

Nowoczesne technologie w biogazowniach – praktyczne zastosowania i analiza perspektyw rozwoju w warunkach polskich

Modern technologies in biogas plants – practical applications and analysis of development prospects in the Polish context

DARIA SŁAWCZYK

DOI 10.36119/15.2025.12.3

Celem pracy jest przedstawienie aktualnego stanu technologii biogazowych w Polsce oraz ocena możliwości wdrożenia nowoczesnych metod produkcji, oczyszczania i wykorzystania biogazu. Analiza wykazała, że w Polsce przeważają instalacje fermentacji mokrej pracujące w warunkach mezofilowych, z kolei wytwarzany biogaz jest wykorzystywany przede wszystkim w procesach kogeneracji, w których jednocześnie wytwarzana jest energia elektryczna i ciepło. Natomiast technologie uszlachetniania biogazu i produkcji biometanu rozwijają się dopiero w ograniczonym zakresie. Wyniki wskazują, że dalszy rozwój sektora wymaga rozbudowy infrastruktury gazowej, wsparcia legislacyjnego oraz wdrażania efektywnych i ekonomicznie opłacalnych technologii oczyszczania biogazu. *Słowa kluczowe: biogaz, biometan, energetyka odnawialna, kogeneracja, oczyszczanie biogazu, produkcja biogazu w Polsce*

The aim of this study is to present the current state of biogas technologies in Poland and to assess the potential for implementing modern methods of biogas production, purification, and utilization. The analysis revealed that wet fermentation installations operating under mesophilic conditions predominate in Poland, while the produced biogas is primarily used in cogeneration processes, generating electricity and heat simultaneously. In contrast, biogas upgrading and biomethane production technologies are still developing to a limited extent. The results indicate that further development of the sector requires the expansion of gas infrastructure, legislative support, and the implementation of efficient and economically viable biogas purification technologies.

Keywords: biogas, biomethane, biogas production in Poland, biogas purification, cogeneration, renewable energy

Wprowadzenie

W obliczu transformacji energetycznej, zarówno w Polsce, jak i na świecie, dąży się do dywersyfikacji źródeł energii. Zróżnicowanie miksu energetycznego zwiększa bezpieczeństwo energetyczne, zapewnia stabilność systemu w zakresie pozyskiwania, dystrybucji oraz wykorzystania źródeł energii, a także sprzyja dekarbonizacji gospodarki. W odpowiedzi na sukcesywne zmniejszanie się zasobów paliw kopalnych oraz ich negatywny wpływ na środowisko wprowadzono szereg przepisów i regulacji, takich jak Agenda 21, Protokół z Kioto czy Dyrektywa RED III. Strategie zmierzające do ograniczania zużycia węgla, ropy naftowej i gazu ziemnego obejmują stopniowe zastępowanie nieodnawialnych źródeł energii ich odnawialnymi zamiennikami [11]. Jedną z możliwości zmniejszenia eksploatacji surow-

ców kopalnych jest produkcja biogazu, zarówno komunalnego, rolniczego, jak i pochodzącego z odpadów przemysłowych. W Polsce przemysł biogazowy z roku na rok zyskuje na znaczeniu. Przykładowo, według danych zgromadzonych przez Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa (KOWR) liczba instalacji wytwarzających biogaz rolniczy w kraju zwiększyła się do 181 sztuk (stan na 24 marca 2025), osiągając tym samym niemal dwukrotny wzrost w ciągu dekady [16]. Jak wskazuje Krasuska i in. [14], szacunkowy potencjał inwestycyjny biometanu w Polsce wynosi 3,2 mld m³ gazu i jest uzależniony między innymi od liczby tworzonych i eksploatowanych instalacji, dostępności substratów, systemu wsparcia oraz uwarunkowań formalno-prawnych. Niemniej jednak, autorzy podkreślają istotną rolę mniejszych instalacji biogazowych w zwiększeniu produkcji biogazu, ze względu na mniejsze

koszty inwestycyjne oraz uproszczenia w uzyskaniu pozwoleń na budowę.

W obliczu rosnącego zapotrzebowania na odnawialne źródła energii oraz wysokiego potencjału produkcji biogazu w Polsce, konieczne jest dokonanie oceny dostępnych technologii biogazowych w celu identyfikacji ich ograniczeń oraz możliwości wdrożenia innowacji. Celem artykułu jest przedstawienie technologii produkcji, oczyszczania, uszlachetniania i wykorzystania biogazu oraz analiza potencjału stosowania nowych technologii biogazowych w Polsce, obejmująca ocenę ich przydatności i perspektyw rozwoju.

Technologia procesu fermentacji metanowej

Biogaz będący mieszaniną metanu (CH₄), dwutlenku węgla (CO₂) oraz śladowej ilości innych gazów, takich jak

siarkowodor (H_2S), wodór (H_2) i azot (N_2), powstaje na skutek beztlenowego rozkładu związków organicznych, w tym białek, tłuszczów oraz cukrów podczas fermentacji metanowej. Zawartość poszczególnych gazów tworzących biogaz zależy na jest między innymi od rodzaju substratów stosowanych w procesie. Ponadto na przebieg fermentacji wpływają zależności biocenotyczne, takie jak równowaga pomiędzy ilością dostępnego substratu a ilością mikroorganizmów, czynniki fizykochemiczne, w tym między innymi pH, temperatura, obecność substancji toksycznych, a także parametry technologiczne, takie jak czas zatrzymania. W celu optymalizacji fermentacji anaerobowej, w aspekcie przygotowania wsadów, istotny okazuje się zarówno dobór substratów i współsubstratów, obejmujący między innymi ocenę potencjału wytwórczego metanu czy określenie zawartości suchej masy, jak również kwestie związane z dostępnością lokalną substratów. Najczęściej wykorzystywaną praktyką jest współfermentacja (ang. co-digestion), która pozwala na zachowanie stabilnych warunków procesu, przede wszystkim poprzez zoptymalizowanie stosunku węgla do azotu (C/N) w stosowanych mieszkankach wsadowych [19]. Generalnie, substraty stosowane w biogazowniach obejmują substraty rolnicze, odpady komunalne nadające się do przetworzenia na biogaz oraz osady ściekowe.

