

Grzegorz Dzieniszewski¹✉, Damian Jasiejko²

¹ Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu, Politechnika Rzeszowska

² Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu

Ocena wpływu utylizacji bioodpadów metodą spalania w silnikach tłokowych na ograniczenie negatywnego oddziaływania na środowisko z perspektywy łańcucha logistycznego produkcji biogazu

Assessment of the environmental impact reduction from the utilization of bio-waste via combustion in reciprocating engines from the perspective of the biogas production logistics chain

Synopsis. Celem artykułu jest ocena wpływu organizacji łańcucha logistycznego bioodpadów i substratów pochodzenia zwierzęcego na oddziaływanie środowiskowe instalacji biogazowej wykorzystującej biogaz w układzie kogeneracyjnym z silnikiem tłokowym. Zastosowano podejście procesowe „od logistyki do CHP”, w ramach którego procesy gromadzenia, transportu, magazynowania i przygotowania wsadu są analizowane jako czynniki kształtujące jakość paliwa biogazowego oraz warunki pracy jednostki kogeneracyjnej. Wskazano mechanizmy, przez które zmienność i degradacja wsadu na etapach logistycznych mogą przekładać się na stabilność produkcji biogazu oraz na parametry spalania, w tym emisje regulowane i istotne technologicznie dla silników biogazowych (NO_x , CO, związki organiczne/THC oraz metan niespalony). Omówiono również wymagania dotyczące normalizacji warunków odniesienia i interpretacji wyników emisji dla średnich źródeł spalania. Wyniki zestawiono w postaci kryteriów zarządczych i działań operacyjnych, które łączą reżim jakości logistyki (szczelność, czas retencji, homogenizacja i stabilizacja surowca) z utrzymaniem stabilnej pracy CHP i wysokiej sprawności wykorzystania energii oraz ograniczaniem oddziaływań środowiskowych.

✉ **Grzegorz Dzieniszewski** – Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu, Instytut Nauk Technicznych; Politechnika Rzeszowska, Wydział Mechaniczno-Technologiczny; e-mail: g.dzieniszewski@pansp.pl; <https://orcid.org/0000-0002-2712-1131>

Damian Jasiejko – Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu, Instytut Nauk Technicznych; e-mail: d.jasiejko@s.pansp.pl

Słowa kluczowe: kogeneracja (CHP), silnik tłokowy, metan niespalony, normalizacja emisji, MCP

Abstract. This paper assesses how the logistics chain of animal-derived bio-waste and feedstocks affects the environmental performance of biogas production and its utilization in a combined heat and power (CHP) unit based on a reciprocating engine. A process-oriented “logistics-to-CHP” framework is applied, where collection, transport, storage, and pre-treatment are treated as factors shaping biogas fuel quality and CHP operating conditions. The study highlights mechanisms by which logistics-driven variability and degradation of feedstock may influence biogas yield stability and combustion behavior, including compliance-relevant and technology-critical emissions from biogas engines (NO_x , CO, organic compounds/THC and methane slip). Emission interpretation is discussed with respect to reference-condition normalization and regulatory context for medium combustion plants. Results are summarized as operational criteria and management measures linking logistics quality control (tightness, residence time, homogenization, and stabilization) with stable CHP operation, high energy-use efficiency, and reduced environmental impacts.

Keywords: CHP, reciprocating engine, methane slip, emission normalization, MCP

Kody JEL: Q42, Q53, Q56, L91, R41

Wstęp

Utylizacja bioodpadów pochodzenia zwierzęcego stanowi jedno z kluczowych wyzwań gospodarki o obiegu zamkniętym w sektorze rolno-spożywczym. Odpady takie jak gnojowica, obornik, odpady poubojowe czy frakcje poprodukcyjne charakteryzują się znaczną zmiennością składu, podatnością na rozkład biologiczny oraz potencjałem do generowania emisji odorów i gazów cieplarnianych w przypadku niewłaściwego postępowania. Jednocześnie materia organiczna może zostać przekształcona w nośnik energii w procesie fermentacji beztlenowej, której produktem jest biogaz o zawartości metanu rzędu 55–65% [Żygadło i Madejski 2016].

W praktyce przemysłowej dominującym sposobem zagospodarowania biogazu jest jego wykorzystanie energetyczne w silnikach tłokowych w układzie CHP, tj. skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła. Wysoka sprawność całkowita kogeneracji, osiągana dzięki odzyskowi ciepła ze spalin i układu chłodzenia, tworzy istotną przewagę środowiskową w porównaniu z rozproszonym wytwarzaniem energii elektrycznej i ciepła w oddzielnych źródłach [Podziemska 2005; Olajossy 2008]. Dla biogazowni rolniczych szczególnie ważne jest wykorzystanie ciepła na potrzeby własne procesu oraz w lokalnym otoczeniu. W praktyce oznacza to, że realny efekt ekologiczny zależy nie tylko od sprawności urządzeń wytwórczych, ale także od zdolności systemu do stabilnej pracy w ciągu całego roku oraz ograniczenia strat energii chemicznej w łańcuchu dostaw substratów.

Z perspektywy inżynierii systemów środowiskowych łańcuch logistyczny bioodpadów należy traktować jako obszar generowania zarówno strat energetycznych, jak i emisji procesowych. Dotyczy to zwłaszcza strat metanu wynikających z niekontrolowanej fermentacji w fazie magazynowania, emisji z gospodarki pofermentem oraz degradacji wartości energetycznej substratu spowodowanej niewłaściwym przygotowaniem i składowaniem (np. niewłaściwe kiszenie surowców roślinnych lub zbyt długi czas przechowywania frakcji płynnych) [Liebetrau 2017]. Należy podkreślić, że przykrycie silosu folią ogranicza wypłukiwanie związków organicznych i spadek wartości energetycznej substratu, a związane z tym nakłady zwracają się w krótkim czasie dzięki ograniczeniu strat [Król i in. 2016]

Celem artykułu jest ocena wpływu organizacji i jakości realizacji procesów logistycznych bioodpadów na efektywność ekologiczno-energetyczną układu produkcji biogazu i jego wykorzystania w silniku tłokowym, ze wskazaniem etapów krytycznych i działań optymalizacyjnych. Dodatkowym celem jest ocena wpływu zmienności jakości biogazu na warunki spalania i ryzyko przekroczeń emisji regulowanych (NO_x , CO, THC/ CH_4 slip) w jednostce CHP, interpretowanych dla znormalizowanych warunków odniesienia.

