

Grzegorz Dzieniszewski¹✉, Damian Jasiejko²

¹ Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu, Politechnika Rzeszowska

² Państwowa Akademia Nauk Stosowanych w Przemysłu

Analiza efektywności energetycznej i emisji spalin w biogazowni z uwzględnieniem łańcucha logistycznego w produkcji biogazu

Energy efficiency and exhaust emissions analysis in biogas plant considering the logistics chain of biogas production

Synopsis. W artykule oceniono wpływ łańcucha logistycznego odpadów i substratów (gromadzenie, transport, magazynowanie, dozowanie) na efektywność energetyczną oraz bilans emisji gazów cieplarnianych w układzie kogeneracyjnym z silnikiem tłokowym zasilanym biogazem. Zastosowano metodę studium przypadku dla biogazowni rolniczej małej mocy (ok. 100 kW), zaprojektowanej do pracy na mieszaninie substratów obejmującej: kiszonkę kukurydzy, wywar gorzelniany, wysłodki buraczane, melasę buraczaną i serwatkę. Na podstawie danych projektowych wyznaczono roczne strumienie masowe, uzysk biogazu i metanu, średni godzinowy strumień CH_4 oraz teoretyczną moc elektryczną jako funkcję wartości opałowej metanu i sprawności elektrycznej układu. Następnie przeprowadzono analizę scenariuszową obejmującą: (I) wariant logistyczny z ograniczonym magazynowaniem i krótkimi trasami dostaw oraz (II) wariant z wydłużonym czasem magazynowania i podwyższonymi stratami metanu ujętymi jako emisje fugitywne. Wyniki wskazują, że przy dostawach na krótkie odległości bezpośredni wkład CO_2 z transportu substratów w bilans emisji jest niewielki, natomiast kluczowy wpływ na ślad klimatyczny mają straty CH_4 na etapach magazynowania i obsługi procesu. Zwrócono uwagę, że znaczenie logistyczne może mieć również zagospodarowanie pofermentu, jednak skala efektu zależy tu od lokalnych dystansów oraz organizacji odbioru i wymaga przyjęcia odrębnych danych obiektowych. Wpływ logistyki na emisje spalin (CO , NO_x , węglowodory) omówiono jakościowo jako ryzyko

✉ **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

związane ze zmienną jakością biogazu i wzrostem zanieczyszczeń. Wskazano krytyczne punkty łańcucha logistycznego oraz kierunki działań ograniczających straty i emisje, w tym: hermetyzację magazynów, skracanie czasu składowania, monitoring szczelności oraz standaryzację paliwa gazowego.

Słowa kluczowe: biogaz, kogeneracja, łańcuch logistyczny, straty metanu, emisje spalin, efektywność energetyczna

Abstract. This paper evaluates how the logistics chain of feedstocks and organic residues (collection, transport, storage, and dosing) affects energy performance and the greenhouse-gas balance of a CHP system powered by a biogas-fueled reciprocating engine. A case-study approach is applied to a small agricultural biogas plant (~100 kW) designed to operate on a substrate mix including maize silage, distillery stillage, sugar beet pulp, molasses, and whey. Using design data, annual mass flows, biogas and methane yields, average hourly methane flow, and theoretical electric power are calculated as a function of methane lower heating value and electrical efficiency. A scenario analysis compares: (I) a logistics variant with limited storage and short delivery distances and (II) a variant with prolonged storage resulting in increased methane losses represented as fugitive emissions. The results indicate that, under short transport distances, direct transport-related CO₂ is relatively small, whereas methane losses during storage and process handling are the dominant contributors to the climate footprint. Digestate logistics may also be relevant, but its magnitude is site-specific and depends on local hauling distances and management practices, and therefore requires dedicated plant-specific data. The impact of logistics on exhaust-related emissions (CO, NO_x, unburned hydrocarbons) is discussed qualitatively as a risk associated with variability and degradation of biogas quality and increased contaminant levels. Critical logistics points are identified and mitigation measures proposed, including sealed storage, reduced residence time, leak detection and repair, and fuel gas standardization.

Keywords: biogas, combined heat and power, logistics chain, methane losses, exhaust emissions, energy efficiency