Wyróżnia się dwie wiodące technologie fermentacji metanowej, którymi są fermentacja mokra oraz fermentacja sucha. Pierwsza z nich jest technologią spotykaną zdecydowanie częściej, ze względu na prostsze utrzymanie stabilnych warunków procesu. Przykładowo, obecność w bioreaktorze substratów o wysokiej zawartości wody, na przykład gnojowicy czy odpadów spożywczych, bezpośrednio przedkłada się na utrzymanie stabilnej temperatury, ułatwiony dostęp mikroorganizmów do składników odżywczych oraz homogenizację wsadu. Natomiast fermentacja sucha jest odpowiednia dla substratów o wysokiej zawartości suchej masy (20-40% TS). Charakteryzuje się wyższą wydajnością produkcji metanu w zestawieniu z fermentacją mokrą oraz niższymi kosztami obróbki wstępnej surowców. Niemniej jednak, ze względu na ograniczone mieszanie, wymagane jest wprowadzenie metod recyrkulacji. Innym problemem okazuje się także obecność inhibitorów procesu, takich jak amoniak, lotne kwasy tłuszczowe oraz metale ciężkie. Jednakże pomimo wyzwań, technologia ta zyskuje obecnie na znaczeniu, ponie-

waż wykazuje wysoki potencjał zarówno w zrównoważonym zagospodarowaniu odpadów, jak i okazuje się bezpieczna dla środowiska. Proces ten przyczynia się bowiem do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz sekwestracji węgla w glebie, dzięki możliwościom aplikacji pofermentu jako naturalnego nawozu w rolnictwie [3].

Istotnym aspektem wpływającym na przebieg procesu jest konstrukcja bioreaktora, w którym odbywają się zachodzące po sobie etapy fermentacji. Obejmują one hydrolizę, acidogenezę, acetogenezę oraz metanogenezę. Jak już wspomniano, bardzo istotnym zagadnieniem podczas eksploatacji bioreaktorów jest zapewnienie stabilności procesu oraz kontrola parametrów fizycznych, w tym temperatury. Ponadto bioreaktor powinien być wykonany z materiału odpornego na korozję i jednocześnie zapewniającego bezpieczeństwo użytkowania. Jak wskazuje Andlar i in. [1], przy wyborze reaktora nie należy zapominać o kwestiach ekonomicznych, takich jak koszty budowy, eksploatacji i konserwacji. Produkcja biogazu powinna być ekonomicznie opłacalna, tak aby uzyskane produkty można było z łatwością zagospodarować. Przykładowymi typami reaktorów stosowanych w produkcji biogazu są beztlenowy reaktor sekwencyjny wsadowy (ang. anaerobic sequencing batch reactor, ASBR), reaktor zbiornikowy z ciągłym mieszaniem (ang. continuous stirred tank reactor, CSTR) oraz beztlenowy bioreaktor z płaszczem osadowym (ang. up-flow anaerobic sludge blanket, UASB).

Prosta budowa reaktora ASBR pozwala na prowadzenie procesu w systemie wsadowym. Substrat jest dozowany do reaktora, gdzie odbywa się proces konwersji do biogazu, sedymentacja osadu pofermentacyjnego, a następnie substrat zostaje odprowadzony z systemu [22]. Niewątpliwymi zaletami wykorzystania tego typu reaktora jest łatwość obsługi oraz niskie koszty budowy. Z kolei jako wady wymienić należy niską efektywność przy wyższych objętościach wsadów wynikającą z ograniczonego kontaktu mikroorganizmów z substratami. Reaktor zbiornikowy z ciągłym mieszaniem (CSTR) jest natomiast odpowiedni do pracy w systemie ciągłym i okresowym. Systemy mieszania obejmują mieszanie mechaniczne, hydrauliczne oraz pneumatyczne. CSTR jest powszechnie stosowany w fermentacji mokrej [2]. Eksploatacja tego typu reaktora cechuje się również dużą elastycznością w zakresie dostosowania parametrów pracy, takich jak temperatura procesu czy

obciążenie organiczne (OLR). Niemniej jednak, należy odpowiednio dostosować czas retencji hydraulicznej (HRT) oraz czas retencji osadów lub biomasy (SRT). Wysokowydajnym reaktorem jest bioreaktor UASB wykorzystujący zjawisko grawitacji oraz przepływu substratu w górę reaktora przez złożo ziarniste mikroorganizmów, dzięki czemu nie jest konieczne wprowadzenie dodatkowego systemu mieszania. Niemniej jednak, technologia ta jest rzadko spotykana w klasycznych biogazowniach rolniczych, co wynika z wymagań pracy reaktora przy niskiej zawartości suchej masy [17].