Przegląd literatury

Analiza literatury wskazuje, że środowiskowa ocena biogazowni wymaga uwzględnienia co najmniej trzech grup oddziaływań: (1) korzyści z unieszkodliwienia odpadów i ograniczenia emisji w scenariuszu referencyjnym (np. magazynowanie gnojowicy), (2) emisji procesowych w trakcie wytwarzania biogazu i zagospodarowania pofermentu oraz (3) emisji związanych z wykorzystaniem energetycznym biogazu i zastąpieniem paliw kopalnych. Analiza cyklu życia w odniesieniu do biogazu wykorzystywana jest od wielu lat do oceny bilansu energetycznego i emisyjnego [Berglund i Borjesson 2006], a prace przeglądowe porządkują aktualny stan wiedzy dotyczący kategorii oddziaływań i najczęstszych źródeł niepewności [Paolini 2018].

W ostatnich latach szczególną uwagę zwraca się na emisje metanu w całym łańcuchu biogazowym, bo mimo że występuje on w mniejszych ilościach niż CO_2 , ma znacznie większy potencjał tworzenia efektu cieplarnianego. Aktualne zestawienia współczynników GWP100 dla CH_4 (wg IPCC AR6) są wykorzystywane do przeliczeń jego emisji na ekwiwalent CO_2 i wskazują, że wybór horyzontu czasowego oraz ujęcie sprzężeń klimatyczno-węglowych mają znaczenie dla wyników raportowania [IPCC 2021]. W badaniach empirycznych wykazano, że magazynowanie pofermentu może stanowić istotne źródło emisji CH_4 ; w jednym z szeroko cytowanych pomiarów emisje metanu ze składowania pofermentu osiągnęły poziom odpowiadający ok. 12% produkcji metanu w fermentorze, co jednoznacznie wskazuje na znaczenie gospodarki pofermentem w systemie ograniczania emisji [Baldé 2016]. Autorzy nowszych prac wskazują czynniki emisji zależne od technologii i komponentów instalacji, co wspiera identyfikację „węzłów” o największym potencjale redukcyjnym [Wechselberger 2023].

W literaturze podkreśla się również, że straty metanu mogą powstawać nie tylko w instalacji fermentacyjnej, ale także w strumieniach pomocniczych (odgazowanie, odpowietrzanie, nieszczelności, awaryjne upusty ciśnienia) oraz w obszarze uzdatniania biogazu [Liebetrau 2017]. W ujęciu regulacyjnym ważne są wymagania dotyczące emisji z silników gazowych jako średnich źródeł spalania oraz konieczność utrzymania stężeń zanieczyszczeń w przeliczeniu na znormalizowane warunki odniesienia. Dyrektywa dotycząca średnich źródeł spalania wprowadza wartości graniczne emisji m.in. dla NO_x , a dokumenty interpretacyjne precyzują warunki odniesienia tlenu i parametry normalizacji [Dyrektywa 2015].

Od strony logistycznej literatura i raporty branżowe wskazują, że zawartość suchej masy, stabilność mikrobiologiczna, czas przechowywania i warunki magazynowania wpływają na dostępność frakcji biodegradowalnej i w konsekwencji na uzysk metanu [Angelidaki i Ahring 2000; Curkowski 2011].

Należy również zwrócić uwagę na rolę infrastruktury magazynowej (silosy, zbiorniki na substraty i poferment) oraz na konieczność rozdzielenia substratów o różnej uciążliwości zapachowej i ryzyku emisji. Z perspektywy projektowania instalacji podkreśla się konieczność uwzględnienia dostępności surowca, systemu logistyki transportu oraz lokalnych możliwości wykorzystania ciepła i energii elektrycznej [Grzybek 2024].

Założenia i zakres

Jako jednostkę odniesienia przyjęto 1 kWh energii elektrycznej wytworzonej w układzie CHP. Analizę prowadzono w ujęciu scenariuszowym „od logistyki do CHP”, obejmującym procesy logistyczne substratów, czyli gromadzenie, transport i magazynowanie oraz ich wpływ na emisje transportowe i emisje metanu związane z magazynowaniem i gospodarką pofermentem. Wartości wejściowe przyjęto na podstawie danych i założeń zestawionych w tabeli 1 oraz pokazanych na rysunku 1.

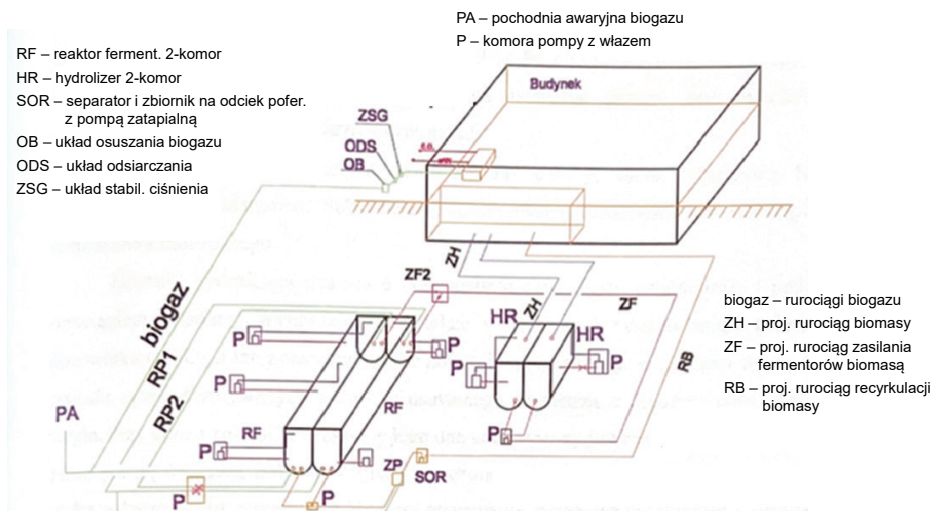
Tabela 1. Zestawienie danych wejściowych i stałych modelu

