

Przeróbka beztlenowa bioodpadów komunalnych. Przegląd i porównanie technologii. Emisje

Prof. dr hab. inż. Andrzej Jędrczak

Decyzje administracyjne na drodze budowy potrzebnych instalacji gospodarowania odpadami. Gwarancja porządku, czy przeszkoda?

Warszawa, 10 maja 2023 r.

Główne treści wykładu

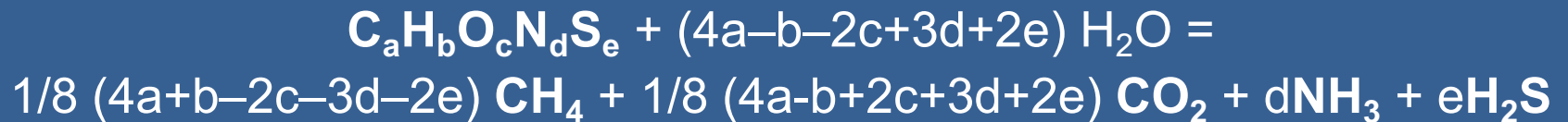
- Podstawy fermentacji metanowej
- Krótka historia fermentacji metanowej
- Surowce do biologicznego przetwarzania odpadów - wymagania ogólne
- Klasyfikacja technologii
 - Fermentacja jedno- i wielostopniowa
 - Fermentacja mokra i sucha
 - Fermentacja mezo- i termofilowa
 - Fermentacja okresowa
- Produkty fermentacji
- Potencjalne emisje do środowiska



Proces fermentacji



Równanie Boyle'a:



Rodzaj substratu	Ilość gazu, dm ³ /kg s.m.	Skład gazu, % (v/v)			
		CH ₄	CO ₂	NH ₃	H ₂ S
Węglowodany	830	50	50	-	-
Tłuszcze	1425	71	29	-	-
Białka	1018	38	38	18	6
OK (C ₆₄ H ₁₀₇ O ₃₇ N)	~1000	55	43,5	1,5	-