Technologie oczyszczania i uszlachetniania biogazu

Biogaz, który jest wytwarzany w procesie fermentacji metanowej zawiera znaczące ilości dwutlenku węgla, mogące sięgać nawet do 50% objętości uzyskanej mieszaniny gazów. Zarówno CO_2 , jak i inne gazy, takie jak: siarkowodor, amoniak, siloksany oraz para wodna, stanowią główne zanieczyszczenia biogazu, które wymagają odpowiednich metod usuwania [20]. Celem jest uszlachetnienie biogazu do biometanu, zawierającego do 99% objętości CH_4 [19]. Uzyskanie biometanu pozwala na zwiększenie wartości opałowej biogazu do około 35-39 MJ/m³, czyli ilości równej wartości opałowej gazu ziemnego. Skuteczne technologie oczyszczania i uzdatniania biogazu przyczyniają się do zwiększenia możliwości wykorzystania tego produktu fermentacji w transporcie i energetyce.

Najczęściej stosowane technologie oczyszczania biogazu obejmują procesy oparte na absorpcji, adsorpcji, wykorzystaniu membran, jak również procesy biologiczne [19]. Wybór technologii oczyszczania zależy od objętości oraz składu biogazu wytwarzanego w procesie fermentacji metanowej, wymaganego stopnia usunięcia zanieczyszczeń, planowanego wykorzystania oczyszczonego biogazu oraz warunków operacyjnych.

W celu usunięcia siarkowodoru powodującego awarie eksploatacyjne, takie jak korozja części mechanicznych oraz awarie układu konwersji energetycznej [12], stosuje się zarówno metody in-situ jak i ex-situ. Metodą in-situ jest mikroaeracja, z kolei wśród metod ex-situ wymienia się technologie biologiczne oraz fizykochemiczne. Metody biologiczne obejmują wykorzystanie organizmów żywych, w tym m.in. bakterii fotoautotroficznych i chemilitotroficznych tworzących biofilm na złożach filtracyjnych, dzięki czemu

możliwe jest utlenianie H₂S. Do utlenienia siarkowodoru na drodze biologicznej stosowane są zarówno biofiltry proste, zraszane jak i bioskrubery. Przykładowo Ibrahim i in. [10], zastosowali system filtrów zraszanych biologicznie, dzięki któremu stężenie siarkowodoru w biogazie po oczyszczeniu zmalało nawet do 97% bez strat zawartości metanu. Należy pamiętać, że technologie, w których podstawową rolę odgrywają mikroorganizmy (bakterie, mikroalgi, itp.) wymagają stałej kontroli warunków procesu oraz są czasochłonne [25]. Metody fizykochemiczne oczyszczania zostały przedstawione w tabeli 1.

Tabela 1. Zestawienie metod fizykochemicznych stosowanych w oczyszczaniu biogazu z H₂S
Table 1. Summary of physicochemical methods used in the purification of biogas from H₂S

Metody	Technologia oczyszczania	Przykładowe materiały/procesy stosowane w danej metodzie	Wady	Zalety
Fizyczne	Adsorpcja fizyczna, adsorpcja reaktywna, chemisorpcja	Biówęgiel, hydrowęgiel, węgiel aktywny, grafen, nanorurki węglowe	1) Ograniczona pojemność sorpcyjna 2) Różnice w selektywności sorbentów	1) Ekonomicznie opłacalne – niskie zużycie energii 2) Prosta prowadzenia procesu 3) Łatwość integracji z istniejącymi instalacjami
Chemiczne	Absorpcja chemiczna, mycie wodne	Roztwory aminowe, wodorotlenki metali, tlenki metali, roztwory kwasów	1) Wyższe zużycie energii 2) Koszty odczynników	1) Duża selektywność w usuwaniu siarkowodoru 2) Możliwość ciągłej pracy 3) Efektywność w usuwaniu H ₂ S i CO ₂
Elektrochemiczne	Elektroliza, bioelektrochemiczne usuwanie H ₂ S	Elektrody węglowe, systemy bioelektrochemiczne	1) Wysokie zużycie energii 2) Koszty instalacyjne	1) Wysoka precyzja kontroli procesu 2) Wysoka efektywność oczyszczania
Membranowe	Separacja membranowa	Membrany polimerowe, np. polimery szkliste i gumowe, membrany ceramiczne, membrany hybrydowe	1) Wysoki koszt membran 2) Ograniczona trwałość	1) Brak konieczności użycia związków chemicznych 2) Wysoka czystość uzyskanego biometanu 3) Kompaktowa konstrukcja 4) Możliwość łączenia technologii z innymi metodami oczyszczania

Szczególne znaczenie ma obecnie rozwój technologii oczyszczania opartej na zastosowaniu bezpiecznych środków, takich jak biowęgiel oraz hydrowęgiel. Biowęgiel jest produktem pirolizy lub zgazowania, z kolei hydrowęgiel powstaje w wyniku hydrotermalnego przetwarzania biomasy, w tym m.in. karbonizacji hydrotermalnej. Co więcej, biowęgiel można impregnować żelazem, co dodatkowo zwiększa pojemność adsorpcji H₂S prawie czterokrotnie w porównaniu do biowęglu bez impregnacji [6].