Table 1. Summary of input data and model constants

Parametr	Wartość	Jednostka
Moc elektryczna układu CHP (kogeneracja)	100,00	kW
Liczba godzin pracy w roku	8 000,00	h/rok
Roczna produkcja energii elektrycznej	800 000,00	kWh/rok
Sprawność elektryczna	0,38	–
Wartość opałowa (LHV) CH_4	9,97	kWh/Nm ³
Gęstość CH_4 (w warunkach normalnych)	0,72	kg/Nm ³
Współczynnik GWP100 dla CH_4	27,20	kg CO_2 e/kg CH_4
Łączna ilość substratów (mieszanina)	3 580,00	t/rok

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration



Rysunek 1. Schemat technologiczny połączenia rurociągów – biogazownia metanova

Figure 1. Technological diagram of pipeline connection – methane biogas plant

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Wzory obliczeniowe:

$$(1) E_{el} = P_{el} \cdot t$$

$$(2) tkm = m \cdot d$$

$$(3) CO_{2trans} = tkm \cdot EF_{trans}$$

$$(4) V_{CH_4,avg} = (V_{CH_4,min} + V_{CH_4,max})/2$$

$$(5) CO_{2e}/kWh = CO_{2etot}/E_{el} \text{ oraz wskaźnik logistyczny } CO_{2e}/t = CO_{2etot}/m_{wsadu}$$

Badanie przeprowadzono w logice analizy systemowej, w której instalacja biogazowa (fermentacja – magazyn biogazu – uzdatnianie – CHP) jest sprzężona z łańcuchem logistycznym dostaw substratów oraz z gospodarką pofermentem.

Jego zakres obejmuje:

- charakterystykę odpadów zwierzęcych (gnojowica, obornik oraz odpady pokrewne) i ich potencjału energetycznego,
- opis łańcucha logistycznego (gromadzenie, transport, magazynowanie, przygotowanie),
- charakterystykę spalania biogazu w silnikach tłokowych wraz z identyfikacją emisji regulowanych i kluczowych emisji procesowych (metan niespalony),

- kryteria oceny środowiskowej (redukcja odpadów, emisje GHG w CO₂e, emisje NO_x i inne zanieczyszczenia),
- analizę scenariuszową pozwalającą wskazać etapy krytyczne i potencjał redukcji.

Charakterystyka substratów i potencjał energetyczny

W artykule skoncentrowano się na substratach typowych dla biogazowni rolniczych, w których dominują odpady zwierzęce, a współsubstraty roślinne lub odpady organiczne pełnią funkcję stabilizującą bilans C/N i zwiększającą produkcję biogazu. Dane literaturowe wskazują, że typowe uzyski biogazu [m³ na tonę świeżej masy] dla gnojowicy bydłowej i świńskiej są istotnie niższe niż dla kiszonek, co uzasadnia łączenie strumieni i zarządzanie portfelem substratów. Przykładowe zestawienia dotyczące praktyki rolniczej podają wartości rzędu 10–20 m³/t dla gnojowicy bydłowej oraz 8–20 m³/t dla gnojowicy świńskiej, przy znacznie wyższych uzyskach dla traw i kiszonek. Jednocześnie skład biogazu i udział metanu zależą od rodzaju substratu i warunków procesu (tab. 2), lecz w ujęciu inżynierskim jako wartość wyjściową do bilansów energetycznych przyjmuje się często typowy zakres 55–65% CH₄ [Liebetrau 2017].

Tabela 2. Potencjał substratów i uzysk metanu

Table 2. Substrate potential and methane yield

Substrat	Ilość [t/rok]	Biogaz min [m ³ /rok]	Biogaz max [m ³ /rok]	CH ₄ min [m ³ /rok]	CH ₄ max [m ³ /rok]	CH ₄ średnio [m ³ /rok]	CH ₄ na tonę [m ³ /t]	CH ₄ na godzinę [m ³ /h]
Kiszonka kukurydzy	300	51 000	60 000	27 540	32 400	29 970	99,90	3,75
Wywar gorzelniany	180	18 000	23 400	9 720	12 636	11 178	62,10	1,40
Wysłodki buraczane	600	102 000	120 000	71 400	84 000	77 700	129,50	9,71
Melasa	500	110 000	125 000	77 000	87 500	82 250	164,50	10,28
Serwatka	2 000	30 000	44 000	15 000	22 000	18 500	9,25	2,31
Mieszanina	3 580	610 000	759 000	200 660	238 536	219 598	61,34	27,45

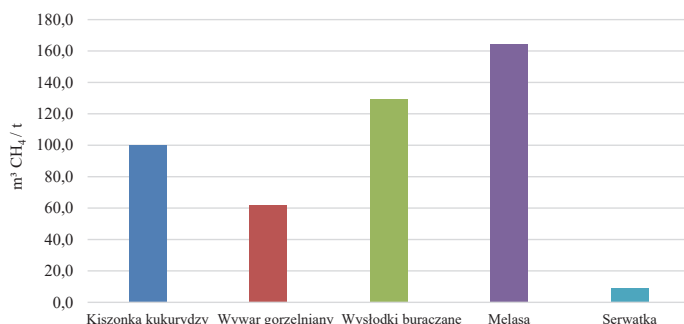
Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Zestawienie potencjału substratów wskazuje, że strumień wsadu charakteryzuje się istotną zmiennością zarówno pod względem ilościowym, jak i energetycznym. W analizowanym zbiorze danych uzysk biogazu i metanu przedstawiono w zakresie min–max, co pozwala uwzględnić naturalne wahania jakości surowca i zmienność warunków dostaw. Wartości przeliczone na jednostkę masy [m³ CH₄/t] stanowią użyteczny wskaźnik logistyczny, ponieważ umożliwiają porównanie „gęstości energetycznej” poszczególnych substratów niezależnie od ich udziału ilościowego. Z punktu widzenia łańcucha logistycznego kluczowe znaczenie ma to, że substraty o wyższym uzysku CH₄/t są bardziej wrażliwe na straty jakości wynikające z magazynowania i opóźnień w dostawie.

wach. Dlatego w praktyce operacyjnej uzasadnione jest priorytetowe traktowanie dostaw substratów o najwyższej „wydajności metanowej” oraz ich możliwie szybkie wprowadzanie do procesu w celu ograniczenia ryzyka spadku produkcji metanu i wahań pracy układu CHP.