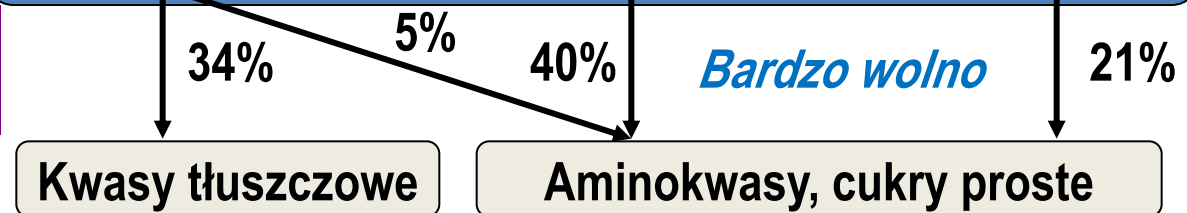


Proces fermentacji

Faza



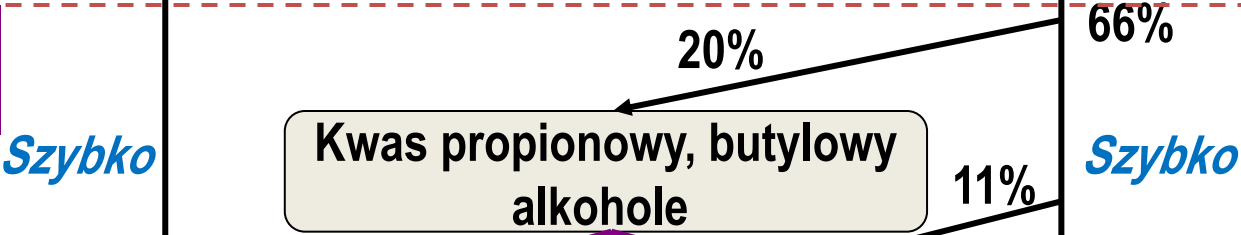
Bakterie hydrolizujące



I

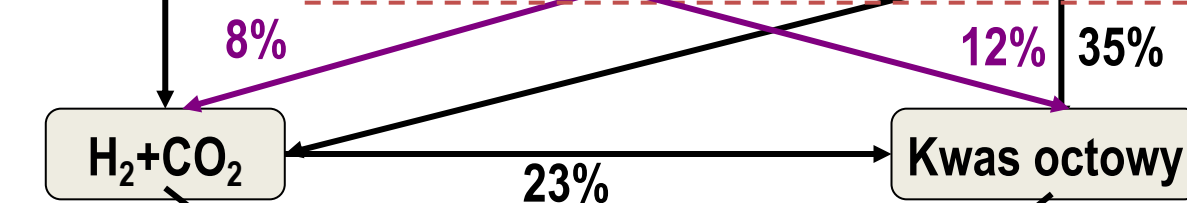
F. kwaśna

Bakterie zakwaszające



II

Bakterie octanogenne