Kody JEL: Q42, Q53, Q55, L92, O13

Wprowadzenie

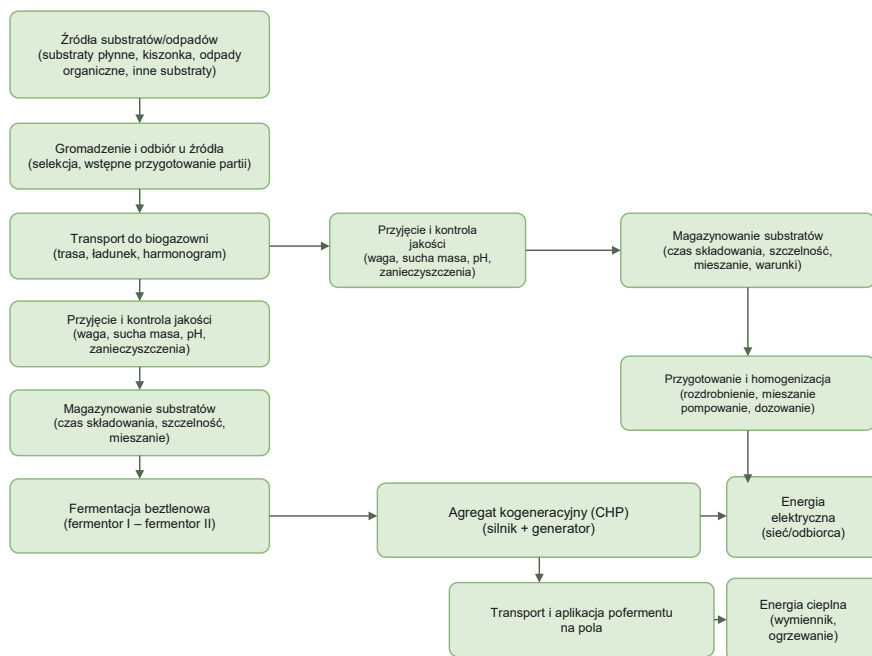
Wykorzystanie odpadów i produktów ubocznych przemysłu rolno-spożywczego do wytwarzania biogazu wpisuje się w cele gospodarki o obiegu zamkniętym oraz polityki redukcji emisji gazów cieplarnianych. W praktyce technicznej dominującym sposobem konwersji biogazu na energię jest kogeneracja (CHP) z zastosowaniem silników tłokowych, umożliwiającą jednoczesną produkcję energii elektrycznej i ciepła użytkowego przy wysokiej sprawności całkowitej, pod warunkiem odbioru ciepła [Hakawati 2017].

Z punktu widzenia eksploatacji biogazowni stabilność pracy agregatu i poziom emisji spalin są w dużym stopniu zależne od jakości paliwa gazowego. Surowy biogaz charakteryzuje się zmiennym udziałem metanu (typowo 45–75% obj.) oraz obecnością

domieszek (m.in. CO₂, para wodna, H₂S), które determinują jego wartość opałową i wymagania dotyczące uzdatniania [Laskowski 2025].

W tym kontekście elementem krytycznym jest łańcuch logistyczny substratów (gromadzenie, transport, magazynowanie, przygotowanie i dozowanie wsadu). Oddziałuje on na:

- zmienność składu wsadu (np. wahania suchej masy, pH),
- ryzyko wystąpienia procesów niepożądanych podczas magazynowania (rozkład tlenowy, straty substancji organicznej),
- straty metanu (emisje fugitywne) w magazynach i instalacji, które mają wysoki wpływ klimatyczny oraz stanowią utracony potencjał energetyczny [Liebetrau 2017; Hurtig 2025].



Rysunek 1. Schemat łańcucha logistycznego substratów

Figure 1. Schematic diagram of the substrate logistics chain

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Celem artykułu jest ocena wpływu logistyki odpadów i substratów na: (I) efektywność energetyczną konwersji biogazu w układzie CHP oraz (II) emisje związane z funkcjonowaniem systemu, ze szczególnym uwzględnieniem strat metanu i zależności emisji spalin od jakości biogazu. W niniejszej pracy przyjęto podejście „well-to-CHP” w granicach instalacji oraz jej bezpośredniego otoczenia logistycznego. Jednostką odniesienia wyników jest (i) rok pracy instalacji oraz (ii) produkcja energii elektrycznej netto, co umożliwia interpretację zarówno w kategoriach t CO₂e/rok, jak i t CO₂e/MWh netto.

Rachunek ilościowy obejmuje: potencjał energetyczny wynikający z rocznego uzysku metanu, emisje CO₂ z transportu substratów wyznaczone metodą aktywnościową oraz emisje CO₂e wynikające ze strat metanu ujętych scenariuszowo. Emisje spalin agregatu CHP (CO, NO_x, THC/VOC) analizowano jakościowo jako efekt pośredni pogorszenia jakości paliwa gazowego wynikający z nieoptymalnej logistyki (magazynowanie, brak homogenizacji, wahania składu biogazu).

W literaturze podkreśla się, że zmienność składu biogazu jest naturalną konsekwencją zróżnicowania wsadów i warunków fermentacji, a zakres wartości opałowej (LHV) dla biogazu jest szeroki (rzędu ok. 16–28 MJ/m³), co przekłada się na wahania mocy i sprawności silników gazowych [European Commission b.d.; Laskowski 2025].

W odniesieniu do kogeneracji sprawność elektryczna jednostek CHP zasilanych gazem jest najczęściej podawana w zakresie ok. 35–42%, natomiast sprawność całkowita (elektryczna + cieplna) może osiągać wartości ok. 85–90% przy efektywnym zagospodarowaniu ciepła [Hakawati 2017; Centrica 2018; Biogas-CHP 2024].

Z perspektywy środowiskowej szczególną uwagę zwraca się na emisje fugitywne metanu w całym łańcuchu dostaw biogazu i biometanu. Nawet pozornie niewielkie procentowo straty mogą istotnie pogorszyć bilans klimatyczny, ponieważ metan ma wysoką wartość potencjału tworzenia efektu cieplarnianego (GWP). W analizach regulacyjnych i porównawczych spotyka się m.in. podejście, w którym do oceny klimatycznej stosowane jest $GWP = 25 \text{ kg CO}_2\text{e/kg CH}_4$ (wskazywane w kontekście założeń dla RED II) [Hurtig 2025].