Wykres uzysku CH_4 na tonę substratu (rys. 2) obrazuje różnice w potencjale energetycznym wsadów w ujęciu masowym. Taki sposób prezentacji jest szczególnie użyteczny w analizie logistycznej, ponieważ przekłada się bezpośrednio na wymagania transportowe [t/rok], organizację harmonogramu dostaw oraz dobór buforowania. W praktyce umożliwia to identyfikację, które substraty przy tej samej masie przewozu niosą większą „wartość energetyczną” i z tego względu powinny być stabilizowane logistycznie.



Rysunek 2. Uzysk CH_4 na tonę substratu

Figure 2. CH_4 yield per ton of substrate

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Łańcuch logistyczny substratów w biogazowni rolniczej obejmuje kilka ogniw opisanych poniżej.

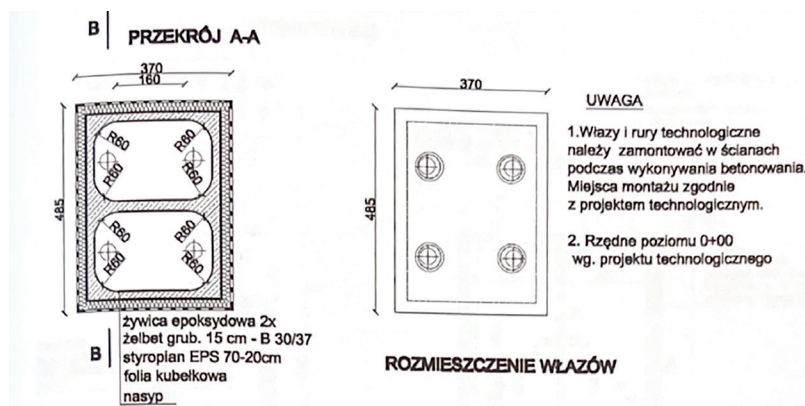
Gromadzenie i wstępna segregacja to etap obejmujący zbiór substratów w gospodarstwach lub zakładach, ocenę jakości i potencjalne rozdzielenie frakcji (np. substraty o wysokiej uciążliwości zapachowej wymagające hermetyzacji). Wyróżnia się jednocześnie obiekty magazynowania substratów o niskiej emisji odorów (np. surowce roślinne w silosach) oraz frakcji bardziej uciążliwych [Liebetrau 2017].

Transport realizowany jest zwykle pojazdem samochodowym w cyklu powtarzalnym, gdzie kluczowe są: odległość, częstotliwość, sezonowość, dopasowanie do przepustowości układu podawania oraz minimalizacja „pustych przebiegów”. Z punktu widzenia oceny systemowej transport stanowi element wpływający na ciągłość i regularność dostaw substratów oraz na powtarzalność składu mieszaniny wsadowej. W konsekwencji jego rola nie ogranicza się do emisji związanych ze zużyciem paliwa, lecz obejmuje również wpływ na stabilność procesu fermentacji i parametry jakości biogazu (zmienność składu i wartości opałowej), co może oddziaływać na warunki pracy jednostki CHP [Siudek 2022].

Magazynowanie jest etapem krytycznym, ponieważ zachodzą tu procesy biologiczne prowadzące do strat frakcji biodegradowalnej oraz emisji. Dla substratów roślinnych

istotne jest prawidłowe kiszenie i ograniczenie dostępu tlenu; w materiałach źródłowych podkreślono, że przykrycie silosu powłoką ogranicza wypłukiwanie związków organicznych i spadek wartości energetycznej [Lima 2017]. Dla frakcji płynnych istotne jest ograniczenie odgazowania i emisji odorów, a dla pofermentu – hermetyzacja lub przynajmniej rozwiązania ograniczające emisję metanu.

Przygotowanie do fermentacji obejmuje rozdrabnianie, homogenizację, ewentualną higienizację, korektę zawartości suchej masy i podawanie do fermentora. Na rysunku 3 pokazano typowy układ hydrolizera i zbiornika mieszającego jako elementów stabilizacji i przygotowywania substratu przed podaniem do komór fermentacyjnych [Bochmann 2014].



Rysunek 3. Hydrolizer dwukomorowy – rzut ogólny i rozmieszczenie włazów

Figure 3. Two-chamber hydrolyzer – plan and arrangement of manholes

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Po odsiarczeniu i odwodnieniu biogaz jest wykorzystywany w agregacie kogeneracyjnym. W literaturze wskazuje się, że biogaz po uzdatnieniu jest konwertowany na energię elektryczną i ciepłą w układzie CHP, a kogeneracja zapewnia bardzo wysoką sprawność całkowitą dzięki odzyskowi ciepła [Podziemska 2005; Olajosy 2008]. W praktyce eksploatacyjnej sprawność elektryczna silników gazowych zależy od mocy jednostki, warunków spalania i jakości paliwa, a sprawność całkowita instalacji CHP od możliwości zagospodarowania ciepła w otoczeniu biogazowni.

Ocena emisji z silnika powinna obejmować co najmniej: NO_x , CO, całkowite węglowodory (THC) lub metan (CH_4 slip), a w razie potrzeby także formaldehyd i związki siarki, w zależności od reżimu prawnego i rodzaju paliwa. Warunki odniesienia dla oceny emisji silników jako źródeł spalania powinny być znormalizowane (temperatura, ciśnienie, zawartość tlenu odniesienia), co wynika z zapisów aktów prawnych dotyczących średnich źródeł spalania [Dyrektywa 2015]. Przyjęto jednostkę kogeneracyjną o mocy 100 kW jako referencyjny przykład do analizy wskaźników emisji i odniesienia 1 kWh energii elektrycznej. Rysunek 4 ma charakter poglądowy i służy zilustrowaniu typu jednostki CHP przyjętej jako referencyjna w analizie scenariuszowej.