Bardzo powszechnym rozwiązaniem w skali przemysłowej okazuje się stosowanie membran. Mimo tego, iż metoda ta jest obecnie często spotykana, wciąż usprawniane są procesy separacji H₂S z wykorzystaniem dodatkowych adsorbentów. Dowiedziono, iż stosowanie modułu membranowego ePTFE-HFH z dodatkiem wodorotlenku sodu jako adsorbenta, powoduje zwiększenie sprawności usuwania siarkowodoru nawet do 100% [25]. Ponadto separację membranową można

z powodzeniem łączyć z innymi technologiami oczyszczania. Przykładowo Dussadee i in. [7], potwierdzili skuteczność oczyszczania biogazu z siarkowodoru i dwutlenku węgla z wykorzystaniem membran z octanu celulozy, absorpcją na węglu aktywnym oraz sitami molekularnymi. Zawartość CH₄ w biogazie finalnie wzrosła nawet do 90%.

Uszlachetnianie biogazu (ang. biogas upgrading) wymaga efektywnych technologii usuwania CO₂. Jedną z nich jest biokonwersja wspomagana wodorem. Technologia ta polega na sekwestracji dwutlenku węgla z wykorzystaniem H₂,

oczyszczania są łatwość w użyciu, ekonomiczność oraz możliwość regeneracji reagentów [23]. Uszlachetnianie biogazu rozszerza możliwości jego późniejszego wykorzystania w transporcie oraz jako biometanu w sieciach gazowych.

Analiza technologii oraz perspektywy rozwoju rynku biogazu w warunkach polskich

Kwestie dotyczące produkcji biogazu w Polsce regulują odpowiednie przepisy oraz pojawiają się one w planach dotyczących polityki energetycznej i ekologicznej państwa na kolejne lata. Zgodnie z „Ustawą z dnia 13 lipca 2023 r. o ułatwieniach w przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie biogazowni rolniczych, a także ich funkcjonowaniu” (Dz. U. 2023 poz. 1597) [24], biogazownie rolnicze powinny spełniać określone wymagania w zależności od kierunku wykrzystania biogazu (tabela 2).

Tabela 2. Wymagania dla biogazowni rolniczych w zakresie wytwarzania energii elektrycznej, ciepła, biogazu rolniczego oraz biometanu w Polsce (Dz. U. 2023 poz. 1597) [24]

Table 2. Requirements for agricultural biogas plants in the scope of production of electricity, heat, agricultural biogas and biomethane in Poland (Journal of Laws of 2023, item 1597) [24]

Przedmiot działalności biogazowni rolniczej	Wymagania projektowe i eksploatacyjne
Produkcja energii elektrycznej	Łączna moc zainstalowana elektryczna nie większa niż 3,5 MW
Produkcja ciepła	Łączna moc cieplna w skojarzeniu nie większa niż 10,5 MW
Produkcja biogazu rolniczego	Roczna wydajność produkcji biogazu rolniczego do 14 mln m ³
Produkcja biometanu	Roczna wydajność produkcji biometanu z biogazu rolniczego do 8,4 mln m ³

Obecnie w Polsce, głównym kierunkiem zagospodarowania uzyskanego biogazu jest wykorzystanie go w skojarzonych systemach produkcji energii elektrycznej i ciepła, czyli w układach kogeneracyjnych. Pozwala to na oszczędność w eksploatacji zasobów naturalnych [5]. Wytwarzane ciepło jest często wykorzystywane lokalnie na potrzeby biogazowni oraz do ogrzewania pobliskich miejscowości. Przyszłościowe okazuje się stosowanie kogeneracji rozproszonej – o rozproszonej mocy dostosowanej do lokalnych potrzeb. Co istotne, wyniki ankiety [18], wskazują że rozwój wytwarzania skojarzonego ciepła i energii elektrycznej w kogeneracji gazowej, w tym opartej na

powstałym w wyniku elektrolizy wody. Energia niezbędna w procesie może być pozyskiwana z nadwyżek energii ze źródeł odnawialnych, między innymi energii słonecznej i wiatrowej, co wpisuje się w założenia obiegu zamkniętego [26]. Innym sposobem usunięcia dwutlenku węgla jest mineralna karbonatyzacja. Jest to proces chemiczny bazujący na wykorzystaniu związków mineralnych, głównie węglanów, takich jak CaCO₃ oraz MgCO₃. Źródłem wapnia lub magnezu mogą być także odpady przemysłowe, w tym popioły i żużle. Wiązanie dwutlenku węgla jest trwałe, co pozwala na efektywne usunięcie go z biogazu. Pomimo, że technologia ta nie jest obecnie stosowana w biogazowniach na skalę przemysłową, uznaje się ją za rozwiązanie perspektywiczne. Mineralna karbonatyzacja CO₂ wciąż znajduje się na etapie badań i wdrożeń pilotażowych, wymagając dalszego rozwoju i optymalizacji procesu. Istotnymi aspektami, które należy wziąć pod uwagę w wyborze technologii

biogazie i wodorze, jest postrzegany jako pożądany kierunek transformacji energetycznej w Polsce. Rozwiązanie to zyskuje społeczną akceptację i uznawane jest za perspektywiczne z punktu widzenia lokalnych uwarunkowań. Przetworzony biogaz może także znaleźć swoje zastosowanie w transporcie, jako biogaz oczyszczony i sprężony w postaci bio-CNG oraz biogaz po skropleniu – bio-LNG. Niemniej jednak w Polsce jest to wciąż niskowy kierunek zagospodarowania oczyszczonego biogazu. Wynika to z wysokich kosztów oczyszczania i uszlachetniania biogazu, braku rozwiniętej infrastruktury tankowania wytworzonych biopaliw oraz obowiązujących przepisów i niewystarczającej skali rynku.