III

F. metanowa

Bakterie metanowe hydrogenotroficzne

Bardzo szybko



IV

Bakterie metanowe rozkład. kwas octowy + redukujące siarczany

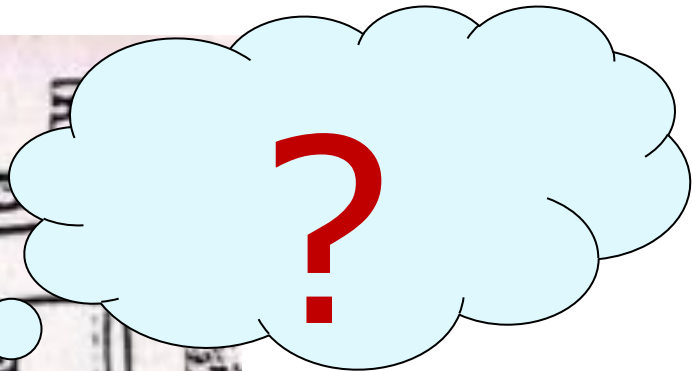
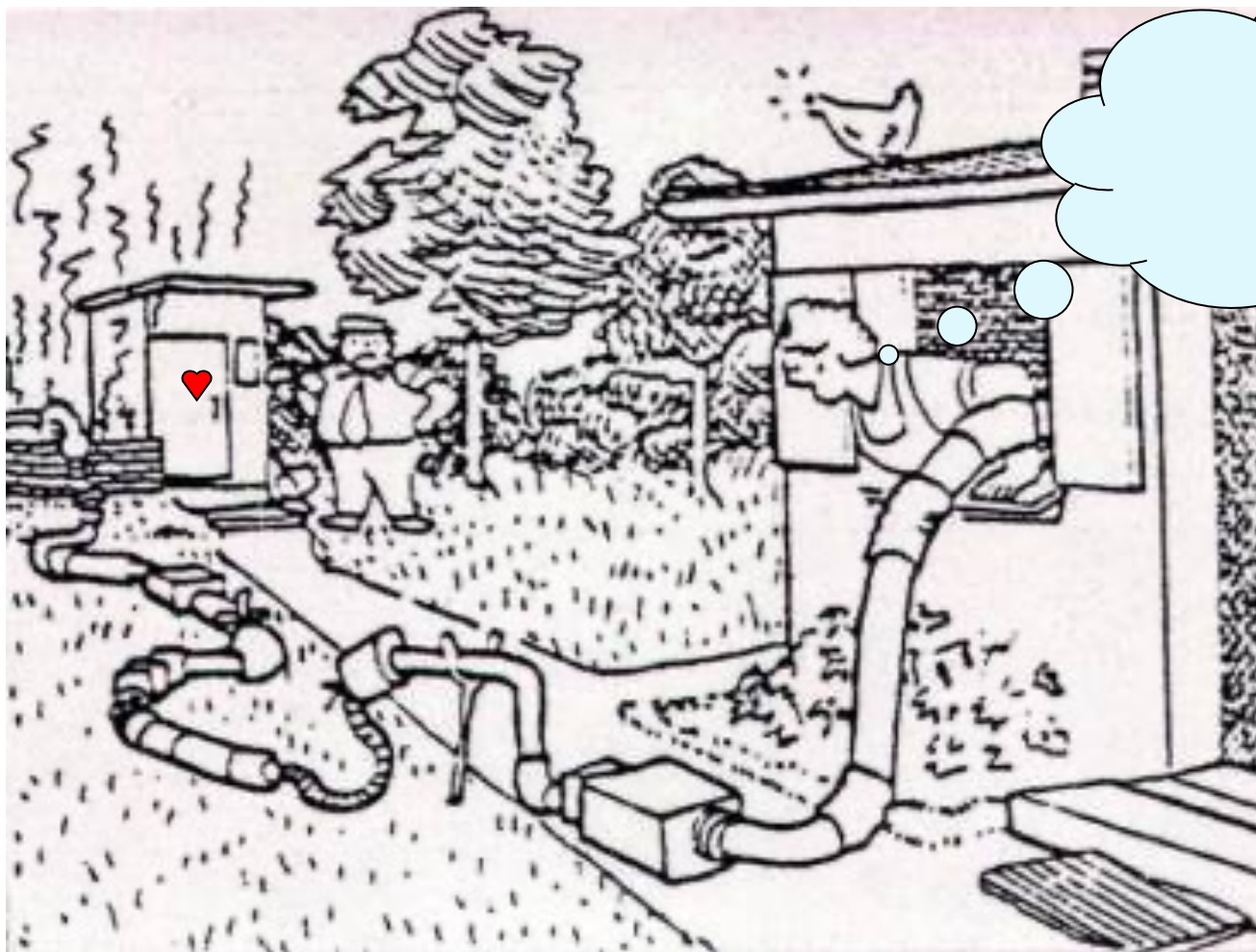