Rysunek 4. Widok kogeneratora 100 kW – bez obudowy i w obudowie

Figure 4. View of the 100 kW cogenerator – without and with housing

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

W obliczeniach CO₂e dla metanu wykorzystano współczynniki GWP100 wg zestawień bazujących na IPCC AR6 [IPCC 2021]. Zastosowano cztery grupy kryteriów:

- redukcja strumienia odpadów i ryzyka środowiskowego (ograniczenie emisji odorów, stabilizacja biomasy, ograniczenie patogenów w przypadku higienizacji);
- emisje gazów cieplarnianych w ekwiwalencie CO₂ (CO₂e), z uwzględnieniem dominującej roli metanu;
- emisje zanieczyszczeń do powietrza z silnika (NO_x, CO, CH₄/THC);
- efektywność energetyczna (uzysk biogazu, stabilność produkcji, sprawność wykorzystania energii w CHP).

Wpływ etapów logistyki na jakość surowca i uzysk biogazu

Zmienność jakości substratów w łańcuchu logistycznym ujawnia się przede wszystkim poprzez: (a) wahania zawartości suchej masy, (b) zmiany udziału frakcji łatwo biodegradowalnej (cukry, skrobia) oraz (c) inicjowanie procesów rozkładu w warunkach niekontrolowanych. W przypadku substratów roślinnych kluczowymi mechanizmami degradacji są napowietrzanie przyzmy i wtórna fermentacja tlenowa w strefach szczelności okrycia, co prowadzi do strat energii chemicznej. Ograniczenie wypłukiwania związków organicznych przez wody opadowe i utrzymanie szczelności okrycia to działania, które chronią wartość energetyczną substratu [Lima 2017].

Dla gnojowicy i frakcji płynnych krytyczne są: czas magazynowania, mieszanie i ograniczenie odgazowania. Dłuższe przechowywanie w warunkach sprzyjających procesom beztlenowym w zbiornikach wstępnych może skutkować emisją metanu poza instalacją, czyli utratą paliwa, które powinno zostać przechwycone i wykorzystane energetycznie. Mechanizm ten jest szczególnie istotny w najcieplejszych miesiącach, co potwierdzają badania wskazujące na sezonową koncentrację emisji metanu ze składowania pofermentu i strumieni pokrewnych [Baldé 2016].

W ujęciu operacyjnym oznacza to, że łańcuch logistyczny wpływa na efektywność dwukanałowo: poprzez kanał energetyczny (ile metanu wytworzono i ile utracono przed spalaniem) oraz kanał emisyjny (ile metanu i zanieczyszczeń trafiło do atmosfery na etapach pozapaliwowych).

Analiza scenariuszowa łańcucha logistycznego

W celu ilościowego zobrazowania znaczenia logistyki zastosowano analizę porównawczą trzech scenariuszy organizacji łańcucha dostaw dla instalacji o mocy 100 kW pracującej 8000 h/rok (produkującej 800 MWh energii elektrycznej). Założenia dobrano tak, aby odzwierciedlały typowe różnice między logistyką zoptymalizowaną, referencyjną i nieoptymalną: różne odległości transportu, różne straty jakości substratu (spadek uzysku biogazu wskutek degradacji) oraz różne poziomy emisji metanu z magazynowania pofermentu.

Zestawienie kosztów pozyskania i transportu substratów pokazuje, że łączny koszt jednostkowy [PLN/t] może istotnie różnić się w poszczególnych strumieniach wsadu, nawet przy podobnych ilościach rocznych. W konsekwencji decyzje logistyczne (odległość dostawy, organizacja odbioru, warunki kontraktacji i magazynowania) wpływają nie tylko na bilans emisji, ale również na ekonomiczną stabilność pracy biogazowni. Wskaźnik kosztu całkowitego na tonę wsadu (tab. 3) można traktować jako miarę „efektywności logistycznej” w ujęciu kosztowym, zwłaszcza gdy zestawia się go z uzyskiem CH_4/t (tab. 2).

Tabela 3. Koszty pozyskania i transportu substratów

Table 3. Costs of acquiring and transporting substrates

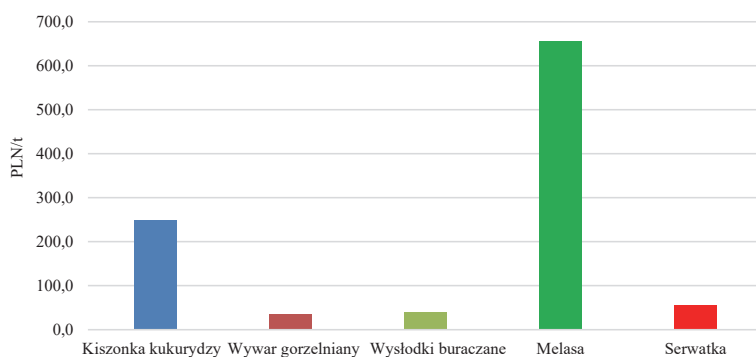
Koszty transportu [PLN]	Suma (surowiec + transport) [PLN]	Koszt na tonę [PLN/t]
37 500	75 000	250
6 300	6 300	35
15 000	24 600	41
15 000	328 000	656
50 000	110 000	55
123 800	543 900	152

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Z perspektywy zarządzania łańcuchem dostaw szczególnie istotne jest porównanie kosztów transportu i pozyskania substratu. Jeżeli udział transportu w koszcie całkowitym rośnie, oznacza to zwiększającą się wrażliwość systemu na wydłużenie tras, przestoje oraz rozproszenie punktów odbioru. W takich warunkach działania optymalizacyjne (planowanie tras, łączenie kursów, lokalizacja punktów przeładunkowych, skrócenie czasu magazynowania i poprawa organizacji dostaw) mogą jednocześnie poprawiać wynik ekonomiczny oraz ograniczać emisje pośrednie związane z transportem.

