no. 1, pp. 229–258, May 2023, doi: 10.34659/eis.2023.84.1.528.
- [41] "Rejestr wytwórców biogazu rolniczego. Stan na dzień: 02.02.2026 r. (Dostęp 09 lutego 2026 r.). Dostępny w sieci: <https://www.gov.pl/web/kowr/rejestr-wytworcow-biogazu-rolniczego>
- [42] A. Łukomska, J. Pulka, M. Broński, and J. Dach, "Demand-Driven Biogas Plants in Poland – Potential and Growth Perspectives," *Journal of Ecological Engineering*, vol. 25, no. 11, pp. 236–248, Nov. 2024, doi: 10.12911/22998993/193262.

## XII PODLASKA KONFERENCJA CIEPŁOWNICZA

8–9 październik 2026 / Warchały



POLSKIE ZRZESZENIE  
INŻYNIERÓW I TECHNIKÓW  
SANITARNYCH  
Oddział Białystok