Jednocześnie w literaturze dotyczącej silników wskazuje się, że pogorszenie jakości biogazu (np. wahania składu, obecność zanieczyszczeń, wahania liczby metanowej) może utrudniać spełnienie rygorystycznych limitów emisji NO_x (np. rzędu 100 mg/Nm³ w wybranych reżimach regulacyjnych), jeśli nie zostaną zastosowane techniki katalizacyjne i właściwe uzdatnianie paliwa [Laskowski 2025].

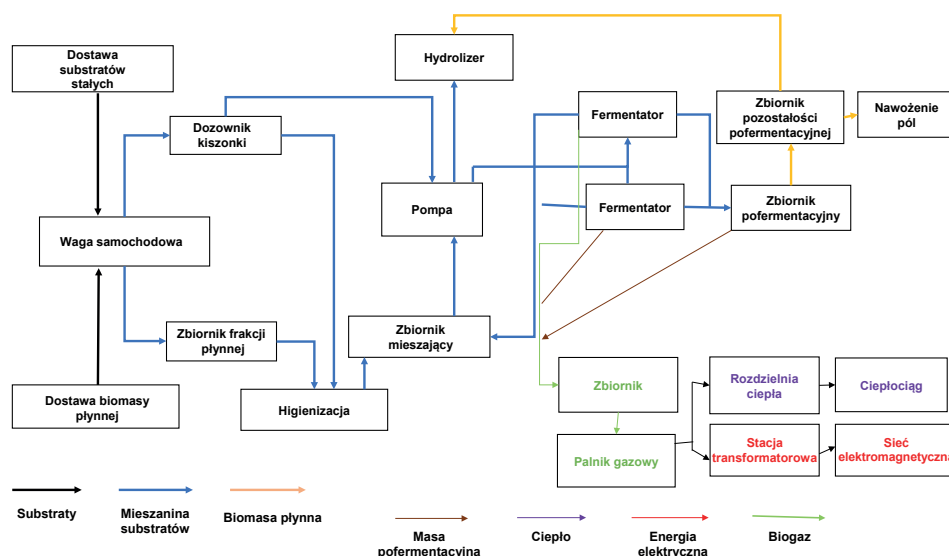
Obiekt i granice analizy

Analizę przeprowadzono dla biogazowni rolniczej małej mocy, ok. 100 kW, zaprojektowanej w układzie obejmującym przygotowanie wsadu (m.in. hydrolizer), fermentację, magazynowanie i uzdatnianie biogazu oraz konwersję w agregacie kogeneracyjnym. Łańcuch logistyczny ujęto jako sekwencję działań obejmującą: gromadzenie, transport, magazynowanie, przygotowanie/dozowanie, fermentację, uzdatnianie, CHP.

Granice systemu dla rachunku wpływu logistyki obejmują:

- transport substratów do instalacji,
- magazynowanie substratów (czas i warunki),
- operacje przeładunkowe i przygotowanie wsadu,
- magazynowanie/obsługę pofermentu (jako element logistyczny wyjścia z procesu),
- straty metanu w instalacji i magazynach (scenariuszowo),
- wytwarzanie energii w CHP (część energetyczna bilansu).

Jednostką odniesienia bilansu energetycznego jest MWh/rok (brutto i netto), natomiast bilansu klimatycznego t CO₂e/rok (oraz pomocniczo t CO₂e/MWh netto).



Rysunek 2. Schemat technologii wytwarzania biogazu i CHP

Figure 2. Schematic diagram of biogas and CHP production technology

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

W ramach niniejszego opracowania rozróżniono:

- elementy ujęte w rachunku ilościowym: (1) potencjał energetyczny i moc teoretyczna CHP na podstawie rocznego uzysku CH_4 i czasu pracy, (2) emisje CO_2 z transportu substratów wyznaczone metodą aktywnościową (praca przewozowa → zużycie paliwa → emisje), (3) emisje CO_2 e wynikające ze strat CH_4 (scenariuszowo) oraz odpowiadająca im utrata energii elektrycznej netto;
- elementy opisane jakościowo: wpływ zmienności jakości biogazu na ryzyko wzrostu emisji spalin (CO , NO_x , THC/VOC) oraz konsekwencje organizacji logistyki pofermentu w aspekcie liczby kursów i ryzyka emisyjnego.

Wariant technologiczno-logistyczny oparto na mieszaninie substratów: kiszonka kukurydzy, wywar gorzelniany, wysłodki buraczane, melasa buraczana, serwatka. W projekcie przyjęto pracę przez 8000 h w roku, przy przerwach stanowiących ok. 3% czasu rocznego (konserwacje, awarie, przerwy technologiczne).

Przyjęto następujące roczne ilości wsadu i potencjał wytwarzania gazu dla wariantu odpowiadającego mocy ok. 100 kW:

- łączny wsad: 3580 t/rok,
- uzysk biogazu: 610 000–759 000 m^3 /rok,
- uzysk metanu: 200 660–238 536 m^3 CH_4 /rok,
- wartość opałowa metanu: 9,97 kWh/Nm^3 ,
- sprawność elektryczna układu: 40%.

