

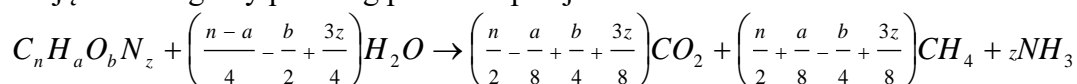
Przeróbka beztlenowa bioodpadów komunalnych. Przegląd i porównanie technologii. Emisje
Gospodarka stałymi odpadami komunalnymi (OK) podlegała znaczącym zmianom w ciągu ostatnich 20 lat. Poczyniono znaczne postępy we wszystkich obszarach gospodarki odpadami, ale wprowadzenie fermentacji metanowej do przetwarzania OK jest jednym z najbardziej udanych i innowacyjnych osiągnięć technologicznych obserwowanych w ciągu ostatnich dwóch dekad w tej dziedzinie. Fermentacja metanowa została w pełni dostosowana do stałych OK i zaakceptowana, a nawet jest preferowana jako metoda fazy intensywnej biodegradacji biofrakcji w instalacjach mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów oraz do przetwarzania odpadów kuchennych i z przemysłu spożywczego.

Bioodpady – głównie odpady spożywcze i odpady ogrodowe – stanowią największy ilościowo pojedynczy składnik odpadów komunalnych. Według Europejskiej Agencji Środowiska¹ w 2017 r. udział bioodpadów w masie odpadów komunalnych w Europie przekraczał 34%. W Polsce udział bioodpadów OK w 2021 r. wynosił około 31%².

Ważne cele gospodarki odpadami w zakresie przygotowania odpadów komunalnych do ponownego użycia i recyklingu – 65% masy OK do roku 2035 – oraz ograniczenia składowania OK do 10% masy odpadów wytworzonych prawdopodobnie nie zostaną osiągnięte bez bardzo wysokiego poziomu selektywnego zbierania bioodpadów i ich przetwarzania przez kompostowanie lub fermentację.

Fermentacja metanowa

Fermentacja jest procesem mikrobiologicznym, w którym substancje organiczne są przekształcane w metan i ditlenek węgla. Przebiega w ekosystemach naturalnych i sztucznie stworzonych przez człowieka, które nie zawierają tlenu. Ogólny przebieg procesu opisuje równanie³:



Skład gazu zależy przede wszystkim od składu substratów poddawanych procesowi fermentacji. Ilościowo najczęściej gazu otrzymuje się z tłuszczów, a najmniej z węglowodanów. Gaz z rozkładu tłuszczów zawiera również najwyższą ilość metanu. Ilości i skład gazu uzyskiwane z rozkładu 1 kg różnych substancji organicznych podano w tabeli 1.

Tab. 1. Ilość i skład gazu powstającego z rozkładu 1 kg substancji organicznych

Rodzaj substratu	Zapis reakcji rozkładu	Ilość gazu [dm ³ /kg s.m.]	Skład gazu [% (v/v)]		
			CH ₄	CO ₂	NH ₃
Węglowodany	$(C_6H_{10}O_5)_m + mH_2O \rightarrow 3mCH_4 + 3mCO_2$	830	50	50	-
Tłuszcze	$4C_{50}H_{90}O_6 + 98H_2O \rightarrow 139CH_4 + 61CO_2$	1425	71	29	-
Białka	$4C_{16}H_{24}O_5N + 42H_2O \rightarrow 33CH_4 + 31CO_2 + 16NH_3$	1373	49	35	16
Biofrakcja z odpadów komunalnych*	$4C_{16}H_{27}O_8N + 24H_2O \rightarrow 36CH_4 + 28CO_2 + 4NH_3^*$	1117	46	38	16

* Ogólny wzór chemiczny przyjęto zgodnie z literaturą⁴

Wyrażając skład chemiczny biofrakcji z odpadów komunalnych wzorem C₁₆H₂₇O₈N oraz przyjmując, że rozkłada się ona całkowicie, a powstające gazy nie rozpuszczają się w roztworze, objętościowy skład gazu byłby następujący: 46% – metan, 38% – ditlenek węgla oraz 16% – amoniak.

Używając terminów chemicznych, fermentacja jest reakcją utleniania i redukcji, w której dawca i akceptor elektronów pochodzą z tej samej cząsteczki. Fermentacja przebiega w czterech etapach, przy udziale trzech grup mikroorganizmów, z których każda wymaga odpowiednich dla siebie, specyficznych warunków środowiskowych (zob. rys. 1).

Etap I – hydroliza, podczas której spolimeryzowane, w większości nierozpuszczalne związki organiczne (węglowodany, białka, tłuszcze) zostają przetworzone przez enzymy odpowiednich szczepów bakterii hydrolizujących w rozpuszczalne monomery i dimery (monocukry, aminokwasy i kwasy tłuszczowe).

Hydroliza jest generalnie uznawana za etap limitujący szybkość fermentacji odpadów stałych³. Podczas fermentacji stałych odpadów ulega rozkładowi tylko około 50% substancji organicznych (oznaczanych jako straty prażenia).

Etap II – acidogeneza, czyli faza zakwaszania, podczas której dominujące, fakultatywne bakterie acidogenne przetwarzają rozpuszczone w wodzie substancje chemiczne, w tym produkty hydrolizy, do krótkołańcuchowych kwasów organicznych (C₁-C₆), alkoholi, aldehydów oraz ditlenku węgla i wodoru. O rodzaju produktów tego etapu decyduje stężenie wodoru. Im wyższe ciśnienie parcjalne wodoru, tym więcej powstaje mniej zredukowanych produktów.

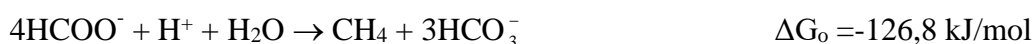
Etap III – octanogeneza; podczas której odpowiednie gatunki bakterii przetwarzają wyższe kwasy organiczne (głównie C₃-C₆) do kwasu octowego, ditlenku węgla i wodoru, czyli do substratów, które mogą być przekształcone w metan. Octanogeneza decyduje o wydajności produkcji biogazu. Przemiany wyższych kwasów organicznych, przebiegające w tej fazie, są źródłem około 12% ilości octanów i 8% wodoru wytwarzanych w procesie fermentacji odpadów (rys. 1).

Etap IV – metanogeneza; w tej fazie procesu metan, przy udziale bakterii metanowych, jest wytwarzany z następujących substratów:

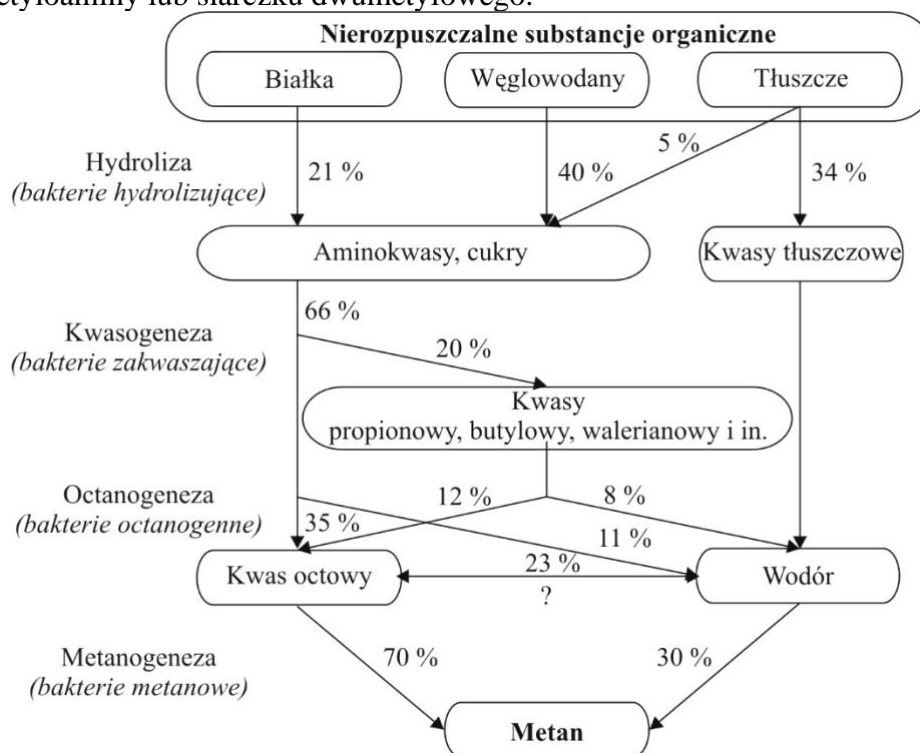
- o kwasu octowego (prawie 70%):



- o H₂ i CO₂ oraz mrówczanu:



oraz metanolu, metyloaminy lub siarczku dwumetylowego.