Polska dysponuje znacznymi możliwościami wytwarzania biogazu, głównie ze względu na dużą dostępność odpowiednich substratów. W ubiegłym roku głównymi surowcami wykorzystywanymi na potrzeby produkcji biogazu w biogazowniach rolniczych w Polsce według wykazu Krajowego Ośrodka Wsparcia Rolnictwa [13] były:

- wywar pogorzelniany w ilości 1 523 236,934 ton,
- pozostałości z owoców i warzyw w ilości 1 217 709,640 ton,
- gnojowica w ilości 1 193 131,508 ton,
- odpady z przetwórstwa spożywczego w ilości 1 010 413,079 ton,

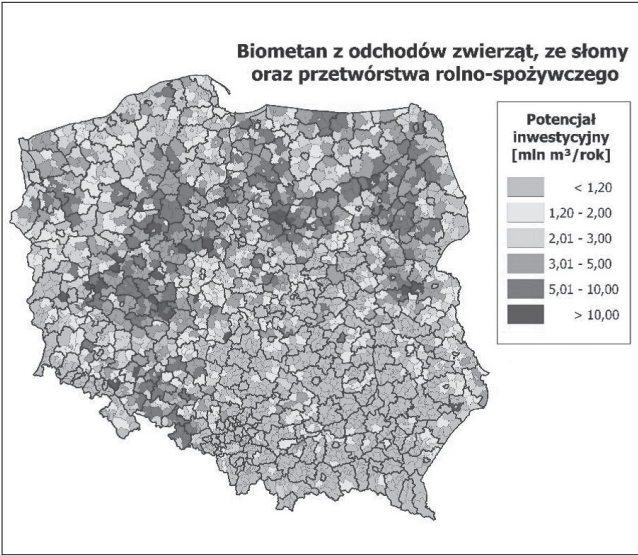
- kiszonka z kukurydzy w ilości 576 744,680 ton.

Pod względem potencjału produkcyjnego, Polska należy do pięciu państw Unii Europejskiej o największych zasobach w tym zakresie. Szacuje się, że roczna zdolność krajowych instalacji do wytwarzania biometanu mogłaby przekroczyć 2 mln m³ netto. Głównym źródłem surowców do jego produkcji pozostają odpady i pozostałości pochodzenia rolniczego (rys. 1).

Do inwestycji w odnawialne źródła energii przyczyniają się także pojawiające się normy i plany transformacji energetycznej. Polska jest wciąż na wczesnych etapach rozwoju technologii produkcji biogazu. Niemniej jednak, zważywszy na potrzeby rynkowe, w najbliższych latach można spodziewać się wzrostu zarówno ilości oddawanych do eksploatacji biogazowni, jak również wdrażania nowoczesnych technologii produkcji, oczyszczania oraz zagospodarowania biogazu i substancji pofermentacyjnej. Wyzwaniem związanym z fermentacją metanową w skali przemysłowej jest uszlachetnianie biogazu do jakości biometanu oraz późniejsze jego włączanie do sieci. Barierek ekonomiczną w warunkach polskich okazują się wyższe koszty produkcji i wykorzystania biometanu w porównaniu do zakupu gazu ziemnego. Ponadto regulacje w zakresie włączania gazu oczyszczonego

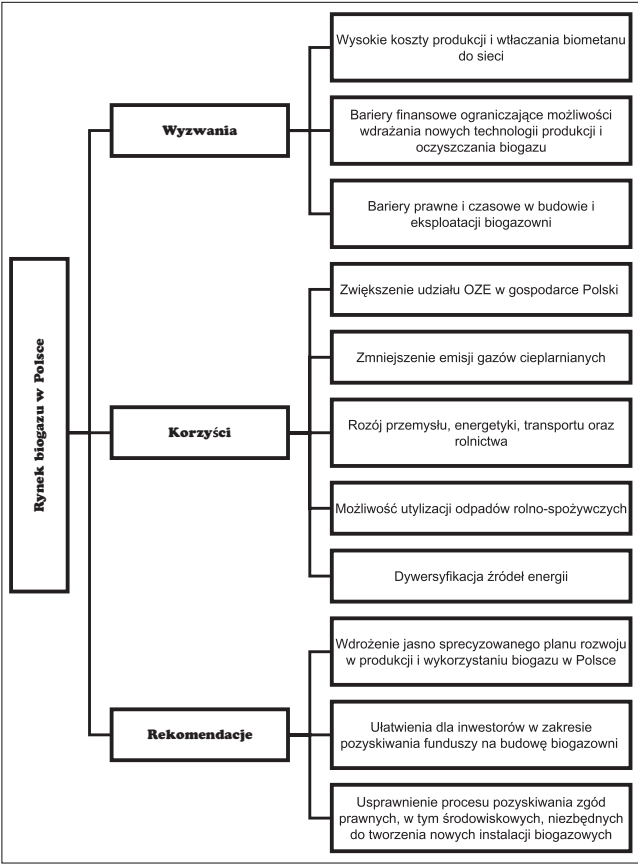
do jakości biometanu do sieci obowiązujące inwestorów nie są przystosowane do obecnej sytuacji rynkowej i technologicznej. Innym wyzwaniem jest ograniczenie wykorzystywania niektórych substratów w biogazowniach rolniczych w Polsce. Zakaz dotyczy między innymi ulegających biodegradacji odpadów kuchennych oraz opadów z parków i ogrodów [15].