Tabela 1. Parametry przyjęte do obliczeń oraz przeliczeń emisji CO₂eTable 1. Parameters adopted for calculations and assumptions for CO₂e emission calculations

Parametr	Wartość	Jednostka
Roczny uzysk CH ₄ (min)	200 660	m ³ /rok
Roczny uzysk CH ₄ (max)	238 536	m ³ /rok
Czas pracy	8000	h/rok
Produkcja energii el. brutto	800	MWh/rok
Zużycie własne energii el.	0,08	–
Produkcja energii el. netto	736	MWh/rok
Gęstość CH ₄	0,716	kg/m ³
GWP dla CH ₄	25	kg CO ₂ e/kg CH ₄

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

W zakresie logistyki dostaw przyjęto następujące odległości kontraktowe (krótkie łańcuchy dostaw):

- kiszonka: do 5 km,
- serwatka: 3 km,
- wysłodki i melasa: ok. 1 km,
- wywar: ok. 10 km.

Analiza przepływu energii od surowca do końcowego wykorzystania w silniku tłokowym

W celu wyznaczenia potencjału energetycznego instalacji i oszacowania teoretycznej mocy elektrycznej agregatu kogeneracyjnego zastosowano bilans oparty na rocznym uzysku metanu oraz czasie pracy jednostki. W pierwszym kroku obliczono średni godzinowy uzysk metanu:

$$U_{CH_4,h} = R_{CH_4}/t_r$$

gdzie:

 $U_{CH_4,h}$ – średni strumień objętościowy metanu [m³ CH₄/h], R_{CH_4} – roczny uzysk metanu [m³ CH₄/rok], t_r – czas pracy agregatu w ciągu roku [h/rok].

Teoretyczna moc elektryczna prądnicy:

$$P_{el} = U_{CH_4,h} \cdot LHV_{CH_4} \cdot \eta_{el}$$

gdzie:

 P_{el} – teoretyczna moc elektryczna [kW], LHV_{CH_4} – wartość opałowa metanu [kWh/Nm³], η_{el} – sprawność elektryczna układu [–].

W celu przeprowadzenia porównania z założeniami projektowymi wyznaczono roczną produkcję energii elektrycznej brutto i netto:

$$E_{el,brutto} = P_{el} \cdot t_r$$

$$E_{el,netto} = E_{el,brutto} \cdot (1 - u_{wlasne})$$

gdzie:

$E_{el,brutto}$ – energia elektryczna brutto [MWh/rok],

$E_{el,netto}$ – energia elektryczna netto [MWh/rok],

u_{wlasne} – udział zużycia własnego energii elektrycznej [–].

Model wpływu logistyki na emisje

Emisje transportowe (CO₂) oszacowano, wykorzystując metodę aktywnościową, w ramach której emisje są funkcją pracy przewozowej i zużycia paliwa:

$$N_{kurs} = M_{rok}/m_{lad}$$

$$D_{rok} = N_{kurs} \cdot 2 \cdot d$$

$$V_{ON} = D_{rok} \cdot c_{ON}$$

$$E_{CO2,trans} = V_{ON} \cdot EF_{CO2,ON}$$

gdzie:

N_{kurs} – liczba kursów w ciągu roku [–],

M_{rok} – masa transportowanego materiału w ciągu roku [t/rok],

m_{lad} – ładowność użyteczna pojazdu [t/kurs],

D_{rok} – roczny przebieg [km/rok],

d – odległość w jedną stronę [km],

V_{ON} – zużycie oleju napędowego [l/rok],

c_{ON} – jednostkowe zużycie paliwa [l/km],

$EF_{CO2,ON}$ – współczynnik emisji CO₂ dla ON [kg CO₂/l],

$E_{CO2,trans}$ – emisja CO₂ z transportu [kg CO₂/rok] (lub po przeliczeniu t/rok).

W obliczeniach przyjęto przejazd „tam i z powrotem” ($2 \cdot d$) oraz stałe zużycie paliwa c_{ON} jako przybliżenie warunków eksploatacyjnych. Straty metanu (emisje fugitywne) ujęto scenariuszowo jako udział procentowy utraconego metanu w stosunku do wyprodukowanego R_{CH₄}. Do oceny klimatycznej przyjęto współczynnik GWP = 25 kg CO₂e/kg CH₄, stosowany w założeniach porównawczych dotyczących sektora biogazu [Hurtig 2025].

Emisje spalin (CO, NO_x, THC/VOC) opisano jakościowo, wskazując na ryzyko ich wzrostu w warunkach pogorszonej jakości biogazu, odnosząc się do zaleceń literatury dotyczącej silników i wymagań dotrzymania limitów przy zastosowaniu technik katalitycznych lub bez nich [Laskowski 2025].

W obliczeniach emisji transportowych przyjęto jednostkowe zużycie oleju napędowego $c_{ON} = 0,30$ l/km oraz współczynnik emisji $EF_{CO_2,ON} = 2,68$ kg CO₂/l na podstawie publikacji [Ministry for the Environment 2024], co dla wariantu logistycznego I odpowiada emisji z transportu rzędu 0,90 t CO₂/rok.

Potencjał energetyczny i zgodność z mocą projektową

Dla zakresu $R_{CH_4} = 200\ 660\text{--}238\ 536$ m³ CH₄/rok i $t_r = 8000$ h/rok uzyskano:

- $U_{CH_4,h} = 25,0825\text{--}29,8170$ m³ CH₄/h,
- $P_{el} = 100,03\text{--}118,91$ kW (dla $LHV_{CH_4} = 9,97$ kWh/Nm³ oraz $\eta_{el} = 0,40$).