Rys. 1. Bilans ChZT procesu beztlenowego rozkładu substancji organicznych⁵

Na podstawie stechiometrycznych zależności ustalono, że prawie 70% metanu powstaje w procesie redukcji octanów (reakcja 2) (rys. 1), mimo że tylko kilka gatunków bakterii może produkować metan z octanów, podczas gdy prawie wszystkie znane bakterie metanowe są w stanie wytwarzać metan z wodoru i ditlenku węgla.

Droga przez wodór jest bardziej korzystna energetycznie niż ścieżka octanowa i nie limituje szybkości przemian przebiegających w komorze fermentacyjnej. Jest ona również bardzo istotna, ponieważ odpowiada za utrzymanie niskiego ciśnienia wodoru w układzie⁶.

W stabilnie przebiegającym procesie fermentacji szybkość tworzenia produktów pośrednich w danej fazie jest równa szybkości ich rozkładu w fazie następnej. W efekcie prawie cała ilość substancji organicznych ulegających biodegradacji zostaje przekształcona w końcowe produkty, tj. metan, ditlenek węgla, amoniak i siarkowodór.

Etapy I i II są ściśle ze sobą powiązane. Często nazywa się je „fermentacją kwaśną”, ponieważ produkty powstające w czasie ich przebiegu są kwasami (H₂, CO₂, kwas octowy, kwas propionowy, kwas masłowy, kwas mlekowy, kwas walerianowy). Podobnie ściśle powiązane ze sobą są etapy III i IV, bezpośrednio odpowiedzialne za produkcję metanu, określane nazwą „fermentacja metanogenna”. Stąd mówi się często o dwustopniowym układzie beztlenowego przekształcania substancji organicznych.

Surowce do biologicznego przetwarzania odpadów

Surowcem do biologicznych technologii przetwarzania może być szeroka gama odpadów organicznych, pod warunkiem że zawierają one substancje organiczne ulegające biodegradacji w wystarczającej ilości i substancje pokarmowe we właściwych proporcjach oraz wykazują odpowiednie uwodnienie i pH środowiska. Za wartość graniczną udziału substancji organicznej w odpadach, która pozwala na poddanie ich biologicznemu przetwarzaniu, przyjmuje się straty prażenia > 30%⁷. Wymagania są takie same dla technologii tlenowych (kompostowanie) i beztlenowych (fermentacja).

O przydatności surowca do biologicznego przetwarzania techniką tlenową lub beztlenową decyduje jego struktura (wielkość, kształt i wzajemny układ ziaren). Do kompostowania bardziej właściwe są odpady o porowatej strukturze, tworzące środowisko dobrze natlenione, o wystarczającej ilości wody, tj. o wilgotności od 50 do 60% (np. odpady ogrodowe, odpady zielone). Odpady organiczne pozbawione struktury, o dużej wilgotności (np. selektywnie zbierane bioodpady, trawy czy osady ściekowe) bardziej nadają się do procesu fermentacji, ponieważ podczas ich kompostowania istnieje niebezpieczeństwo kolmatacji i tworzenia się stref beztlenowych w pryzmach³. Z ogólnej ilości odpadów ulegających biodegradacji od 1/2 do 2/3 odpadów nadaje się bardziej do fermentacji niż do kompostowania.

Odpady komunalne poddawane są fermentacji metanowej w postaci biofrakcji (frakcja podsitowa z odpadów zmieszanych, z reguły frakcja < 80 mm) lub bioodpadów (selektywnie zbierane odpady kuchenne i ogrodowe oraz z przemysłu spożywczego).

W tabeli 2 przedstawiono skład chemiczny wybranych strumieni odpadów organicznych pochodzenia komunalnego³.

Tab. 2. Skład chemiczny odpadów komunalnych poddawanych biologicznym procesom przetwarzania³

Rodzaj odpadów	Zawartość wody [%]	Zawartość substancji organicznych [% s.m.]	Zawartość azotu [% s.m.]	Iloraz C/N	Produkcja biogazu [m ³ /kg s.m.o.]	Zawartość metanu w gazie [%]
Odpady z gospodarstw domowych	35-45	25-50	0,8-1,1	30-40	0,10-0,20	55-78
Odpady kuchenne	50-60	30-70	0,6-2,2	12- 20	0,15-0,50	60-65
Bioodpady	52-80	34-81	0,5-2,7	10- 25	0,15-0,60	58-65
Odpady ogrodowe	30-40	90	0,3-2,0	20-60	0,20-0,50	55-65
Odpady z targowisk	80-85	80-90	3-5	-	0,40-0,60	60-65
Liście	20	90	0,2-0,5	20-60	0,10-0,30	-
Osady ściekowe	70-80	70	0,1-9,5	ok. 10	0,40-0,60	78
Odpady z handlu	80-85	80-90	3,5	-	0,40-0,60	60-65

Do przetwarzania metodami biologicznymi nadają się również odpady z grup 02, 03 i 04 katalogu odpadów⁸:

- odpady z rolnictwa, ogrodnictwa, upraw hydroponicznych, rybołówstwa, leśnictwa, łowiectwa oraz przetwórstwa żywności – 02,
- odpady z przetwórstwa drewna oraz z produkcji płyt i mebli, masy celulozowej, papieru i tektury – 03,
- odpady z przemysłu skórzanego, futrzarskiego i tekstylnego – 04,

a także osady ściekowe i osady z uzdatniania wody pitnej i wody do celów przemysłowych – grupa 19 w katalogu odpadów.

Wykorzystanie odpadów pochodzenia zwierzęcego jako surowców do biologicznego przetwarzania jest możliwe, jeżeli spełniają one wymagania Rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 z 21 października 2009 r. określającego przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi⁹.

Biofrakcja z odpadów komunalnych

Wilgotność frakcji podsitowej < 80 mm wydzielanej w 20 instalacjach mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów w Polsce zmieniała się w zakresie wartości od 22,9 do 58,3% (wartość średnia wynosiła $37,5 \pm 10,8\%$). Substancje lotne stanowiły $41,6 \pm 7,9\%$ suchej masy odpadów, a zawartość węgla organicznego $24,1 \pm 4,6\%$ s.m.¹⁰.

Produkcja biogazu o zawartości CH₄ – 65% wahała się między 50 a 90 m³ na tonę wsadu.

Tab. 3. Skład morfologiczny frakcji < 80 mm wydzielonej ze zmieszanych odpadów komunalnych na sicie bębnowym [% (m/m)]¹⁰

Wyszczególnienie	Wartość minimalna	Wartość maksymalna	Rozstęp	Wartość średnia	Odchylenie standardowe	Mediana
Wybrane właściwości frakcji < 80 mm						
Wilgotność [%]	22,9	58,3	35,4	37,5	10,8	36,7
Straty prażenia [% s.m.]	23,1	54,3	31,3	41,6	7,9	41,3
Węgiel organiczny C _{org} , [% s.m.]	14,3	31,2	16,8	24,1	4,6	24,8
Skład morfologiczny [% (m/m)]						
Udział frakcji w masie odpadów [%]	20,9	68,0	47,2	49,1	10,2	48,5
Odpadki kuchenne i ogrodowe	21,0	74,3	53,4	49,5	12,5	51,8
Papier + tektura	1,8	19,0	17,2	9,6	4,5	9,8
Tworzywa sztuczne	0,6	15,9	15,4	5,7	3,6	5,1
Tekstylija	0,0	2,1	2,1	0,6	0,5	0,6
Szkło	4,1	26,3	22,2	10,9	5,5	9,5
Metale	0,3	4,0	3,7	1,3	1,0	1,0
Odpady wielomateriałowe	0,0	4,1	4,1	1,4	1,0	1,3
Odpady niebezpieczne	0,0	0,7	0,7	0,1	0,2	0,0
Odpady elektryczne i elektroniczne	0,0	0,3	0,3	0,0	0,1	0,0
Pozostałe odpady mineralne.	1,4	54,9	53,4	19,8	16,7	14,8
Inne kategorie	0,0	3,8	3,8	1,1	1,0	0,9
Razem	-	-	-	100,0	-	-