Wykres kosztu całkowitego na tonę substratu (rys. 5) pozwala szybko zidentyfikować strumienie wsadu, które generują największe obciążenie kosztowe w łańcuchu logistycznym. Z punktu widzenia projektowania i optymalizacji dostaw jest to narzędzie wspierające decyzje o strukturze miks substratów oraz o docelowych odległościach i częstotliwości transportu. W dalszej analizie koszt jednostkowy powinien być interpretowany równolegle z parametrami energetycznymi [$\text{m}^3 \text{CH}_4/\text{t}$], aby ocena nie wpłynęła na preferowanie taniego wsadu o niskim potencjale metanowym.



Rysunek 5. Całkowity koszt substratu

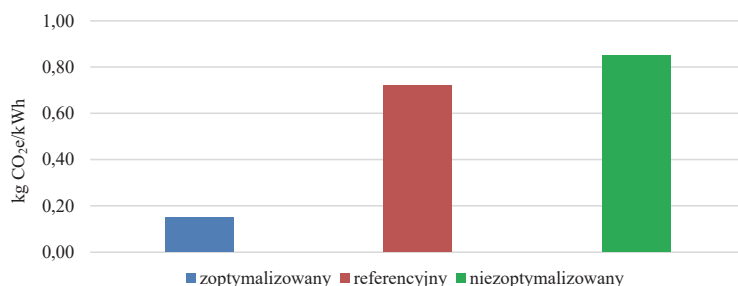
Figure 5. Total substrate cost

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Wskaźniki $\text{CO}_2\text{e}/\text{kWh}$ wykorzystano jako narzędzie identyfikacji etapów wrażliwych na organizację logistyki; dalsza interpretacja obejmuje konsekwencje dla jakości paliwa i pracy CHP.

Porównanie scenariuszy logistycznych w ujęciu wskaźnika $\text{CO}_2\text{e}/\text{kWh}$ wskazuje, że wynik środowiskowy systemu jest w dużym stopniu zależny od warunków organizacji dostaw i magazynowania (rys. 6). Rozbicie emisji na składową transportową oraz



Rysunek 6. Emisje całkowite CO_2e dla scenariuszy logistycznych

Figure 6. Total CO_2e emissions for logistics scenarios

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

składową związaną ze stratami metanu pozwala jednoznacznie wskazać wrażliwe obszary oddziaływania: w scenariuszu zoptymalizowanym emisje transportowe mają relatywnie niewielki udział, natomiast w scenariuszach mniej korzystnych dominują emisje wynikające ze strat metanu (związane z magazynowaniem, nieszczelnościami i gospodarką pofermentem). Taki rezultat jest spójny z mechanizmem działania systemu: niewielki procent strat CH_4 może istotnie zwiększać CO_2e ze względu na wysoki współczynnik GWP metanu.

Zestawienie składowych w tabeli 4 pozwala wskazać obszary najbardziej wrażliwe na sposób organizacji łańcucha logistycznego oraz warunki prowadzenia procesu. Różnice pomiędzy scenariuszami wynikają z odmiennych założeń dotyczących etapów magazynowania i przygotowania wsadu oraz związanych z nimi strat i emisji procesowych. W interpretacji wyników, obok bilansu $\text{CO}_2\text{e/kWh}$, istotne jest powiązanie organizacji logistyki z jakością paliwa biogazowego i stabilnością spalania w CHP, w tym z ryzykiem wzrostu emisji CO , THC/CH_4 slip oraz trudnościami dotyczącymi dotrzymywania wymagań emisyjnych NO_x w warunkach zmiennego paliwa. Zjawisko to jest spójne z literaturą wskazującą, że nawet relatywnie niewielkie procentowo straty CH_4 mogą przesądzać o wyniku klimatycznym systemu [Wechselberger 2023].

Tabela 4. Wskaźnik CO_2e na tonę wsadu dla analizowanych scenariuszy logistycznych

Table 4. CO_2e indicator per ton of feedstock for the analyzed logistics scenarios

Scenariusz	CO_2e całkowite [kg/kWh]	CO_2 z transportu [kg/kWh]	CO_2e związane z metanem [kg/kWh]
zoptymalizowany	0,15	0,01	0,14
referencyjny	0,72	0,03	0,69
niezoptymalizowany	0,85	0,06	0,79

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

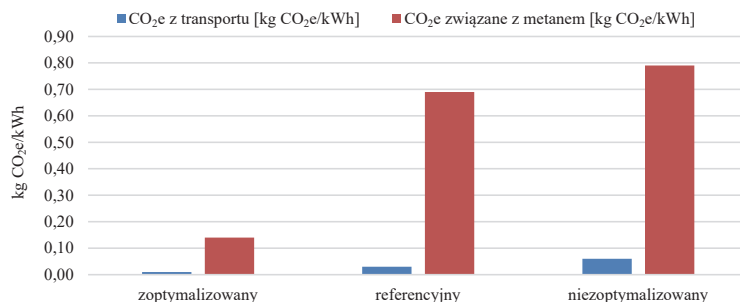
Dodatkowy wskaźnik CO_2e na tonę wsadu [$\text{kg CO}_2\text{e/t}$] pozwala przełożyć ocenę środowiskową na język logistyki i operacji (ile emisji przypada na jednostkę masy obsługiwanego strumienia). Dzięki temu możliwe jest porównanie scenariuszy niezależnie od zmian w produkcji energii oraz wskazanie, które elementy łańcucha (transport vs magazynowanie) powinny być priorytetowo usprawniane. W praktyce oznacza to, że działania takie jak skrócenie czasu magazynowania, hermetyzacja zbiorników, ograniczenie strat w punktach przeładunkowych oraz stabilizacja harmonogramu dostaw mogą dawać większy efekt środowiskowy niż sama redukcja odległości transportu.

W analizie modelowej uzyskano następujące orientacyjne wielkości (rys. 7):

- scenariusz zoptymalizowany: ok. 0,15 $\text{kg CO}_2\text{e/kWh}$ (w tym transport ok. 0,01 $\text{kg CO}_2\text{e/kWh}$),
- scenariusz referencyjny: ok. 0,72 $\text{kg CO}_2\text{e/kWh}$ (transport ok. 0,03 $\text{kg CO}_2\text{e/kWh}$),
- scenariusz nieoptymalny: ok. 0,85 $\text{kg CO}_2\text{e/kWh}$ (transport ok. 0,06 $\text{kg CO}_2\text{e/kWh}$).