Otrzymane zakresy są spójne z założeniem biogazowni małej mocy (ok. 100 kW) i wskazują na wrażliwość mocy na zmienność uzysku metanu, która jest w praktyce powiązana z logistyką wsadu (terminowość dostaw, homogenizacja, warunki magazynowania).

W analizowanym wariancie przyjęto krótkie dystanse dostaw substratów (1–10 km), co ogranicza wielkość rocznej pracy przewozowej. W celu oszacowania rzędu wielkości emisji CO₂ z transportu zastosowano podejście aktywnościowe opisane wcześniej.

Dla łącznej masy wsadu $M_{rok} = 3580$ t/rok oraz założonej ładowności $m_{lad} = 20$ t/kurs liczba kursów wynosi:

$$N_{kurs} = 3580/20 \approx 179 \text{ kursów/rok}$$

Roczny przebieg zależy od średniego dystansu dostaw d . Dla lokalnego modelu zaopatrzenia (odległości kontraktowe 1–10 km) przyjęcie średniej odległości rzędu kilku kilometrów prowadzi do:

$$D_{rok} = N_{kurs} \cdot 2 \cdot d$$

co daje przebieg rzędu 10³ km/rok (np. przy $d \approx 3$ km: $D_{rok} \approx 179 \cdot 2 \cdot 3 = 1074$ km/rok).

Zużycie paliwa wyznacza się jako:

$$V_{ON} = D_{rok} \cdot c_{ON}$$

a emisję CO₂ jako:

$$E_{CO_2,trans} = V_{ON} \cdot EF_{CO_2,ON}$$

Z powyższego wynika, że przy krótkich dystansach dostaw emisje CO₂ z transportu mają charakter drugorzędny względem emisji CO₂e wynikających ze strat CH₄, natomiast transport pozostaje istotny operacyjnie z perspektywy terminowości dostaw i stabilizacji wsadu. Jednocześnie należy podkreślić, że komponentem logistycznym o potencjalnie większym znaczeniu może być dystrybucja pofermentu (zależna od odległości pól, sezonowości i organizacji odbioru), która w ujęciu rocznym może generować większą liczbę kursów niż dowóz części substratów płynnych.

Analiza literatury wskazuje, że emisje metanu z biogazowni (w tym z magazynowania, operacji i nieszczelności) mogą istotnie wpływać na bilans gazów cieplarnianych [Liebetrau 2017; Buffi 2024].

Dla rozpatrywanego zakresu produkcji metanu przeprowadzono rachunek scenariuszowy strat:

- scenariusz A (logistyka zoptymalizowana): straty $\text{CH}_4 = 1\%$ rocznej produkcji,
- scenariusz B (logistyka nieoptymalna): straty $\text{CH}_4 = 5\%$ rocznej produkcji (np. dłuższe magazynowanie, gorsza hermetyzacja, większe emisje fugitywne).

Tabela 2. Porównanie scenariuszy logistycznych – strata metanu, energia elektryczna netto oraz emisje CO_2e (wariant MIN)

Table 2. Comparison of logistics scenarios – methane loss, net electricity and CO_2e emissions (MIN variant)

Scenariusz	Strata CH_4 [%]	Strata CH_4 [m^3/rok]	Energia el. netto [MWh/rok]	Emisje CO_2e z CH_4 [t/rok]
A – bazowy	1,0	2006,6	728,6	35,9
B – wydłużone magazynowanie	5,0	10033,0	699,2	179,6
C – hermetyzacja	1,5	3009,9	725,0	53,9
D – LDAR + uszczelnienia	0,8	1605,3	730,1	28,7

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Przykładowe skutki (dla dolnego zakresu $R_{\text{CH}_4} = 200\ 660\ \text{m}^3/\text{rok}$, gęstość $\text{CH}_4 \sim 0,716\ \text{kg}/\text{Nm}^3$):

- 1% strat: ok. 35,9 t $\text{CO}_2\text{e}/\text{rok}$ oraz utrata ok. 8,0 MWh/rok energii elektrycznej (w przeliczeniu na $\eta_{el} = 40$),
- 5% strat: ok. 179,6 t $\text{CO}_2\text{e}/\text{rok}$ oraz utrata ok. 40,0 MWh/rok energii elektrycznej.

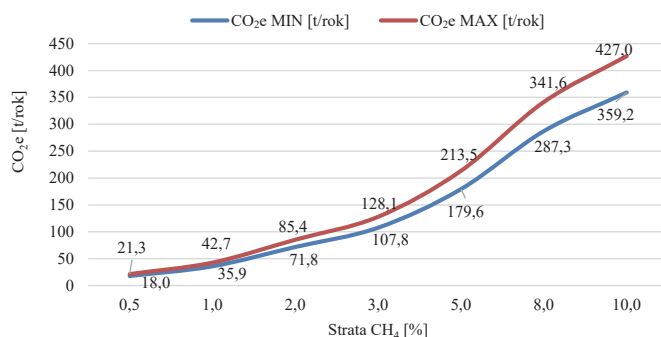
Tabela 3. Zależność emisji CO_2e od poziomu strat metanu w logistyce i magazynowaniu (wariant MIN/MAX uzysku CH_4)