Bioodpady

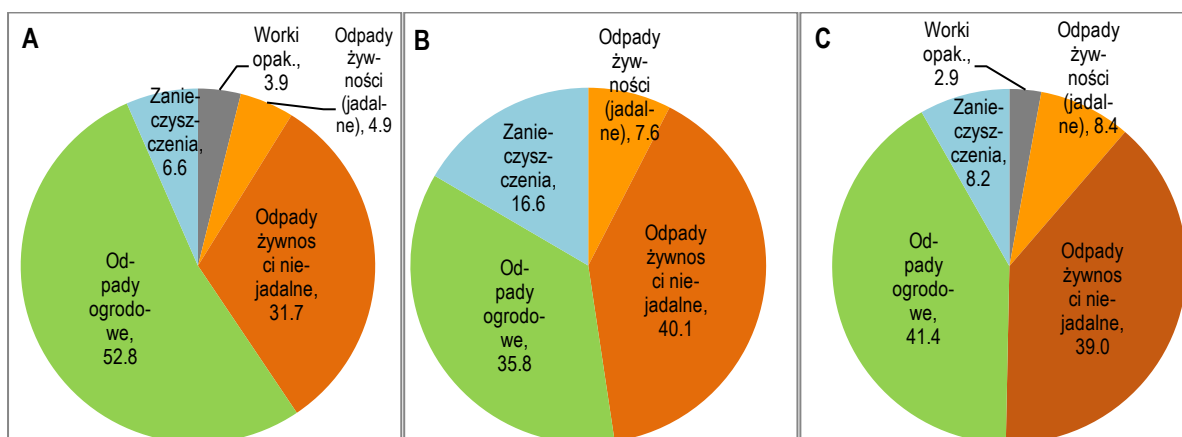
Bioodpady stanowią odpady kuchenne i ogrodowe zbierane selektywnie w dodatkowo postawionym do dyspozycji mieszkańców specjalnym pojemniku, z przeznaczeniem do biologicznego przetwarzania. W pojemnikach na bioodpady mogą być zbierane również różnorodne, wartościowe odpady organiczne z rzemiosła. Ich skład zależy od pory roku, struktury zabudowy, przyzwyczajzeń mieszkańców, a przede wszystkim od czasu trwania i skuteczności prowadzenia selektywnego zbierania.

Na rys. 2 przedstawiono średni roczny skład morfologiczny selektywnie zbieranych bioodpadów z gospodarstw domowych, z miast z zabudowy jednorodzinnej i wielorodzinnej oraz z terenów wiejskich. Badania przeprowadzono na terenie województwa lubuskiego w okresie od listopada 2021 do października 2022 r.¹¹.

Na terenach z zabudową jednorodziną (we wsiach i w miastach) bioodpady zbierane są w workach koloru brązowego, natomiast w dzielnicach miast z zabudową wielorodzinną w pojemnikach 1100 dm³ koloru brązowego, ulokowanych na dziedzińcu lub innym miejscu dostępnym z budynku.

Bioodpady odbierane z terenów miejskich z zabudową wielorodzinną w miastach (MW) oraz z terenów wiejskich (W) zawierały więcej odpadów żywności (kolejno 47,6 i 37,4%) niż bioodpady z terenów z zabudową jednorodziną w miastach (MJ) (36,7%). Odpady jadalne stanowiły od 4,9% (MJ) do 8,4% masy bioodpadów w przypadku gmin wiejskich (rys. 2). W odpadach żywności jadalnej przeważały odpady owoców i warzyw, których udział wahał się w zakresie od 59,1% (MW) do 72,8% (W). Wysoki był też udział

chleba i pieczywa – od 18,8% (W) do 25,1% (MJ). W odpadach żywności niejadalnej odpady owoców i warzyw stanowiły od 98,1 do 99,4% ich masy.



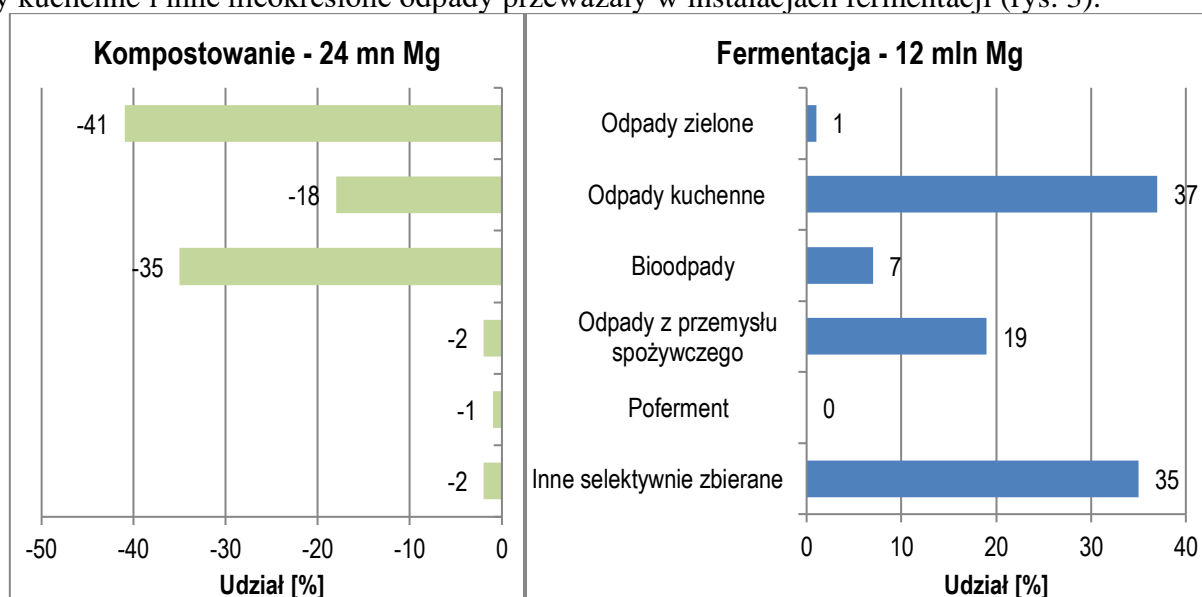
Rys. 2. Średni skład morfologiczny bioodpadów zbieranych selektywnie w gospodarstwach domowych w miastach w dzielnicach z zabudową jednorodzinną (A) i wielorodzinną (B) oraz na terenach wiejskich (C)¹¹

Udział odpadów ogrodowych w bioodpadach z miast wynosił średnio 35,8% (MW) i 52,8% (MJ), a w bioodpadach zbieranych na terenach wiejskich 39% (rys. 2). Wysoki udział odpadów ogrodowych w bioodpadach z zabudowy jednorodzinnej w miastach jest zrozumiały. Domy te mają zazwyczaj małe ogródki, które zwykle wykorzystywane są jako małe sady, ogrody kwiatowe, trawniki i rabaty.

Zanieczyszczenia stanowiły średnio 6,6% masy bioodpadów z zabudowy jednorodzinnej w miastach i 8,2% masy bioodpadów zbieranych na terenach wiejskich, bez worków (rys. 2). W bioodpadach z zabudowy wielorodzinnej w miastach, zbieranych w pojemnikach, udział zanieczyszczeń wynosił średnio 16,6%. Tak wysoki udział zanieczyszczeń może dyskwalifikować ten strumień bioodpadów do produkcji wysokiej jakości kompostu.

W krajach Unii Europejskiej (UE27) w 2021 roku zebrano selektywnie i poddano kompostowaniu i fermentacji łącznie 45 mln ton bioodpadów komunalnych¹², z czego 70% wysłano do kompostowania, a 30% do fermentacji beztlenowej. Ilość ta odpowiadała 19% masy wytworzonych odpadów komunalnych. Dane odnoszą się do bioodpadów zgodnie z definicją zawartą w dyrektywie europejskiej nr UE 2018/851 i nie obejmują mechanicznych procesów biologicznego przetwarzania, odpadów/produktów rolniczych ani osadów ściekowych.

Obserwuje się duże zróżnicowanie ilości selektywnie zbieranych bioodpadów przeliczonych na jednego mieszkańca w poszczególnych krajach, wahające się od 0 (Malta) do maksymalnie 200 kg/mieszkańca/rok (Luksemburg)¹². Głównym surowcem w kompostowniach były odpady zielone i bioodpady, podczas gdy odpady kuchenne i inne nieokreślone odpady przeważały w instalacjach fermentacji (rys. 3).



Rys. 3. Rodzaje bioodpadów poddawane biologicznemu przetwarzaniu (zgodnie z definicją zawartą w dyrektywie europejskiej nr UE 2018/851)¹³

Wyłącznie bioodpady przetwarza większość kompostowni (88%) i tylko 48% zakładów fermentacji. Stwierdzono, że jedynie 5% kompostowni stabilizowało tlenowo poferment w obiektach zintegrowanych z instalacją fermentacji metanowej, mimo że obecnie takie rozwiązanie przetwarzania odpadów żywnościowych uznawane jest za korzystne dla środowiska. Przewiduje się, że udział ten będzie wzrastał w kolejnych latach.

Klasyfikacja technologii

Technologia fermentacji odpadów stałych nie odbiega od technologii stosowanych do przetwarzania osadów ściekowych, wysoko obciążonych ścieków czy też odpadów z produkcji rolniczej. Różnice występują w budowie reaktorów, ale przede wszystkim w rozwiązaniach instalacji przygotowania surowców do fermentacji i końcowej obróbki produktu. Procesy jednostkowe przygotowania odpadów mogą obejmować: przesiewanie, magnetyczne oddzielenie metali, ręczne lub mechaniczne sortowanie, rozdrobnienie, przeprowadzanie odpadów stałych w zawieszinę i segregację gęstościową. Obróbka końcowa obejmuje procesy: odwadniania pofermentu, stabilizacji tlenowej (kompostowanie) pofermentu, oczyszczania i uszlachetniania kompostu.