Krótką historia fermentacji metanowej

- **1804 r.** - Dalton podał wzór chemiczny metanu - **CH₄**;
- **1859 r.** - pierwsza instalacja do fermentacji, w kolonii trędowatych w Bombaju, Indie (Nowa Zelandia ok. 1840);
- **1875 r.** - najstarsza publikacja naukowa o wpływie temperatury na tworzenie metanu (Popoff);
- **1883-84** - Gayon, uczeń Pasteur'a, fermentuje odchody zwierzęce w temp. 35° C;
- **1895 r.** - biogaz z fermentacji osadów ściekowych jest wykorzystywany jako paliwo do latarni ulicznych w Exeter (Anglia)
- **Lata 40. XX w.** - powstaje ponad 40 małych instalacji we Francji i 48 dużych instalacji w Niemczech, surowiec - osady ściekowe
- Lata **70-te XX w.** - kryzys energetyczny – zastosowanie procesu do fermentacji organicznej frakcji odpadów komunalnych

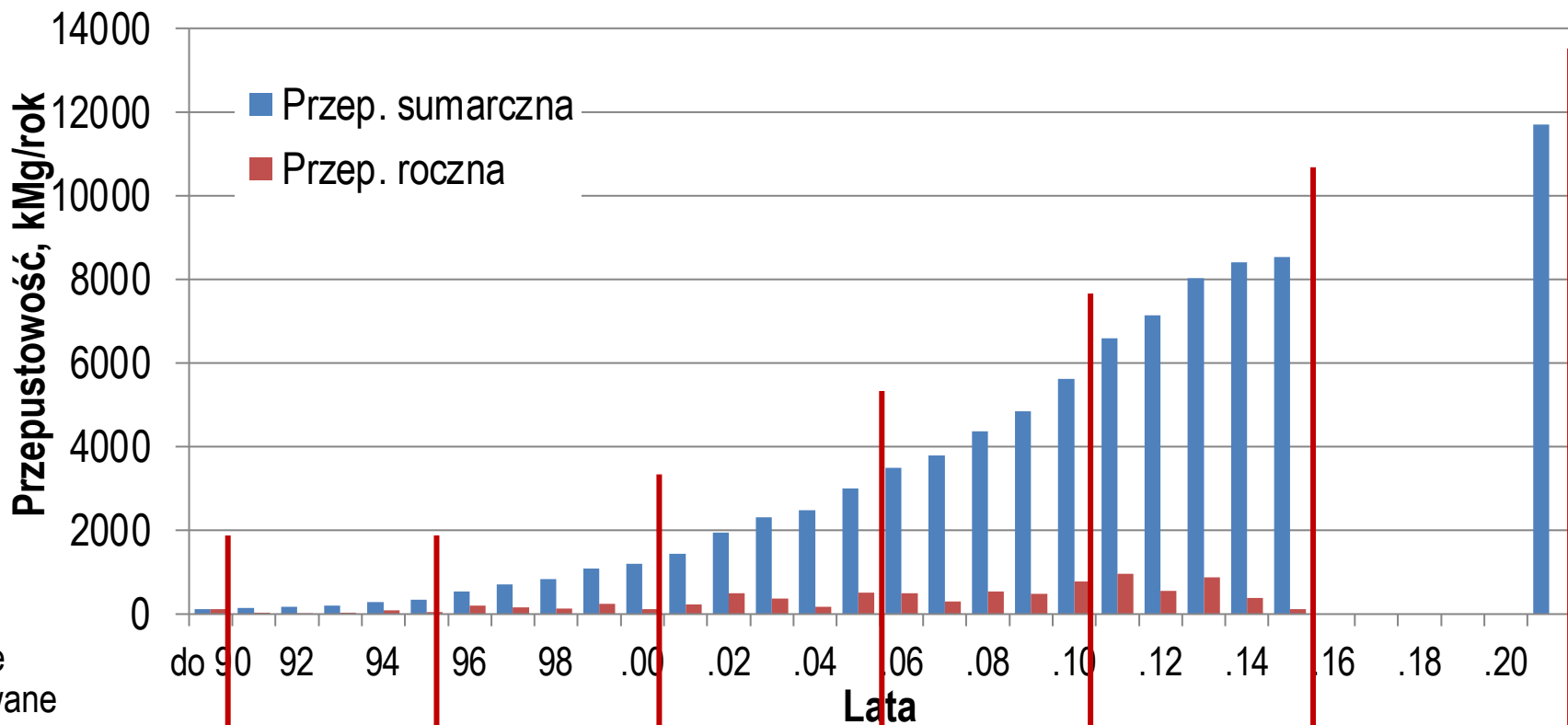


Krótką historia fermentacji metanowej





Rozwój instalacji do fermentacji stałych odpadów organicznych



Instalacje
wybudowane
w okresach 5 lat

Liczba	3	14	43	49	86	95	134
Przepust. instal.	122	216 (43)	865 (173)	1798 (360)	2624 (525)	2909 (582)	3166(528)
Średnia przepust.	41	15	20	37	31	31	24



Surowce do biologicznego przetwarzania odpadów - wymagania ogólne

- Udział substancji organicznej w odpadach >30%
- Iloraz C:N - od 15 : 1 do 35 : 1
- Generalnie, im większe rozdrobnienie surowca tym większa szybkość rozkładu,
- Niskie stężenia substancji chemicznych toksycznych dla mikroorganizmów odpowiedzialnych za przebieg procesu