Oznacza to, że zmiana organizacji logistyki i poziomu szczelności magazynowania w modelu może kilkukrotnie różnicować ślad klimatyczny instalacji. Należy podkreślić, że liczby te mają charakter ilustracyjny i powinny zostać zweryfikowane na podstawie danych rzeczywistych (lokalny miks substratów, rzeczywisty stopień hermetyzacji,

realne straty metanu i profil obciążenia CHP). Jednak kierunek zależności jest stabilny, a redukcja strat metanu daje największy efekt redukcyjny.



Rysunek 7. Emisje całkowite CO₂e dla scenariuszy logistycznych, z podziałem na emisje metanu i emisje transportowe

Figure 7. Total CO₂e emissions for logistics scenarios, separated into methane emissions and transport emissions

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Na podstawie analizy procesowej i scenariuszowej wyodrębniono trzy etapy o największym znaczeniu:

- 1) magazynowanie substratów stałych i płynnych – etap decydujący o zachowaniu potencjału metanowego i ryzyku niekontrolowanych emisji. Materiały źródłowe akcentują znaczenie właściwego składowania i zabezpieczenia przyz/silosów substratów [Holmes i Muck 2007];
- 2) gospodarka pofermentem – etap krytyczny klimatycznie, co potwierdzają wyniki pomiarów emisji metanu ze składowania pofermentu [Baldé 2016]. Z punktu widzenia logistyki jest to problem nie tylko magazynowania, ale także harmonogramu wywozu, zdolności aplikacji rolniczej i sezonowości;
- 3) stabilność pracy CHP i jakość biogazu – logistyka wpływa na jakość paliwa (wahania CH₄, obecność H₂S, wilgoć), co determinuje sprawność i profil emisji [Holm-Nielsen 2009].

Dyskusja

Łańcuch logistyczny należy rozumieć jako element sterowania jakością wsadu i paliwa, a nie wyłącznie jako źródło emisji związanych z transportem. Takie podejście pozwala lepiej integrować cele środowiskowe i eksploatacyjne: ograniczać oddziaływanie bioodpadów na środowisko, poprawiać efektywność energetyczną i jednocześnie minimalizować ryzyko wzrostu emisji z silnika w warunkach zmiennej jakości biogazu.

Uzyskane wyniki wskazują, że ocena oddziaływania środowiskowego instalacji biogazowej z układem CHP powinna być prowadzona wielokryterialnie. Kluczowe znaczenie mają cztery grupy kryteriów: redukcja strumienia bioodpadów i ryzyka środowiskowego, emisje gazów cieplarnianych wyrażone wskaźnikiem CO₂e, emisje

zanieczyszczeń do powietrza związane z wykorzystaniem biogazu w silniku tłokowym oraz efektywność energetyczna układu. Takie ujęcie pozwala lepiej zrozumieć rolę łańcucha logistycznego: logistyka oddziałuje nie tylko na ilość wytworzonego biogazu, lecz także na jego jakość i stabilność, a te cechy bezpośrednio przekładają się na warunki spalania i emisje z jednostki kogeneracyjnej.

W procesie fermentacji etap gromadzenia, magazynowania i przygotowania wsadu należy traktować jako system zapewnienia jakości. Wahanie składu mieszaniny wsadowej, zbyt długi czas retencji w magazynach, niekontrolowany dostęp tlenu w pryzmach lub degradacja frakcji biodegradowalnej nie tylko powodują spadek potencjału metanowego, lecz również zwiększają zmienność produkcji biogazu w czasie. Przekłada się to na parametry paliwa gazowego: wahania wartości opałowej i składu utrudniają utrzymanie stabilnego obciążenia silnika oraz pogarszają warunki spalania.

W układach CHP zasilanych biogazem ważna jest równowaga pomiędzy stabilnością paliwa a utrzymaniem wysokiej sprawności. Gorsza jakość biogazu lub większa zmienność jego parametrów może sprzyjać wzrostowi emisji CO oraz związków organicznych, w tym metanu niespalonego (tzw. methane slip), a także utrudniać kontrolę emisji NO_x. Z tego względu przy interpretacji wyników konieczne jest równoległe uwzględnianie emisji regulowanych i technologicznie krytycznych dla silników biogazowych, a także zasad porównywania wyników w znormalizowanych warunkach odniesienia. Ocena środowiskowa nie powinna więc ograniczać się do bilansu CO₂e/kWh, lecz obejmować również ryzyko pogorszenia reżimu spalania i potencjalnych trudności w dotrzymaniu wymagań emisyjnych w warunkach zmiennego paliwa.

Przedstawione wskaźniki CO₂e należy traktować przede wszystkim jako narzędzie identyfikacji etapów wrażliwych na organizację łańcucha logistycznego. Rozbicie składowych emisji pozwala wskazać, które elementy systemu są najbardziej podatne na straty i wymagają kontroli organizacyjnej oraz technicznej. Z punktu widzenia zarządzania instalacją ważne jest jednak, aby działania ograniczające emisje procesowe i poprawiające bilans CO₂e były dobierane w sposób wspierający stabilność jakości paliwa dla CHP. Oznacza to, że środki redukujące straty i emisje w magazynowaniu, przygotowywaniu wsadu lub gospodarce pofermentem powinny jednocześnie ograniczać zmienność produkcji biogazu, a nie prowadzić do sytuacji, w której układ pracuje niestabilnie lub z pogorszoną sprawnością.

Optymalizacja powinna być prowadzona równoległe w trzech obszarach: w obszarze logistyki i magazynowania, gdzie kluczowe jest ograniczanie degradacji substratów i utrzymywanie powtarzalności mieszaniny wsadowej; w obszarze przygotowania wsadu, gdzie standaryzacja procesów takich jak rozdrabnianie, mieszanie oraz ewentualna higienizacja pozwalają ograniczać zmienność procesu fermentacji; oraz w obszarze jakości paliwa i eksploatacji CHP, gdzie uzdatnianie biogazu oraz stabilizacja obciążenia silnika wspierają spełnianie wymagań emisyjnych.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona analiza potwierdza, że organizacja łańcucha logistycznego bioodpadów i substratów ma bezpośredni wpływ na oddziaływanie środowiskowe układu biogazownia – uzdatnianie biogazu – CHP. Logistyka pełni funkcję systemu zapewnienia

jakości i decyduje o powtarzalności mieszaniny wsadowej, ogranicza degradację substratów oraz stabilizuje warunki prowadzenia fermentacji. Przekłada się to na stabilność wytwarzania biogazu i parametrów paliwa gazowego.