Warunki technologiczne procesu fermentacji odpadów charakteryzowane są przez cztery podstawowe parametry, wynikające głównie z mechanizmu procesu fermentacji metanowej oraz z wymogów prowadzenia procesów biologicznych w skali technicznej³. Są to:

- liczba stopni fermentacji: technologie jedno- i wielostopniowe,
- wilgotność substratu; fermentacja: mokra, półsucha i sucha,
- temperatura fermentacji: fermentacja mezofilowa i termofilowa,
- przepływ substancji: ciągła lub okresowa.

Fermentacja jedno- i wielostopniowa

W technologiach jednostopniowych cały proces fermentacji przebiega w jednym bioreaktorze. W przypadku instalacji o dużej przepustowości stosuje się kilka jednostopniowo eksploatowanych bioreaktorów połączonych równolegle. W technologiach jednostopniowych stosowane są reaktory z pełnym wymieszaniem (technologie mokre), o przepływie tłokowym (technologie suche) i perkolacyjne.

Reaktory jednostopniowe eksploatowane są zarówno w mezo-, jak i termofilowym zakresie temperatur. Ich zaletą jest prosta eksploatacja, przy niskich kosztach inwestycyjnych i eksploatacyjnych. Wadą zaś jest brak możliwości optymalizacji procesu poprzez sterowanie jego poszczególnymi fazami (tab. 4).

W procesie prowadzonym w jednej komorze fermentacyjnej parametry jej pracy oraz obciążenie ładunkiem organicznym są tak dobierane, aby zapewnić najlepsze warunki dla jednoczesnego rozwoju wszystkich organizmów. Parametry technologiczne w jednostopniowym procesie fermentacji są więc kompromisem. Warunki środowiskowe dla rozwoju poszczególnych grup mikroorganizmów mogą zostać poprawione, jeśli proces będzie realizowany w dwóch lub więcej etapach, w oddzielnych reaktorach.

Wyróżnia się trzy rozwiązania dwustopniowej fermentacji:

- w pierwszym wariantcie: w I reaktorze tzw. upłynniającym prowadzi się hydrolizę i fazę kwaśną, natomiast w II reaktorze, zwykle przepływowym, octanogenezę i metanogenezę – fermentacja dwustopniowa,
- w drugim wariantcie: w I komorze prowadzony jest wstępny rozkład substancji organicznych w warunkach termofilowych, a w II komorze fermentacja mezofilowa lub odwrotnie – fermentacja dwustopniowa, zmiennotemperaturowa,
- w wariantcie trzecim: zawieszinę usuwaną z reaktora hydrolizy rozdziela się na fazę ciekłą i stałą; przy czym fazę ciekłą, w której składniki metanogenne stanowią ok. 70%, doprowadza się do reaktora intensywnej metanogenezy – fermentacja dwustopniowa, z rozdziałem faz.

Podstawową korzyścią dwustopniowych systemów fermentacji okazała się większa stabilność biologicznych przemian odpadów, których fermentacja w procesach jednostopniowych jest trudna lub nawet niemożliwa (tab. 4).

Zastosowanie dwustopniowej fermentacji skraca czas trwania procesu nawet o kilka dni.

Najczęściej stosowane są technologie dwustopniowe, różniące się rodzajem biocenoz angażowanych w kolejnych stopniach procesu.

Korzyści związane ze stosowaniem systemów dwustopniowych nie znalazły znaczącego uznania w praktyce. Dodatkowe koszty inwestycyjne związane z budową drugiej komory, bardziej złożona eksploatacja, słabo udokumentowany wzrost szybkości hydrolizy i metanolizy oraz w przeciwwadze wysokie szybkości

fermentacji osiągane w jednostopniowych systemach powodują, że buduje się niewiele instalacji dwustopniowych¹⁴. Fermentacja jednostopniowa prowadzona jest obecnie w > 90% działających instalacji.

Tab. 4. Zalety i wady procesu fermentacji jedno- i dwustopniowej

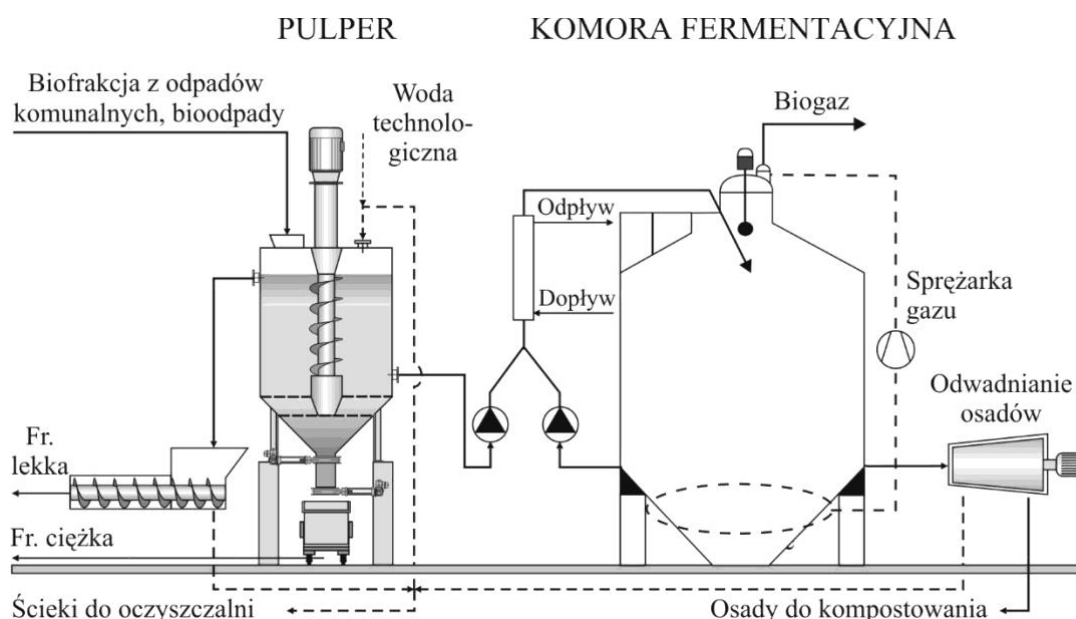
Cechy	Metoda jednostopniowa	Metoda wielostopniowa
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> ○ Stabilna produkcja gazu, prosty i przejrzysty sposób prowadzenia procesu ○ Niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Krótszy czas trwania procesu ○ Wysoka stabilność procesu fermentacji odpadów łatwo biodegradowalnych ○ Dopuszczalne wyższe obciążenia komór s.m.o. ○ Lepsza możliwość sterowania parametrami procesu
Wady	<ul style="list-style-type: none"> ○ Brak optymalnych warunków dla przemian biochemicznych i możliwości oddziaływania na poszczególne fazy fermentacji ○ Niebezpieczeństwo hamowania procesu przez amoniak lub nadmiernie zakwaszony wsad 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Złożony proces technologiczny ○ Zamknięty obieg wody procesowej może prowadzić do jej wzbogacenia w substancje toksyczne ○ Mniejsza wydajność biogazu (w procesach z rozdziałem faz) ○ Wysokie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne

Fermentacja mokra i sucha

Pojęciem „mokra fermentacja” określa się fermentację, w której substrat ma konsystencję pozwalającą na jego pompowanie. Granicą jest zawartość suchej masy we wsadzie < 15%. Procesem najbardziej rozpowszechnionym jest jednostopniowa fermentacja mezofilowa zawiesiny odpadów o zawartości substancji stałych od 4 do 8%, z mieszaniem. Fermentacja prowadzona jest w wydzielonych, zamkniętych komorach fermentacyjnych, w sposób ciągły.

Prowadzenie fermentacji stałych odpadów organicznych w wydzielonej, zamkniętej komorze w układzie jednostopniowym jest możliwe po wcześniejszym ich przekształceniu w formę zawiesiny o zawartości od 4 do 8% s.m. Oznacza to, że do tony bioodpadów organicznych o typowej wilgotności należy dodać od 5 do 14 m³ wody.

Typowa instalacja do jednostopniowej mokrej fermentacji odpadów składa się z pulpera i komory fermentacyjnej (rys. 4).



Rys. 4. Typowa instalacja do jednostopniowej fermentacji odpadów metodą mokrą

Biofrakcja odpadów komunalnych lub bioodpady wprowadzane są do pulpera, w którym są intensywnie mieszane z wodą technologiczną za pomocą szybkoobrotowego mieszadła. W pulperze odpady przetwarzane są w jednorodną, dającą się pompować zawiesinę oraz oczyszczane z zanieczyszczeń.