Surowce do biologicznego przetwarzania odpadów - odpady komunalne

Rodzaj odpadów	Zawart. wody, %	Zawart. subst. org. % sm	Zawart. azotu, % sm	Iloraz C/N	Prod. biogazu m ³ /kg smo
Odpady z gospodarstw domowych	35-45	25-50	0,8-1,1	30-40	0,10-0,20
Odpady kuchenne	50-60	30-70	0,6-2,2	12- 20	0,15-0,60
Odpady ogrodowe	25-80	15 - 75	0,3-2,0	20-60	0.20-0,50
Bioodpady	52-80	34-81	0,6-2,7	10- 25	0.50-0,60
Papier	25-30	75	0,2-1,5	170-800	0,26
Liście	20	80	0,2-0,5	20-60	0,10-0,30
Osady ściekowe	70-80	(50,6)	(3,9)	(10)	0,35-0,45

Kontrola jakości surowców jest najważniejszą drogą zapewniania jakości końcowego produktu, odpowiedniej dla recyklingu, bezpiecznego dla ludzi, zwierząt i środowiska.

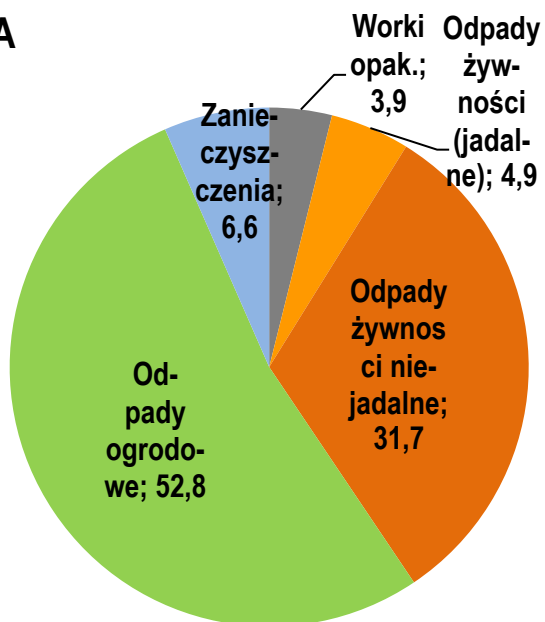


Biodpady - skład morfologiczny

- Biodpady** to - ulegające biodegradacji odpady ogrodowe i parkowe, odpady żywności i kuchenne z gospodarstw domowych, biur, restauracji, hurtowni, stołówek, placówek zbiorowego żywienia i handlu detalicznego oraz porównywalne odpady z zakładów przetwórstwa spożywczego