Wskaźniki CO₂e/kWh stanowią użyteczne narzędzie identyfikacji etapów wrażliwych na organizację procesu i wskazują obszary, w których działania organizacyjno-techniczne mogą przynieść największą poprawę. Jednocześnie interpretacja wyników powinna uwzględniać nie tylko bilans GHG, ale również konsekwencje eksploatacyjne dla jednostki CHP. Zmienna jakość biogazu może pogarszać reżim spalania i sprzyjać wzrostowi emisji CO, związków organicznych (THC) oraz metanu niespalonego, a także utrudniać utrzymanie stabilnych parametrów emisji NO_x. Z tego względu w ocenie środowiskowej i planowaniu działań korygujących należy uwzględnić porównanie emisji w warunkach odniesienia oraz ryzyko niedotrzymania limitów emisyjnych dla źródeł spalania zasilanych paliwem o zmiennych parametrach.

Najważniejsze kierunki działań optymalizacyjnych to:

- poprawa organizacji magazynowania i przygotowania wsadu poprzez hermetyzację, ograniczanie niekontrolowanego rozkładu i homogenizację mieszaniny,
- standaryzacja operacji przygotowania substratu w celu stabilizacji procesu fermentacji,
- działania dotyczące paliwa i CHP, obejmujące uzdatnianie biogazu (redukcja H₂S i wilgoci) oraz organizację pracy agregatu w warunkach sprzyjających wysokiej sprawności i kontrolowanej emisyjności.

Tak zaprojektowana integracja logistyki z eksploatacją CHP pozwala jednocześnie ograniczać oddziaływanie bioodpadów na środowisko, poprawiać efektywność energetyczną i zmniejszać ryzyko środowiskowe wynikające z emisji do atmosfery.

Bibliografia

- Angelidaki I., Ahring B.K., 2000: Methods for increasing the biogas potential from the recalcitrant organic matter contained in manure, *Water Science and Technology* 41(3), 189–194.
- Baldé H., VanderZaag A., Burt S., Wagner-Riddle C., Gordon R., Desjardins R.L., MacDonald D., 2016: Methane emissions from digestate at an agricultural biogas plant. *Bioresource Technology* 216, 914–922.
- Berglund M., Börjesson P., 2006: Assessment of energy performance in the life-cycle of biogas production, *Biomass and Bioenergy* 30(3), 254–266.
- Biogazownia, 2024: Biogazownia rolnicza. Podręcznik dla samorządowca, wydanie drugie. Fundacja na rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa, Warszawa.
- Curkowski A., Oniszk-Popławska A., Wiśniewski G., Zowski M., 2011: Mała biogazownia rolnicza, Fundacja Instytut na rzecz Ekorozwoju, Warszawa.
- Dyrektywa 2015: Dyrektywa Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2015/2193 z dnia 25 listopada 2015 r. w sprawie ograniczenia emisji niektórych zanieczyszczeń do powietrza ze średnich obiektów energetycznego spalania (MCP), *Dz.U. L* 313, 28.11.2015, 1–19.
- Holmes B.J., Muck R.E., 2007: Packing bunkers and piles to maximize forage preservation, *University of Wisconsin-Extension, Madison*.
- Holm-Nielsen J.B., Al Seadi T., Oleskowicz-Popiel P., 2009: The future of anaerobic digestion and biogas utilization, *Bioresource Technology* 100(22), 5478–5484.

- IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- IPCC, 2022: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Intergovernmental Panel on Climate Change, Geneva.
- Król A., Oleszek M., Tyś J., Kulik M., 2016: Przegląd stanu wiedzy z zakresu rozwiązywania problemów wtórnej fermentacji kiszonek przeznaczonych do produkcji biogazu, *Problemy Inżynierii Rolniczej* 1(91), 53–61.
- Liebetrau J. i in., 2017: Methane emissions from biogas plants, IEA Bioenergy Task 37, Technical Report.
- Lima L.M., Dos Santos J.P., Casagrande D.R., Ávila C.L.S., Lara M.S., Bernardes T.F., 2017: Lining bunker walls with oxygen barrier film reduces nutrient losses in corn silages, *Journal of Dairy Science* 100(6), 4565–4573, <https://doi.org/10.3168/jds.2016-12129>
- Methane, 2017: Methane emissions from biogas plants, IEA Bioenergy Task 37, Technical Report.
- Montgomery L.F.R., Bochmann G., 2014: Pretreatment of feedstock for enhanced biogas production, IEA Bioenergy Task 37, Technical Brochure.
- Olajossy A., 2008: Możliwości kogeneracji trzech rodzajów energii w oparciu o zubożony w metan gaz ziemny, *Polityka Energetyczna* 11(1), 63–71.
- Paolini V., Petracchini F., Segreto M., Tomassetti L., Naja N., Cecinato A., 2018: Environmental impact of biogas: A short review of current knowledge, *Journal of Environmental Science and Health, Part A* 53(10), 899–906.
- Podziemska A., 2005: Techniczno-ekonomiczne aspekty gazowej gospodarki skojarzonej cz. 1, *Nowoczesne Gazownictwo* 4, 29–37.
- Siudek A., Klepacka A.M., 2022: The Logistics Aspect in Research on the Reduction of Carbon Dioxide Emissions from Agricultural Biogas, *Sustainability* 14(16), 10124, <https://doi.org/10.3390/su141610124>
- Wechselberger V., i in., 2023: Methane losses from different biogas plant technologies, *Waste Management* 157, 110–120.
- Żygadło M., Madejski R., 2016: Konwersja biomasy w energię w biogazowni rolniczej [The conversion of biomass into energy in farm biogas plant], *Archiwum Gospodarki Odpadami i Ochrony Środowiska* 18(2), 5566.