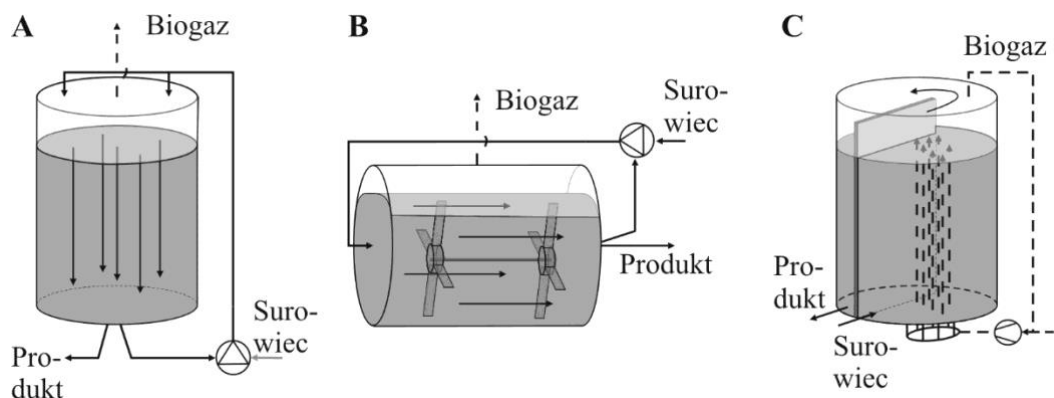
Pozbawiona zanieczyszczeń zawiesina pompowana jest do komory fermentacyjnej poprzez mieszacz iniekcyjny i wymiennik ciepła. W urządzeniach tych następuje wymieszanie osadów surowych z osadem recykulowanym z komory fermentacyjnej w celu wstępnego podgrzania osadu surowego i zaszczepienia go osadem znajdującym się w fazie fermentacji metanowej.

Prawidłowa i niezawodna praca pomp do transportu zawiesiny do komory fermentacyjnej wymaga maksymalnego usunięcia z odpadów zanieczyszczeń mineralnych przy minimalnych stratach składników ulegających biodegradacji. Często stopień usunięcia drobnej frakcji mineralnej z zawiesiny biofrakcji w pulperze jest niewystarczający i konieczne jest jej doczyszczenie w hydrocyklonie lub sitopiaskowniku.

Fermentacji suchej poddawany jest substrat o zawartości suchej masy do 40%. Powyżej tej wartości występują zjawiska hamowania procesów biologicznych, wynikające z niedostatku wody. Niższa zawartość wody oznacza wyższe stężenie substancji organicznych, a co za tym idzie, większą produkcję gazu na jednostkę pojemności reaktora. Technologia wymaga mniejszej objętości reaktora oraz mniejsze są strumienie przerabianej materii.

Obróbka wstępna odpadów komunalnych do fermentacji suchej obejmuje procesy takie jak: usuwanie metali, rozdrabnianie i przesiewanie w sitach obrotowych, a w przypadku bioodpadów jedynie rozdrabnianie. Nie ma potrzeby usuwania z odpadów przed fermentacją frakcji ciężkich (drobnych kamieni i szkła) oraz lekkich, które przechodzą przez sito (lub ich dodatkowego rozdrabniania), tak jak w przypadku technologii mokrych. Do transportu i przemieszczania odpadów stosowane są przenośniki taśmowe, podajniki ślimakowe oraz specjalne pompy zaprojektowane do transportu bardzo lepkich cieczy.

Ciągłą fermentację suchą prowadzi się w reaktorach o przepływie tłokowym (rys. 5).



Rys. 5. Typy reaktorów do suchej fermentacji odpadów; A – rozwiązanie Dranco, B – system Kompogas i C – rektor Valorga³

Za podstawowe zalety fermentacji mokrej uznaje się wysoką stabilność prowadzenia procesu, możliwość stosowania konwencjonalnych technik mieszania i transportu oraz łatwiejsze stopniowanie procesu (tab. 5). Podstawowymi zaletami procesu suchego są natomiast możliwość fermentacji organicznej frakcji odpadów komunalnych bez jej wstępnego przygotowania (przesiewania, rozdrabniania), niższe koszty końcowej obróbki produktu i mniejsza objętość reaktora. Korzystnymi cechami tego sposobu prowadzenia procesu fermentacji są również mniejsze zapotrzebowanie na ciepło (ze względu na mniejszą masę odpadów) oraz mniejsze zużycie wody. Fermentacja sucha prowadzona jest w blisko 70% działających instalacji

Tab. 5. Zalety i wady procesu fermentacji mokrej i suchej

Cechy	Fermentacja mokra	Fermentacja sucha
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> ○ Dobre usunięcie składników inertnych i ciężkich zanieczyszczeń w fazie przygotowania surowca ○ Konwencjonalne metody transportu i mieszania ○ Korzystniejsza wymiana energii i substancji odżywczych między składnikami substratów ○ Stabilna produkcja gazu 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Mała objętość reaktora ○ Małe przepływy substancji ○ Prosta wstępna obróbka odpadów ○ Mniejsze straty składników biodegradowalnych w obróbce wstępnej ○ Małe zapotrzebowanie na wodę i ciepło
Wady	<ul style="list-style-type: none"> ○ Większa pojemność reaktorów ○ Duże zapotrzebowanie na wodę 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Specjalne techniki transportu i mieszania

<ul style="list-style-type: none"> ○ Duże zapotrzebowanie na energię ○ Duże przepływy materii ○ Ścieranie piaskiem elementów instalacji ○ Wymagane dodatkowe procesy rozdziału fazy stałej i ciekłej 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Możliwość wystąpienia niepełnej fermentacji ○ Zagrożenie spadku produkcji gazu przy zbyt wysokim jednostkowym obciążeniu reaktora
--	--

Koszty budowy instalacji do fermentacji suchej i mokrej są zbliżone, ponieważ wyższe koszty urządzeń do transportu i mieszania odpadów stałych (fermentacja sucha) są rekompensowane przez niższe koszty budowy instalacji do obróbki wstępnej odpadów i mniejszej komory.

Fermentacja mezo- i termofilowa

W zależności od temperatury, w której prowadzony jest proces fermentacji, oraz od związanego z nią rodzaju bakterii biorących udział w procesie rozróżnia się:

- fermentację mezofilową – z udziałem bakterii mezofilnych, aktywnych w temperaturze od 25 do 45°C,
- fermentację termofilową – powodowaną przez bakterie termofilne, aktywne w temperaturze od 45 do 60°C.

Optymalny zakres temperatury z punktu widzenia szybkości procesu dla fermentacji mezofilowej to 30-35°C, a dla fermentacji termofilowej 52-55°C. Szybkość fermentacji determinuje czas jej trwania.

W tabeli 6 pokazano wady i zalety obu sposobów prowadzenia procesu.

Tab. 6. Zalety i wady fermentacji mezo- i termofilowej

Cechy	Fermentacja mezofilowa	Fermentacja termofilowa
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> ○ stabilne prowadzenie procesu ○ małe zapotrzebowanie energii procesowej 	<ul style="list-style-type: none"> ○ wyższy o ok. 10% stopień rozkładu ○ większa prędkość rozkładu ○ pełna higienizacja produktu
Wady	<ul style="list-style-type: none"> ○ brak pełnej higienizacji produktu 	<ul style="list-style-type: none"> ○ wrażliwość na wahania temperatury i stężenia ○ czasami mniejsza produkcja energii netto ○ niekiedy gorsza jakość kompostu

Fermentacja okresowa

W technologiach okresowych reaktor napełniany jest do określonego poziomu i opróżniany, gdy substrat zostanie rozłożony w wymaganym stopniu. Mają one tę zaletę, że są bardzo proste pod względem technicznym. Są stosowane przede wszystkim do fermentacji odpadów stałych, najczęściej o zawartości od 35 do 40% s.m.

Główne zalety tej technologii to prosta konstrukcja komory i potrzeba tylko minimalnego przygotowania surowca, a podstawową wadą – okresowa praca (tab. 7).

Tab. 7. Zalety i wady technologii okresowych

Zalety	Wady
<ul style="list-style-type: none"> ○ Tańsze rozwiązania reaktorów ○ Wszystkie substraty mają ten sam czas przetrzymania 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Z reguły wymagane jest kilka reaktorów ○ Wyższe koszty eksploatacji (personel, organizacja) ○ Nierównomierność ilościowo-jakościowa produkcji biogazu ○ Niekiedy niższy stopień rozkładu

Produkty fermentacji

W procesie fermentacji powstają dwa główne produkty:

- biogaz,
- przefermentowany materiał (poferment).