Jednakże aspekty środowiskowe i społeczne przemawiają na korzyść biogazu oraz biometanu. Jednym z kluczowych elementów Polityki Energetycznej Polski do 2040 r. [27] jest redukcja emisji gazów cieplarnianych o około 30% do 2030 roku w porównaniu do 1990 roku. Z kolei według Dyrektywy RED III (Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/2413 z dnia 18 października 2023 r.) [8] pośrednim celem wyznaczonym dla Unii jest ograniczenie emisji gazów cieplarnianych do 2030 r. o co najmniej 55% w porównaniu do 1990 r. Co więcej, Dyrektywa RED III zakłada zwiększenie zużycia energii ze źródeł odnawialnych brutto do co najmniej 42,5% w państwach członkowskich UE. W osiągnięciu tych celów istotną rolę mają odegrać surowce odnawialne, w tym biomasę. Popyt na produkty naftowe w Polsce powinien zostać pokryty przez paliwa alternatywne, takie jak wodór, biometan, LNG oraz CNG, co w rezultacie ograniczy emisyjność paliw kopalnych.



Rysunek 1. Potencjał inwestycyjny biometanu pozyskiwanego z wybranych substratów – odchodów zwierzęcych, słomy oraz odpadów przetwórstwa rolno-spożywczego [14]
Figure 1. Investment potential of biomethane obtained from selected substrates – animal manure, straw and agri-food processing waste [14]

Rysunek 2. Wyzwania, korzyści oraz rekomendacje dotyczące rozwoju rynku biogazu w Polsce (opracowanie własne)
Figure 2. Challenges, benefits and recommendations for the development of the biogas market in Poland (own study)



Niemniej, aby to osiągnąć, rynek biogazu w Polsce wymaga wdrażania konkretnych działań ukierunkowanych na eliminację istniejących barier (rysunek 2).

W Polsce dominującym rodzajem procesu wytwarzania biogazu jest fermentacja mokra, prowadzona najczęściej w warunkach mezofilowych. Przykładem biogazowni wykorzystującej tę technologię jest Zielona Energia Michałowo Sp. z o.o., w której głównym substratem jest kiszonka kukurydzy. Wytwarzany biogaz jest spalany w układzie kogeneracyjnym, co pozwala na pokrycie w 100% zapotrzebowania energetycznego instalacji. Podobnie funkcjonuje biogazownia należąca do Rolniczo-Sadowniczego Gospodarstwa Doświadczalnego w Przybrodzie. Fermentacja mezofilowa wspomagana jest akceleratorem biotechnologicznym służącym do ujednorodnienia i hydrolizy substratów. W ramach gospodarki o obiegu zamkniętym poferment wykorzystywany jest jako nawóz w gospodarstwie. Z kolei Regionalne Centrum Gospodarki Wodno-Ściekowej S.A. (RCGW) w Tychach, reprezentujące sektor biogazu komunalnego, prowadzi proces fermentacji z wykorzystaniem osadów ściekowych i odpadów przemysłowych. W skład instalacji wchodzi także system oczyszczania biogazu, w którym stosuje się absorbery odsiarczające oparte na rudzie darniowej oraz technologię wykorzystującą ścieki oczyszczone jako absorber CO₂. Biogaz po procesie uzdatniania jest poddawany procesowi usunięcia wilgoci w skruberze w stacji oczyszczania. Z kolei przykładem instalacji stosującej fermentację suchą w Polsce jest Zakład Unieszkodliwiania Odpadów – Przedsiębiorstwo Gospodarki Odpadami Sp. z o.o. w Promniku. Fermentacja sucha odpadów zielonych oraz frakcji biodegradowalnej wydzielonej ze zmieszanych odpadów komunalnych odbywa się w dwóch komorach fermentacyjnych [4].

Najbardziej powszechnymi technologiami oczyszczania biogazu w biogazowniach rolniczych w Polsce są obecnie procesy polegające na odsiarczaniu oraz osuszaniu biogazu [9]. Są to procesy podstawowe, wymagane przy późniejszym wykorzystaniu biogazu w kogeneracji. Ponieważ krajowy biogaz jest w przeważającej części spalany w silnikach kogeneracyjnych, nie istnieje konieczność uzyskiwania wysokiej zawartości metanu, co umożliwia stosowanie instalacji o stosunkowo niskich kosztach inwestycyjnych w porównaniu do technologii służących produkcji biometanu. Ograniczenia w istniejącej infrastrukturze gazowej oraz brak

rozwiniętych instalacji biometanowych dodatkowo utrudniają rozwój zaawansowanych technologii oczyszczania.

W 2025 roku, we wrześniu uruchomiono w Polsce pierwszą komercyjną biometanownię [21], co dało początek nowym wyzwaniom ekologicznym w tym kierunku. W związku z tym, w nowych inwestycjach wskazane jest projektowanie instalacji w taki sposób, aby umożliwić zarówno wytwarzanie biometanu, jak i jego późniejsze włączenie do sieci gazowej. Perspektywiczne pozostają nowoczesne technologie oczyszczania biogazu, których znaczenie będzie rosło wraz z rozwojem rynku biometanu w Polsce.