Table 3. Dependence of CO_2e emissions on the level of methane losses in logistics and storage (MIN/MAX variant of CH_4 yield)

Strata CH_4 [%]	CO_2e MIN [t/rok]	CO_2e MAX [t/rok]
0,5	18,0	21,3
1,0	35,9	42,7
2,0	71,8	85,4
3,0	107,8	128,1
5,0	179,6	213,5
8,0	287,3	341,6
10,0	359,2	427,0

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration



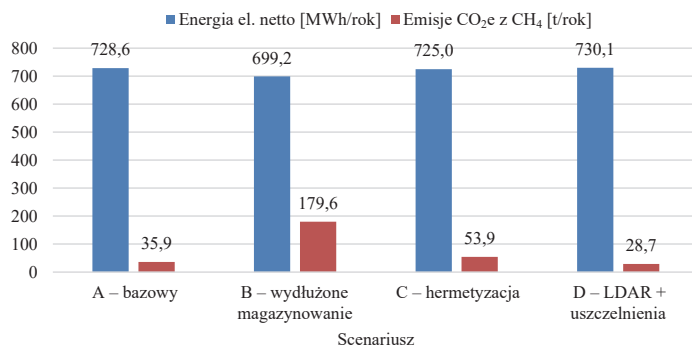
Rysunek 3. Zależność emisji CO₂e od poziomu strat metanu w logistyce i magazynowaniu

Figure 3. Dependence of CO₂e emissions on the level of methane losses in logistics and storage

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Oznacza to, że nawet przy lokalnych dostawach straty metanu mogą mieć dominujący wpływ klimatyczny związany z logistyką i obsługą procesu, znacznie przewyższający emisję z transportu. Jest to zgodne z wnioskami z prac przeglądowych dotyczących znaczenia wycieków metanu w łańcuchu biogazu/biometanu [Hurtig 2025].



Rysunek 4. Porównanie scenariuszy logistycznych A–D: energia elektryczna netto oraz emisje CO₂e

Figure 4. Comparison of logistics scenarios A–D: net electricity and CO₂e emissions

Źródło: opracowanie własne

Source: own elaboration

Jakość biogazu a emisje spalin silnika tłokowego

W zakresie emisji spalin agregatów CHP kluczowe są: NO_x, CO, niespalone węglowodory (w tym metan), a w niektórych przypadkach także formaldehyd. Literatura dotycząca silników wskazuje, że dotrzymanie ostrych limitów NO_x bywa w praktyce trudne, jeśli nie zastosuje się odpowiednich technik (np. katalitycznych) oraz nie dysponuje stabilnym paliwem gazowym [Laskowski 2025].

Logistyka wpływa na proces spalania następująco:

- Zmienność składu wsadu i szybkości hydrolizy (np. brak homogenizacji, wahania suchej masy) powoduje wahania produkcji biogazu i udziału CH_4 , co przekłada się na zmienną moc i parametry spalania.
- Wydłużony czas magazynowania substratów może zwiększać udział frakcji łatwo rozkładalnej zużywanej przed fermentacją właściwą oraz sprzyjać procesom niepożądanym (np. tlenowym), co zmniejsza uzysk metanu i stabilność.
- Niewystarczające uzdatnianie zależne od jakości paliwa i związane z tym wahania wilgotności i zanieczyszczeń zwiększają ryzyko korozji i pogorszenia sprawności oraz mogą wymuszać zmianę nastaw silnika, co sprzyja wzrostowi CO i THC.

W efekcie logistyka, pomimo że nie jest bezpośrednio częścią procesu spalania, kształtuje warunki jego przebiegu, wpływając na stabilność pracy, skład paliwa oraz wymagany stopień uzdatniania. Aby powiązać logistykę z ryzykiem emisyjnym w sposób bardziej operacyjny, można zastosować prostą analizę wrażliwości opartą na zmianie wartości opałowej paliwa gazowego. Jeśli w wyniku nieoptymalnej logistyki spada udział CH_4 w biogazie, maleje jego wartość opałowa LHV, a w celu utrzymania stałej mocy agregatu rośnie wymagany strumień objętościowy gazu i częściej występują stany przejściowe regulacji, obejmujące zmiany dawki paliwa oraz współczynnika nadmiaru powietrza. Z punktu widzenia procesu spalania zwiększa to ryzyko wzrostu CO i THC/VOC w momentach niedopalenia oraz wahań emisji NO_x wynikających ze zmiennej temperatury płomienia. Działania logistyczne należy zatem traktować jako element zarządzania jakością paliwa (stabilność LHV i składu), a nie wyłącznie jako etap pomocniczy procesu technologicznego.

Dyskusja

Uzyskane wyniki wskazują, że w biogazowniach działających w modelu lokalnym (krótkie dystanse dostaw) potencjał redukcji emisji CO_2 związanych wyłącznie z transportem jest ograniczony. Wynika to z relatywnie małej skali pracy przewozowej w ciągu roku oraz faktu, że w całym systemie większą rolę odgrywają procesy zachodzące przy magazynowaniu i obsłudze technologicznej, w szczególności straty metanu. Oznacza to, że działania optymalizacyjne powinny koncentrować się nie na transporcie, lecz na elementach logistyki, które wpływają na utratę potencjału metanowego wsadu, stabilność fermentacji oraz szczelność toru biogazu.