Biogaz

Biogaz zawiera od 50 do 70% (v/v) metanu, od 25 do 40% ditlenku węgla oraz małe ilości siarkowodoru i amoniaku. Stężenie H₂S w gazie waha się od 0,01 do 0,4% (v/v), w zależności od składu surowca, a może wynosić nawet do 2% (v/v). W gazie mogą być obecne niewielkie ilości wodoru, azotu, tlenu węgla,

chlorowcowanych węglowodorów i tlenu. Biogaz zwykle jest nasycony parą wodną (5% (v/v)) i może zawierać pewne ilości pyłów.

Tab. 8. Właściwości biogazu

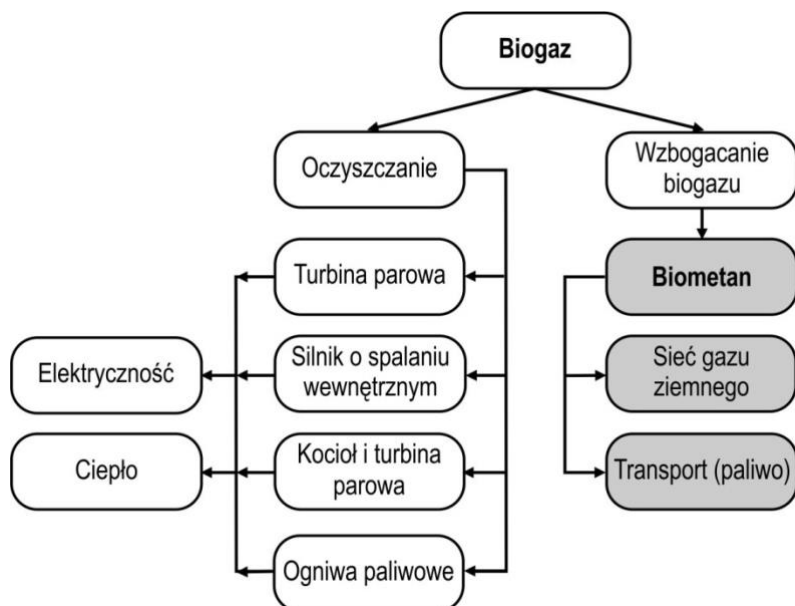
Właściwości	Składniki biogazu			Biogaz (CH ₄ – 65%)
	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	
Udział w biogazie [% (v/v)]	55-75	24-44	0,1–0,7	100
Wartość opałowa [kWh/m ³]	10-11,1	-	6,3	6,5
Granica wybuchowości w powietrzu [% (v/v)]	4,4-15,5	-	4,3-45,5	6-12
Temperatura samozapłonu [°C]	595	-	270	650-750
Krytyczne ciśnienie [MPa, (bar)]	4,7, 47	7,5, 75	9, 90	7,5-8,9, 75-89
Temperatura krytyczna [°C]	-82,0	31,0	100	-82,5
Gęstość (w 20°C, pod 1,013 bar) [kg/m ³]	0,67	1,98	1,54	1,2
Gęstość względna (powietrze = 1)	0,56	1,5	1,2	0,83
Liczba metanowa	100	73	-	135
Prędkość płomienia (laminarna) [m/s]	0,43	-	-	0,36-0,38

Biogaz może być wykorzystywany do celów zobrazowanych na rys. 6¹⁵, to jest:

- produkcji energii elektrycznej i/lub ciepłej w wyniku spalania w elektrociepłowniach zblokowanych lub kotłowniach,
- zasilania sieci gazu ziemnego,
- produkcji paliwa.

Siarkowódor obecny w biogazie tworzy z parą wodną bardzo korozyjny kondensat. Przed wykorzystaniem musi zatem zostać odpowiednio oczyszczony. Praktycznie wszystkie instalacje wykorzystania biogazu wymagają jego osuszenia i odsiarczenia do poziomu 100-300 ppm H₂S. Przy wyższym stężeniu (do 500 ppm – zawartość maksymalna wymagana zazwyczaj przez producentów urządzeń) silnik po roku pracy może sprawiać poważniejsze kłopoty. Ciepło wytwarzane przy produkcji energii elektrycznej jest częściowo wykorzystywane do ogrzewania komory fermentacyjnej, ale może być również wykorzystywane do ogrzewania budynków lub wody.

Przy zasilaniu biogazem sieci gazu ziemnego niezbędne jest dostosowanie jego składu do parametrów jakościowych wymaganych dla paliw gazowych przesyłanych sieciami przesyłowymi i dystrybucyjnymi, co wymaga usunięcia z niego pary wodnej, siarkowodoru (< 7 mg/m³), amoniaku i ditlenku węgla. Wprowadzenie biometanu do sieci prowadzi do wyparcia gazu ziemnego i w konsekwencji do zmniejszenia emisji gazów cieplarnianych. Biometan można również upłynnić, ale obecnie nie jest to opcja ekonomiczna. Biometan może być wykorzystany bezpośrednio do celów transportowych jako paliwo do pojazdów napędzanych CNG (sprężony gaz ziemny) lub LNG (skroplony gaz ziemny). Pojazdy zasilane tymi gazami nie wymagają żadnych przeróbek i dostosowań. Biometan może być też wykorzystywany przy produkcji wielu związków chemicznych (np. kwasy organiczne, alkohole).



Rys. 6. Wykorzystanie biogazu

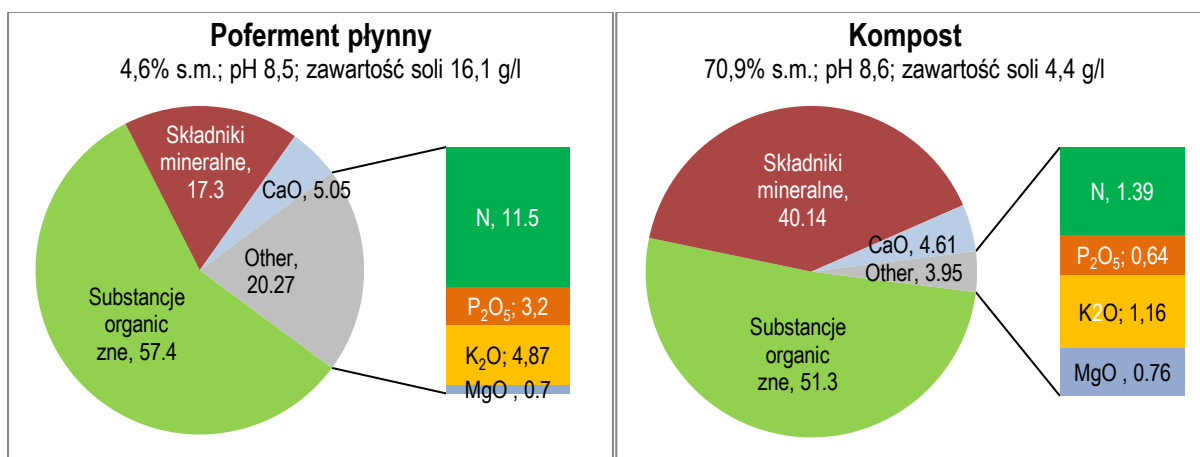
Poferment – możliwości wykorzystania i zastosowanie

Poferment jest bogatym w składniki odżywcze produktem ubocznym fermentacji, najczęściej wykorzystywanym jako nawóz lub środek poprawiający właściwości gleby.

Poferment klasyfikowany jest jako odpad⁸. Odpady takie mogą być poddane procesowi unieszkodliwiania poza instalacjami na podstawie przepisów Ustawy z 14 grudnia 2012 r. o odpadach. Aby wykorzystać poferment w rolnictwie, należy spełnić wymogi zawarte w Rozporządzeniu Ministra Środowiska z 20 stycznia 2015 r. w sprawie procesu odzysku R10, co oznacza obróbkę na powierzchni ziemi, przynoszącą korzyści dla rolnictwa lub poprawę jakości środowiska. Poferment z fermentacji odpadów komunalnych ulegających biodegradacji zbieranych selektywnie (kod 19 06 04) musi spełniać wymagania jak dla komunalnych osadów ściekowych, określone w przepisach ustawy o odpadach i w przepisach wydanych na podstawie art. 96 ust. 13 tej ustawy, przy czym posiadacz odpadów dysponuje wynikami badań potwierdzającymi jakość odpadów i jakość gleb, na których odpady mają być stosowane, wykonanych przez laboratorium, o którym mowa w art. 147a ust. 1 pkt 1 lub ust. 1a Ustawy z 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska.

Istnieje także możliwość wprowadzenia pofermentu do obrotu jako nawóz organiczny lub środek poprawiający właściwości gleb zgodnie z artykułem 2 Ustawy z 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu. Pozwolenie wydawane jest na wniosek producenta. Ocena pofermentu z biogazowni jako organicznego nawozu lub środka poprawiającego właściwości gleby odbywa się na podstawie Rozporządzenia Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu, gdzie określony jest zakres badań produktu, wymagana dokumentacja, minimalne wymagania jakościowe, dopuszczalne rodzaje zanieczyszczeń chemicznych, biologicznych i ich wartości graniczne oraz jednostki upoważnione do przeprowadzania badań i wydawania opinii.