Podsumowanie

Pomimo rosnącego zapotrzebowania na odnawialne źródła energii, w tym na biometan, w Polsce wciąż brakuje wystarczającej liczby instalacji zajmujących się wytwarzaniem biogazu i jego uszlachetnianiem. Taki stan rzeczy wynika z szeregu czynników – finansowych, prawnych oraz społecznych. Dla zwiększenia krajowej produkcji biogazu, której potencjał uznaje się za wysoki, konieczna jest identyfikacja barier ograniczających rozwój rynku, w tym problemów natury legislacyjnej i administracyjnej związanych z uzyskiwaniem pozwoleń inwestycyjnych, jak również systemów wsparcia dla inwestorów. Jest to szczególnie istotne w kontekście transformacji energetycznej oraz zwiększenia bezpieczeństwa i niezależności energetycznej kraju.

Istotnym aspektem pozostaje także rozbudowa krajowej sieci gazowej, umożliwiającej włączenie biometanu do systemu przesyłowego, co powinno być jednym z kluczowych kierunków rozwoju infrastruktury energetycznej. Równolegle należy prowadzić badania nad efektywnymi technologiami oczyszczania biogazu, pozwalającymi na zwiększenie wartości opałowej gazu oraz dostosowanie go do wymogów jakościowych biometanu.

W Polsce dominującym surowcem do produkcji biogazu są odpady rolnicze i zwierzęce, dlatego szczególnego znaczenia nabiera zagospodarowanie pofermentu jako nawozu organicznego. Z uwagi na rosnącą liczbę biogazowni rolniczych, ten kierunek wydaje się szczególnie perspektywiczny. Chociaż obecnie w Polsce przeważają instalacje wykorzystujące fermentację mezofilową oraz podstawowe systemy odsiarczania biogazu, w dłuższej perspektywie przewiduje się intensyfikację wdrażania nowoczesnych technologii oczyszczania i uszlachetnia-

nia. Rozwój sektora biogazowego stanowi istotny element stabilnego i zrównoważonego systemu energetycznego. Aby Polska mogła osiągnąć poziom rozwoju sektora biogazowego porównywalny z wiodącymi krajami europejskimi, takimi jak Niemcy czy Francja, konieczne są skoordynowane działania międzysektorowe obejmujące rolnictwo, energetykę, gazownictwo i transport.

Źródło finansowania publikacji:

Przygotowanie publikacji zostało sfinansowane z subwencji statutowej Wydziału Infrastruktury i Środowiska Politechniki Częstochowskiej – zadanie nr 6, BS-PB/400/301/25.

WYKAZ LITERATURY:

- [1] Andlar M., Belskaya H., Morzak G., Ivančić Šantek M., Rezić T., Petračić Tominac V., & Šantek B.; Biogas production systems and upgrading technologies: a review; Food technology and biotechnology; 2021; vol. 59(4), pp. 387-412; <https://doi.org/10.17113/ftb.59.04.21.7300>.
- [2] Banerjee S., Prasad N., & Selvaraju S.; Reactor design for biogas production-a short review; Journal of Energy and Power Technology; 2022; vol. 4(1); pp. 1-22; <https://doi.org/10.21926/jept.2201004>.
- [3] Bień B., Grobelak A., Bień J., Sławczyk D., Kozłowski K., Wysokowska K., & Rak M.; Dry Anaerobic Digestion of Selectively Collected Biowaste: Technological Advances, Process Optimization and Energy Recovery Perspectives; Energies; 2025; vol. 18(17); 4475; str. 1-35; <https://doi.org/10.3390/en18174475>.
- [4] Bojanowicz-Babłok A., Horak N., Kuśmierz A., Potapowicz I., Eidsmo S., Grandum L.; Katalog dobrych praktyk w produkcji biogazu; Instytut Ochrony Środowiska – Państwowy Instytut Badawczy; 2024; str. 1-11; ISBN 978-83-966110-7-9.
- [5] Chmielewski, A.; Analiza techniczno-ekonomiczna wykorzystania biogazu rolniczego; Gaz, Woda i Technika Sanitarna; 2024; 11; 151617; str. 28, 29; <https://doi.org/10.15199/17.2024.11.5>.
- [6] Choudhury A., & Lansing S.; Adsorption of hydrogen sulfide in biogas using a novel iron-impregnated biochar scrubbing system; Journal of Environmental Chemical Engineering; 2021; vol. 9(1); 104837; pp. 1-8; <https://doi.org/10.1016/j.jece.2020.104837>.
- [7] Dussadee N., Reansuwan K., Ramaraj R., & Unpaprom Y.; Removal of CO₂ and H₂S from biogas and enhanced compressed bio-methane gas production from swine manure and elephant grass; Maejo International Journal of Energy and Environmental Communication; 2022; vol. 4(3); pp. 39-46; ISSN: 2673-0537.
- [8] Dziennik Urzędowy Unii Europejskiej „Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2023/2413 z dnia 18 października 2023 r. zmieniająca dyrektywę (UE) 2018/2001, rozporządzenie (UE) 2018/1999 i dyrektywę 98/70/WE w odniesieniu do promowania energii ze źródeł odnawialnych oraz uchylająca dyrektywę Rady (UE) 2015/652” (Dyrektywa RED III), 2023, str. 1, 26.
- [9] HOLEWA-RATAJ J., & KUKULSKA-ZAJĄC E.; Biogaz rolniczy w Polsce – produkcja i możliwości wykorzystania. Nafta-Gaz, 2022; 78; str. 872-876; <https://doi.org/10.18668/NG.2022.12.03>.