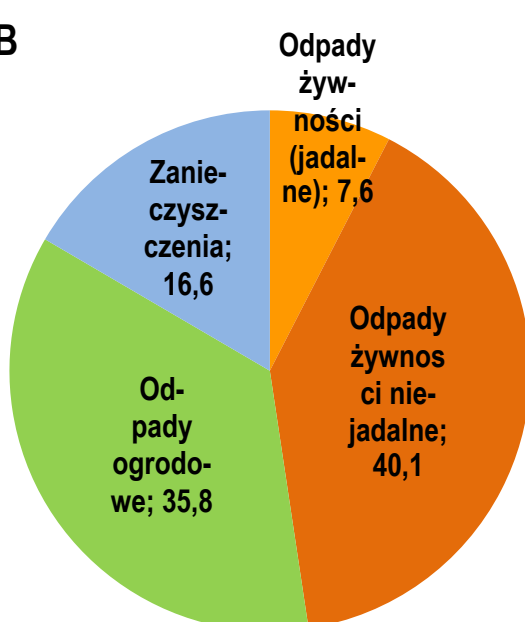
**Miasto zabudowa
jednorodzinna**

A



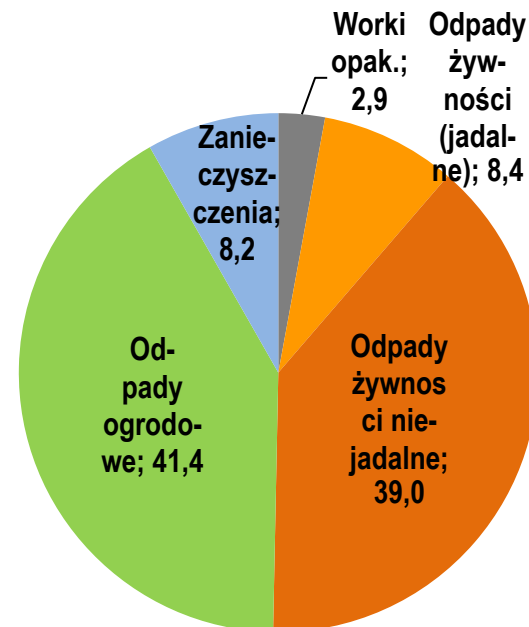
**Miasto - zabudowa
wielorodzinna**

B



Gminy wiejskie

C

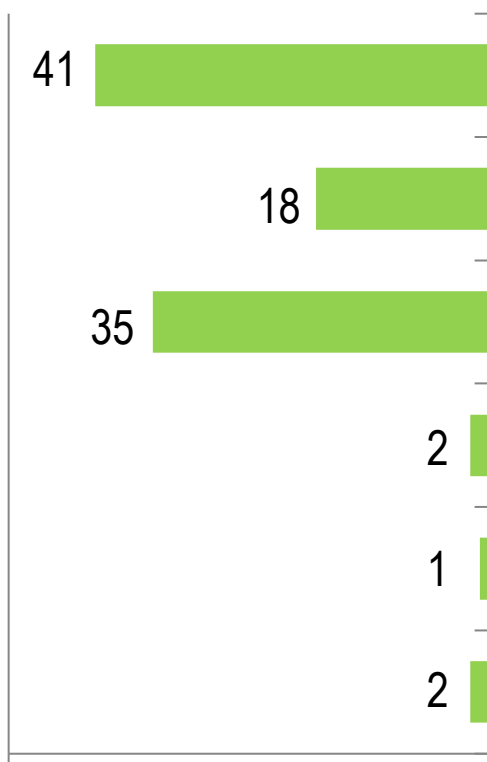




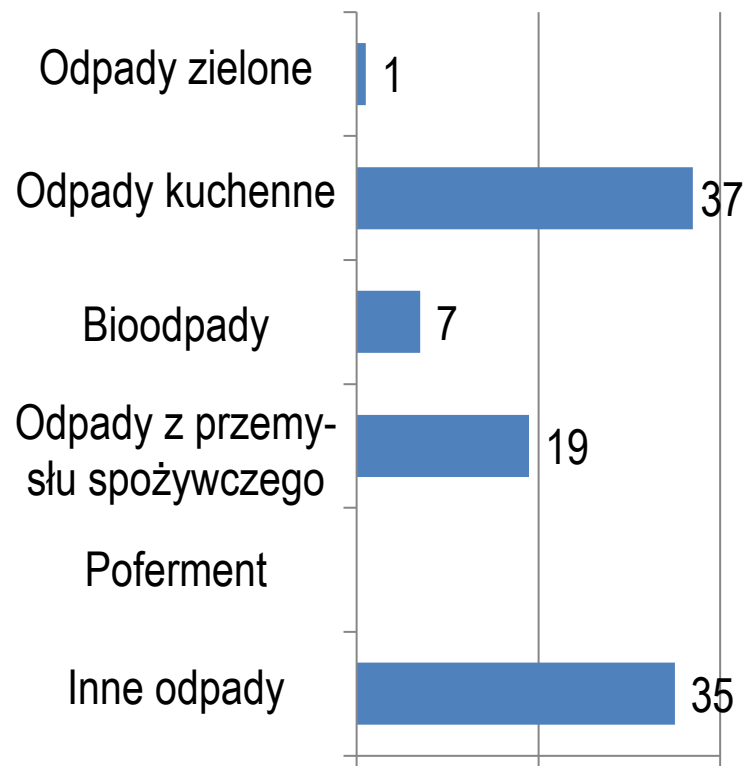
Rodzaje odpadów selektywnie zbierane do biologicznego kompostowania