W zależności od rodzaju surowców i przyjętej technologii fermentacji poferment zawiera od 2 do 6% (system mokry) lub od 18 do 30% (system suchy) suchej masy. Na rysunku 7 porównano właściwości pofermentu płynnego i kompostu z bioodpadów.



Rys. 7. Właściwości pofermentu płynnego i kompostu z bioodpadów

Nie ma potrzeby odwadniania pofermentów. Często są one wykorzystywane do nawożenia gruntów w postaci płynnej. Przefermentowany materiał w postaci płynnej może być wprowadzany do gruntu metodą bezpośredniej iniekcji (wstrzykiwania), metodą deszczowania lub poprzez rozlewanie na powierzchnię gleby przy pomocy maszyn rolniczych wykorzystywanych do stosowania gnojowicy. Ze względu na emisję amoniaku do atmosfery oraz uciążliwości odorowe deszczowanie nie jest metodą zalecaną. Stosowanie uwodnionych osadów jest ograniczone w czasie. Nawodnienia mogą być prowadzone jedynie w okresie, w którym azot (łatwiej dostępny po fermentacji) zostanie pobrany przez rośliny i nie będzie migrował w głąb gruntu i w konsekwencji do wody gruntowej. Korzyścią wykorzystywania uwodnionego pofermentu jest łatwiejsze przyswajanie amoniaku przez rośliny niż azotu organicznego. Rynek na płynny poferment może się zwiększyć przez rozwój systemów hydroponiki.

Odwodnienie i stabilizacja tlenowa przefermentowanego materiału pozwala uzyskać produkt o wyższej jakości. Kompostowanie zapewnia rozkład pozostałych biodegradowalnych składników organicznych obecnych w pofermencie oraz przeprowadzenie azotu mineralnego do frakcji próchnicy. Kompost ma mniejszą objętość, łatwiej się go magazynuje, transportuje i rozprawdza na nawożonych terenach. Zalety i wady wykorzystywania pofermentu w postaci płynnej i stałej przedstawiono w tabeli 9.

Przy stosowaniu pofermentu jako nawozów należy kierować się zasadami zawartymi w ustawie o nawozach i nawożeniu oraz Kodeksie Dobrej Praktyki Nawozowej. Zalecana maksymalna dawka to 170 kgN/ha, a termin stosowania – od 1 marca do 30 listopada.

Tab. 9. Zalety i wady wykorzystywania pofermentu w postaci płynnej i stałej

Cechy	Poferment z fermentacji mokrej: 2-6% s.m. Bezpośrednie wykorzystanie w rolnictwie	Poferment z fermentacji suchej, produkt odwadniania pofermentu z fermentacji mokrej: 18-30% s.m.	Stabilizacja tlenowa pofermentu stałego
Zalety	<ul style="list-style-type: none"> ○ Dostarcza składniki odżywcze i organiczne oraz nawadnia glebę ○ Poprawia żyzność gleby ○ Można łatwo pompować 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Znacznie zmniejsza objętość ○ Zwiększa żyzność gleby ○ Poprawia strukturę gleby i retencję wody w glebie ○ Może być przechowywany na polach, ułożony w przyzmy 	Nawóz – kompost stosowany w rolnictwie
Wady	<ul style="list-style-type: none"> ○ Może być źródłem patogenów i związków azotu, które mogą być przenoszone do wód gruntowych i powierzchniowych ○ Możliwa emisja amoniaku 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Zanieczyszczenie gleby i wody w przypadku niewłaściwego magazynowania ○ Emisja odorów, jeśli nie jest odpowiednio zarządzany 	

Potencjalne emisje do środowiska

Instalacje do fermentacji metanowej odpadów mogą niekiedy negatywnie oddziaływać zarówno na środowisko, jak i na zdrowie i bezpieczeństwo ludzi. Podstawowe zagrożenia to:

- emisje do wody:
 - ścieki z samochodów dostawczych,
 - ścieki odwadniania pofermentu,
 - spływy z dachów i powierzchni utwardzonych,
 - obróbka wstępna odpadów
 - inne;
- emisja odorów w biogazie i w gazach odlotowych podczas stabilizacji tlenowej pofermentu;
- emisje do powietrza ze spalania biogazu.

Średnie zużycie wody na tonę odpadów wynosi 0,56 m³, zakres wartości od 0,006 do 3,1 m³. Średnie zużycie energii elektrycznej na tonę przetworzonych odpadów wynosi około 45 kWh, przy zakresie 2-150 kWh.

Ścieki technologiczne z procesu fermentacji

W procesie odwadniania przefermentowanych odpadów powstają ścieki w ilości od 0,1 do 0,83 m³/Mg wsadu, średnio 0,5 m³/Mg wsadu. Więcej ścieków powstaje w technologiach mokrych niż suchych. Ścieki z procesów fermentacji zawierają znaczne ładunki rozpuszczonych substancji organicznych, zawiesin oraz form azotu mineralnego (ponad 1000 mg/dm³). Ścieki z procesów termofilowych są bardziej obciążone zanieczyszczeniami niż ścieki z procesów mezofilowych. Skład chemiczny ścieków technologicznych z procesów fermentacji przedstawiono w tabeli 10.

Tab. 10. Wybrane parametry ścieków technologicznych z instalacji fermentacji bioodpadów³

Oznaczenie	Ścieki z samochodów dostawczych	Ścieki z odwadniania pofermentu	Spływy z dachów i powierzchni utwardzonych	Rozdrabnianie odpadów, inne
Liczba wyników	2	7	3-9	2-4
pH	3,9	7,8	7,1	7,7
ChZT [g O ₂ /dm ³]	64,1	14,35	0,42	0,80
BZT ₅ [g O ₂ /dm ³]	35,2	4,23	0,12	0,22
Przewodność właściwa [mS/cm]	18,4	11,7	0,91	3,22
Azot amonowy [mg N _{NH4} /dm ³]	774	1490	7,60	9,8
Fosfor og. [mg P/dm ³]	799	91	5,2	5,5

Emisje do powietrza

Proces fermentacji metanowej prowadzony jest w instalacji zamkniętej, ale emisje do atmosfery, w tym emisje odorów, mogą wystąpić na przykład z procesów:

- rozładunku odpadów i magazynowania surowców,
- obróbki wstępnej surowców,
- transportu odpadów do i z komory fermentacyjnej,
- magazynowania na otwartym terenie,
- kondycjonowania pofermentu,
- oczyszczania i przetwarzania końcowego biogazu.

Związki odpowiedzialne za powstawanie odorów w procesach przetwarzania odpadów organicznych należą do kilku głównych grup: lotne kwasy tłuszczowe, amoniak i inne związki zawierające azot, ketony, związki aromatyczne oraz nieorganiczne i organiczne związki siarki.

W tabeli 11 przedstawiono stężenia lotnych związków organicznych, amoniaku (NH₃) i siarkowodoru (H₂S) w biogazie przed zbiornikiem gazu, w gazach odlotowych po spalaniu biogazu w gazmotorach oraz podczas tlenowej stabilizacji (kompostowania) pofermentu. W tabeli 12 zaprezentowano natomiast emisje do atmosfery z procesu fermentacji i ze spalania biogazu.

Całkowite wyeliminowanie emisji odorów z zakładów biologicznego przetwarzania odpadów ulegających biodegradacji jest niewykonalne ze względów ekonomicznych.

Zmniejszenie emisji odorantów można osiągnąć poprzez:

- prowadzenie procesów w warunkach optymalnych,
- zastosowanie odpowiednich rozwiązań budowlanych i technologicznych oraz właściwy dobór urządzeń (należy hermetyzować wszystkie ważne węzły instalacji – w zamkniętych obiektach powinny być prowadzone przede wszystkim rozładunek bioodpadów oraz ich przetwarzanie),
- oczyszczenie gazów odlotowych.