Najistotniejszym punktem krytycznym jest magazynowanie substratów płynnych i stałych. Wydłużony czas składowania może powodować degradację frakcji łatwo fermentującej jeszcze przed jej podaniem do fermentora, co skutkuje obniżeniem uzysku metanu i pogorszeniem wydajności energetycznej. Dodatkowo magazyny stanowią potencjalne źródło emisji fugitywnych, zwłaszcza przy braku hermetyzacji i właściwej organizacji dostaw. Z tego względu wariant projektowy zakładający brak dużych magazynów (co wynika z bliskości źródeł substratów) należy interpretować jako rozwiązanie ograniczające ryzyko strat energii i emisji. W praktyce uzasadnione jest stosowanie krótkookresowych zbiorników wyrównawczych (buforów) wspierających ciągłość dozowania, ale bez wprowadzania długotrwałego składowania.

Drugim obszarem o dużym znaczeniu są operacje przeładunkowe oraz przygotowanie wsadu. Pomimo charakteru pomocniczego etap ten decyduje o jednorodności mieszaniny i stabilności obciążenia organicznego w czasie. Brak homogenizacji zwiększa wahania parametrów procesu, co może prowadzić do zmienności składu biogazu i wahań mocy agregatu CHP. Niestabilne paliwo sprzyja stanom przejściowym spalania, w których rośnie ryzyko wzrostu emisji CO i niespalonych węglowodorów, a także wahań emisji NO_x. Tym samym logistyka wsadu poprzez jakość i powtarzalność biogazu oddziałuje pośrednio na emisje spalin.

Trzecim kluczowym elementem jest szczelność instalacji gazowej i magazynów. Nieszczelności powodują jednocześnie utratę paliwa i istotny wzrost oddziaływania klimatycznego, dlatego działania utrzymaniowe odnoszą wysoki efekt jednostkowy. Rekomendowane jest wdrożenie systematycznych przeglądów szczelności (LDAR) oraz rejestru usterek i czasu reakcji. W warunkach eksploatacyjnych jest to jedno z najbardziej efektywnych działań ograniczających emisje, niewymagające kosztownych modernizacji technologicznych.

Czwartym, często niedoszacowanym obszarem jest logistyka pofermentu. Organizacja odbioru i aplikacji determinuje czas magazynowania oraz ryzyko emisji wtórnych i uciążliwości odorowych. W układach lokalnych, gdzie transport substratów ma małe znaczenie emisyjne, to właśnie poferment może generować większą liczbę kursów oraz wymuszać długie sezonowe magazynowanie. Zintegrowanie harmonogramu odbioru pofermentu z planem pracy instalacji i serwisem ogranicza przestoje i redukuje ryzyko wystąpienia sytuacji awaryjnych, które sprzyjają emisjom ucieczkowym.

W ujęciu operacyjnym zaleca się:

- wdrożenie procedur kontroli jakości dostaw (sucha masa, pH, zawartość substancji organicznej),
- planowanie buforów logistycznych minimalizujących przestoje bez nadmiernego składowania,
- cykliczne przeglądy szczelności (LDAR) toru biogazu,
- uporządkowanie logistyki pofermentu poprzez optymalizację harmonogramu odbioru i ograniczanie czasu magazynowania.

Wskazane działania są spójne z podejściem, w ramach którego redukcja strat metanu i stabilizacja jakości biogazu stanowią główną dźwignię poprawy bilansu zarówno energetycznego, jak i emisyjnego instalacji.

Podsumowanie i wnioski

Analiza przeprowadzona dla biogazowni rolniczej małej mocy (ok. 100 kW) potwierdza, że przy rocznym uzysku metanu na poziomie 200 660–238 536 m³ CH₄ i założonym czasie pracy 8000 h/rok instalacja może zapewnić średni strumień metanu rzędu 25,08–29,82 m³ CH₄/h. W przeliczeniu na konwersję w układzie kogeneracyjnym oznacza to teoretyczną moc elektryczną 100,03–118,91 kW, przy wartości opałowej metanu 9,97 kWh/Nm³ i sprawności elektrycznej 40%. Wyniki te potwierdzają spójność przyjętych parametrów projektowych z zakładaną klasą mocy oraz wskazują, że stabilność uzysku metanu jest kluczowym warunkiem utrzymania przewidywalnej produkcji energii.

W warunkach lokalnego modelu zaopatrzenia, tj. krótkich dystansów dostaw substratów, emisje CO₂ związane z transportem stanowią relatywnie niewielką część całkowitego oddziaływania logistycznego. Oznacza to, że nawet dalsza optymalizacja tras czy organizacji przewozów może mieć ograniczony efekt środowiskowy w porównaniu z działaniami ukierunkowanymi na ograniczanie strat gazu i stabilizację procesu. Transport pozostaje jednak istotny z perspektywy ciągłości dostaw i powtarzalności wsadu, a więc pośrednio wpływa na parametry fermentacji i jakość biogazu.