- [10] Ibrahim R., El Hassni A., Navaee-Ardeh S., & Cabana H.; Biological elimination of a high concentration of hydrogen sulfide from landfill biogas; *Environmental Science and Pollution Research*; 2022; vol. 29(1); pp. 431-443; <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-312009/v1>.
- [11] Kabeyi, M.J.B., & Olanrewaju, O.A.; Biogas production and applications in the sustainable energy transition; *Journal of Energy*; 2022; vol. 2022(1); ID: 8750221; pp. 1-38; <https://doi.org/10.1155/2022/8750221>.
- [12] Kasulla S., Malik S.J., Zafar S., & Saraf A.; A Retrospection of hydrogen sulphide removal technologies in biogas purification; *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*; 2021; vol. 5(3); pp. 857-863; ISSN: 2456-6470.
- [13] Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa; Wykaz surowców zużytych do produkcji biogazu rolniczego w latach 2011-2024; 2025; <https://www.gov.pl/web/kowr/dane-dotyczace-dzialalnosci-wytworcow-biogazu-rolniczego> data dostępu: 05.10.2025.
- [14] Krasuska E., Waliszewska H., Krzyński M., Lenart K., Popkiewicz M., Raciński W.; Realny potencjał produkcji biometanu w Polsce. Opracowanie na potrzeby Symulatora Polskiego Systemu Energetycznego. Wersja z dn. 20.05.2024 r.; Narodowe Centrum Badań i Rozwoju; 2024; str. 1-25.
- [15] Magazyn Biomasa; Biogaz i biometan w Polsce 2024; str. 1-57; <https://magazynbiomasa.pl/pobierz-raport-biogaz-i-biometan-w-polsce-2024/>.
- [16] Magazyn Biomasa, KOWR podsumowuje biogaz rolniczy w 2024 r. 179 instalacji wytworzyło 167,3 MW mocy, <https://magazynbiomasa.pl/kowr-podsumowuje-biogaz-rolniczy-w-2024-r-179-instalacji-wytworzylo-1673-mw-mocy/> data dostępu: 05.10.2025
- [17] Ngwenya N., Gaszynski C., & Ikumi D.; A review of winery wastewater treatment: A focus on UASB biotechnology optimisation and recovery strategies; *Journal of Environmental Chemical Engineering*; 2022; vol. 10(4); 108172; pp. 1-8; <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108172>.
- [18] Niestępska M.; Priorytety likwidacji barier prawnych w energetycznej transformacji ciepłownictwa w ocenie branży ciepłowników i przedstawicieli regulatora; *Instal*; 2025; No 4 2025; str. 16; <https://doi.org/10.36119/15.2025.4.1>.
- [19] Pavičić J., Novak Mavar K., Brkić V., & Simon, K.; Biogas and biomethane production and usage: technology development, advantages and challenges in Europe; *Energies*; 2022; vol. 15(8); 2940; str. 1-26; <https://doi.org/10.3390/en15082940>.
- [20] Poproch D., Cimochoiewicz-Rybicka M., Górka J., & tuszczek B.; Gospodarka osadami ściekowymi w miejskiej oczyszczalni ścieków; *Instal*; 2022; No 10 (444); str. 47, 48; <https://doi.org/10.36119/15.2022.10.6>.
- [21] PSG, Polska Spółka Gazownictwa; <https://www.psgaz.pl/aktualnosci/pierwsza-w-kraju-biometanownia-przylaczona-do-sieci-gazowej>; data dostępu: 20.10.2025.
- [22] Ramos J.G.V.D.S., Richter C.P., Silva M.A., Singolano G.L., Hauagge G., Lorençon E., Junior I.L.C., Edwiges T., de Arruda P.V., & Vidal C.M.D.S.; Effects of ciprofloxacin on biogas production and microbial community composition in anaerobic digestion of swine wastewater in ASBR type reactor; *Environmental Technology*; 2024; vol. 45(10); pp. 2076-2088; <https://doi.org/10.1080/09593330.2022.2164744>.
- [23] Rusanowska P., Zieliński M., & Dębowski M.; Removal of CO₂ from biogas during mineral carbonation with waste materials; *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2023; vol. 20(9); 5687; pp. 1-5; <https://doi.org/10.3390/ijerph20095687>.
- [24] Ustawa z dnia 13 lipca 2023 r. o ulatwieniach w przygotowaniu i realizacji inwestycji w zakresie biogazowni rolniczych, a także ich funkcjonowaniu (Dz. U. 2023 poz. 1597), str. 1-21.
- [25] Vuppaladadiyam A.K., Jena M.J., Hakeem I.G., Patel S., Veluswamy G., Thulasiraman A.V., Surapaneni A., & Shah K.; A critical review of biochar versus hydrochar and their application for H₂S removal from biogas; *Rev. Environ. Sci. Biotechnol.*; Springer; 2024; vol. 23; pp. 699-737; <https://doi.org/10.1007/s11157-024-09700-8>.
- [26] Wu L., Wei W., Song L., Woźniak-Karczewska M., Chrzanowski Ł., & Ni B. J.; Upgrading biogas produced in anaerobic digestion: Biological removal and bioconversion of CO₂ in biogas; *Renewable and Sustainable Energy Reviews*; 2021; 150; 111448; pp. 1, 2; <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111448>.
- [27] Załącznik do uchwały nr 22/2021 Rady Ministrów z dnia 2 lutego 2021 r. „Polityka Energetyczna Polski do 2040 r.”, Ministerstwo Klimatu i Środowiska, Warszawa 2021, str. 7-10.