Tab. 11. Stężenia lotnych związków w biogazie przed zbiornikiem magazynowym gazu, po spalaniu w gazmotorach oraz podczas stabilizacji tlenowej pofermentu (mg/Nm³)¹⁶

Związki	Fermentacja		Kompost. po fermentacji
	Biogaz przed zbiornikiem	Gazy po spalaniu biogazu	
Alkohole	44	< 0,1	0,6
Ketony i aldehydy	28	0,6	6
Terpeny	2060	0,3	21
Estry	3,1	0	< 1
Organiczne związki siarki	17	3,0	2
Etery	3,0	< 0,1	0,3
NH ₃	18	0	➤ 500
H ₂ S	170	0	nie wykryto
Inne	12	0,3	0
Suma	2360	4,3	440

Tab. 12. Emisje do atmosfery z procesu fermentacji i ze spalania biogazu (w mg/Nm³), z wyjątkiem przepływu i odoru

Zanieczyszczenie	Z procesu fermentacji	Ze spalania biogazu
Przepływ (Nm ³ /h)	480-90 000	25,8-48 600
Pył	-	0,21-21
SO _x	-	0,7-436
NO _x	-	60-822
CO	-	0,7-1816
H ₂ S	-	0,14-0,75
NH ₃	0,46-83	-
CH ₄	0-895	0,004-681
Całkowite LZO	-	599-2900
NMLZO	Bd.	0,6-93
Odory (OUE/m ³)	0-2 967	-

Bd. – brak danych

W celu ograniczenia emisji zorganizowanej pyłów, związków organicznych i odorów, w tym H₂S i NH₃, do powietrza stosuje się jedną z poniższych technik lub ich kombinację:

- adsorpcja;
- filtr biologiczny:
 - w przypadku wysokiej zawartości NH₃ (np. 5-40 mg/Nm³) w celu kontrolowania pH środowiska i ograniczenia tworzenia N₂O w filtrze biologicznym może być potrzebne wstępne podczyszczenie gazów odlotowych przed filtrem biologicznym (np. za pomocą płuczki wodnej lub kwasowej),
 - niektóre inne związki zapachowe (np. merkaptany, H₂S) mogą powodować zakwaszenie środowiska filtra biologicznego i wymagają użycia płuczki wodnej lub zasadowej do wstępnego podczyszczenia gazów odlotowych przed filtrem biologicznym;
- utlenianie termiczne;
- oczyszczanie na mokro (wymiwanie) – stosowane są płuczki wodne, kwasowe lub alkaliczne w połączeniu z biofiltrem lub adsorpcją na węglu aktywnym.

W tabeli 13 przedstawiono wady i zalety metod dezodoryzacji gazów procesowych.

Tab. 13. Zestawianie porównawcze metod dezodoryzacji gazów procesowych

Metoda	Zalety	Wady
Absorpcja w wodzie	<ul style="list-style-type: none"> ○ prosta i bezpieczna obsługa ○ prosta aparatura ○ niskie nakłady inwestycyjne ○ niskie koszty ruchowe 	<ul style="list-style-type: none"> ○ kłopotliwe ścieki ○ wtórna emisja odorantów ze ścieków ○ duże koszty pompowania ○ korozja instalacji

Absorpcja z reakcją chemiczną	<ul style="list-style-type: none"> ○ duża skuteczność dezodoryzacji ○ prosta konstrukcja instalacji ○ mała wrażliwość na zmiany parametrów gazu ○ łatwa automatyzacja procesu 	<ul style="list-style-type: none"> ○ uciążliwe ścieki ○ konieczność stosowania drogich, chemoodpornych materiałów konstrukcyjnych ○ ryzyko skażenia środowiska awaryjnymi wyciekami reagentów
Adsorpcja	<ul style="list-style-type: none"> ○ niskie koszty inwestycyjne ○ wysoka wydajność w początkowej fazie procesu 	<ul style="list-style-type: none"> ○ wrażliwość procesu na podwyższoną temperaturę i dużą wilgotność gazów ○ wąski zakres zastosowań ○ wysokie koszty eksploatacyjne ○ ryzyko nieodwracalnego zanieczyszczenia sorbentu, ○ problemy z usuwaniem amin i amoniaku
Utlenianie termiczne	<ul style="list-style-type: none"> ○ bezodpadowy charakter pracy ○ prosta budowa instalacji ○ łatwa obsługa 	<ul style="list-style-type: none"> ○ kłopoty ruchowe w przypadku zmiennych temperatur gazu i nierytmicznej emisji ○ na ogół duże koszty (nakłady na energię do podtrzymania procesu)
Utlenianie biologiczne	<ul style="list-style-type: none"> ○ niskie koszty inwestycyjne i eksploatacyjne ○ praktycznie bezobsługowa praca ○ wysoka wydajność usuwania odorantów ○ niskie zużycie wody 	<ul style="list-style-type: none"> ○ wrażliwość materiału na zniszczenie (trucizny, wysoka temperatura, mała wilgotność) ○ duże zapotrzebowanie na powierzchnię pod budowę instalacji ○ wymagany czas adaptacji złoża – 2-4 tygodnie

Podsumowanie

Fermentacja metanowa jest w pełni akceptowalną, sprawdzoną, dobrą technologią do przetwarzania bioodpadów.

Z punktu widzenia wykorzystania składników pokarmowych i emisji gazów cieplarnianych fermentacja powinna być preferowaną opcją przetwarzania bioodpadów, zwłaszcza odpadów żywności, kuchennych oraz z zakładów przetwórstwa spożywczego.

Kompostowanie powinno być wykorzystywane głównie do przetwarzania bioodpadów, dla których fermentacja nie jest odpowiednią technologią (niski potencjał wytwarzania biogazu) i do stabilizacji pofermentu w przypadku rozdziału fazy stałej od przefermentowanej cieczy.

Poferment i kompost powinny być przede wszystkim wykorzystywane w rolnictwie.

Fermentacja powinna zastępować pierwszy intensywny etap przetwarzania odpadów ulegających biodegradacji w instalacjach MBP, które w miarę upływu czasu starzeją się i wymagają modernizacji, ponieważ:

- pozwala na wykorzystanie istniejącego sprzętu,
- zmniejsza problemy z zapachami i nie wymaga dodatkowego obszaru,
- instalacja biologiczna z konsumenta energii staje się jej producentem.

prof. Andrzej Jędrzak

Instytut Inżynierii Środowiska, Uniwersytet Zielonogórski

Źródła

1. European Environment Agency, Bio-waste in Europe – Turning Challenges into Opportunities. EEA Report 4/2020, 10.2800/630938.
2. Jędrzak A.: Praca niepublikowana. 2021.
3. Jędrzak A.: *Biologiczne przetwarzanie odpadów*. PWN. Warszawa 2007.
4. Bidlingmaier W., Denecke M.: *Grundlagen der kompostierung*. „Müllhandbuch, Kennziffer” 5305/1998, s. 1-27.
5. Faulstich M., Bilitewski B.: *Stand der Technik der Biogasanlagen [w:] Beiträge zur Abfallwirtschaft – Schriftenreihe des Institutes für Abfallwirtschaft und Altlasten Technische Universität Dresden, Band 7. „Anaerobe biologische Abfallbehandlung”* Drezno 1998, s. 9-33.

6. Sadecka Z.: *Toksyczność i biodegradacja insektycydów w procesie fermentacji metanowej osadów ściekowych*. Wyd. Naukowo-Techniczne UZ. Zielona Góra 2002.
7. Bidlingmaier W.: *Steuermöglichkeiten für biologische Verfahren über das Inputmaterial* [w:] 6. *Münsteraner Abfallwirtschaftstage*. Fachhochschule Münster 1999, s. 206a-206n.
8. Rozporządzenie Ministra Klimatu z 2 stycznia 2020 r. w sprawie katalogu odpadów (DzU z 2020 r. poz. 10).
9. Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 z 21 października 2009 r. określające przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi i uchylające rozporządzenie (WE) nr 1774/2002 (Dz. Urz. UE L 300/1, 14.11.2009).
10. Jędrzak A., den Boer E.: *Raport końcowy III etapu ekspertyzy mającej na celu przeprowadzenie badań odpadów w 20 instalacjach do mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów*. Zielona Góra, maj 2015.
11. Dronia W., Połomka J., Jędrzak A.: Praca niepublikowana. 2023.
12. Eurostat 2022: *Waste generation and treatment*, <https://ec.europa.eu/eurostat/web/waste/data/database> (dostęp: 14.04.2023).
13. ECN Data report 2022: *Compost and digestate for a circular bioeconomy: Overview of Bio-waste Collection, Treatment & Markets Across Europe – European Compost*, <https://www.compostnetwork.info/wordpress/wp-content/uploads/ECN-rapport-2022.pdf> (dostęp: 14.04.2023).
14. De Baere L., Mattheeuws B.: *Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste in Europe – Status, experience and prospects*. „Waste Management” 3/2012, Recycling and Recovery – Thomé-Kozmiensky Karl J., Thiel S., s. 517-526.
15. Heidrich Zb., Nieścier A.: *Stabilizacja beztlenowa osadów ściekowych*. Wyd. PZIiTS. Monografie. Seria „Wodociągi i Kanalizacja” 4/1999.
16. Smet E., Van Langenhove H., De Bo I.: *The emission of volatile compounds during the aerobic and the combined anaerobic/aerobic composting bio-waste*. „Atmospheric Environmental” 33/1999, s. 1295-1303.