Największe znaczenie dla bilansu klimatycznego i energetycznego mają straty metanu powstające na etapach magazynowania i obsługi procesu, ponieważ CH₄ stanowi zarówno podstawowy nośnik energii dla agregatu CHP, jak i gaz o wysokim potencjale tworzenia efektu cieplarnianego. Analiza scenariuszowa pokazuje, że wzrost strat rocznej produkcji CH₄ z 1 do 5% przekłada się na skokowy wzrost obciążenia klimatycznego (rzędu dziesiątek, a nawet setek ton CO₂e) oraz zauważalną utratę możliwej do wytworzenia energii elektrycznej. W praktyce oznacza to, że nawet niewielkie pogorszenie warunków magazynowania, wzrost nieszczelności lub nieoptymalne procedury operacyjne mogą istotnie obniżyć efektywność całego systemu, w większym stopniu niż czynniki transportowe.

Logistyka oddziałuje również pośrednio na emisje spalin silnika, ponieważ wpływa na stabilność i jakość biogazu. Zmienność udziału CH₄, wahania wilgotności oraz obecność zanieczyszczeń mogą prowadzić do niestabilności spalania, a tym samym zwiększać ryzyko wzrostu emisji CO, NO_x i niespalonych węglowodorów oraz utrudniać spełnienie wymagań emisyjnych bez zastosowania dodatkowych technik oczyszczania spalin [Laskowski 2025]. Tym samym działania logistyczne powinny być traktowane jako element zarządzania jakością paliwa, a nie wyłącznie jako etap pomocniczy procesu technologicznego.

W świetle uzyskanych wyników za kluczowe dla poprawy efektywności i ograniczenia emisji należy uznać rozwiązania organizacyjno-techniczne skoncentrowane na: skracaniu czasu magazynowania substratów, hermetyzacji zbiorników i ograniczaniu emisji fugitywnych, systematycznym monitoringu szczelności toru biogazu oraz stabilizacji parametrów paliwa gazowego poprzez osuszanie i odsiarczanie. Uzupełnieniem tych działań powinna być racjonalna organizacja logistyki pofermentu, ponieważ jego sposób odbioru, magazynowania i aplikacji wpływa zarówno na koszty operacyjne, jak i ryzyko emisji wtórnych. W konsekwencji optymalizacja łańcucha logistycznego – rozumiana jako spójne zarządzanie dostawami wsadu, warunkami magazynowania, przygotowaniem mieszaniny i utrzymaniem szczelności instalacji – stanowi jeden z najskuteczniejszych sposobów zwiększania efektywności energetycznej biogazowni oraz ograniczania jej oddziaływania środowiskowego.

Bibliografia

- BIOGAS-CHP, 2024: CHP brochure [dane katalogowe jednostek i sprawności], materiały katalogowe producenta.
- Buffi M., Hurtig O., Scarlat N., 2024: Methane emissions in the biogas and biomethane supply chains in the EU: An analysis to update the greenhouse gas emissions accounting methodology of Renewable Energy Directive Annex VI. EUR 40129, JRC139485, Publications Office of the European Union, Luxembourg, https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/bitstream/JRC139485/JRC139485_01.pdf [dostęp: 03.01.2026].

- Centrica Business Solutions, 2018: The essential guide to small scale combined heat and power, https://www.centricabusinesssolutions.com/sites/g/files/qehiga126/files/GDE%2001%20ENER-G%20Essential%20Guide%20to%20CHP_01_v5%20%281%29.pdf [dostęp: 03.01.2026].
- European Commission, b.d.: Biogas – Knowledge for Policy [definicja, skład i zakres LHV biogazu], https://knowledge4policy.ec.europa.eu/glossary-item/biogas_en [dostęp: 03.01.2026].
- Hakawati R., Smyth B.M., McCullough G., De Rosa F., Rooney D., 2017: What is the most energy efficient route for biogas utilization: Heat, electricity or transport? *Applied Energy* 206, 1076–1087, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.08.068>
- Hurtig O., Buffi M., Besseau R., Scarlat N., Carbone C., Agostini A., 2025: Mitigating biomethane losses in European biogas plants: A techno-economic assessment, *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 210, 115187.
- Laskowski P., Wojs M., Wiśniowski P., Zimakowska-Laskowska M., Kozłowski E., 2025: Biogas-fuelled internal combustion engines for micro-scale energy generation: A review of technologies and configurations for systems below 50 kW, *Combustion Engines*, online first, <https://doi.org/10.19206/CE-208913>
- Liebetrau J., Reinelt T., Agostini A., Linke B., 2017: Methane emissions from biogas plants: Methods for measurement, results and effect on greenhouse gas balance of electricity produced (IEA Bioenergy Task 37), https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2018/01/Methane-Emission_web_end_small.pdf [dostęp: 03.01.2026].
- Materiały źródłowe, b.d.: Dokumentacja projektowa biogazowni rolniczej małej mocy 100 kW [tabele wsadu, uzyski biogazu/metanu, założenia pracy 8000 h/rok], materiały niepublikowane.
- Ministry for the Environment, 2024: Measuring emissions: A guide for organisations: 2024 detailed guide. Ministry for the Environment, New Zealand, Wellington, https://environment.govt.nz/assets/publications/Measuring-Emissions-2024/Measuring-emissions_Detailed-guide_2024_ME1829.pdf [dostęp: 03.01.2026].