[% m/m]

Kompostowanie



Fermentacja



76%

Kompostowanie

- Odpady zielone
- Bioodpady

73%

Fermentacja

- Odpady kuchenne
- Inne

Systemy produkcji biogazu





Klasyfikacje technologii

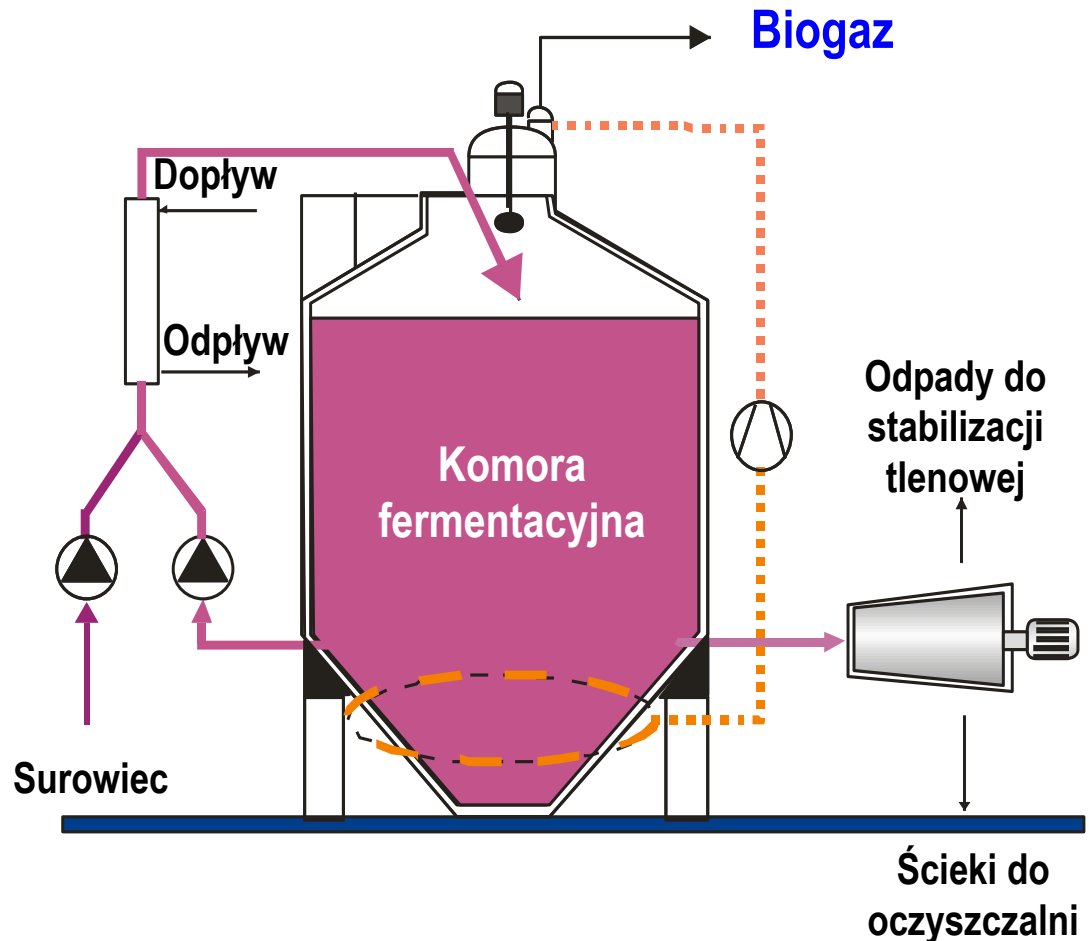
Kryterium - typ reaktora

- Wyróżnia się technologie:
 - z pełnym wymieszaniem (technologie „mokre”),
 - o przepływie tłokowym (technologie „suche”)
 - technologie perkolacyjne.



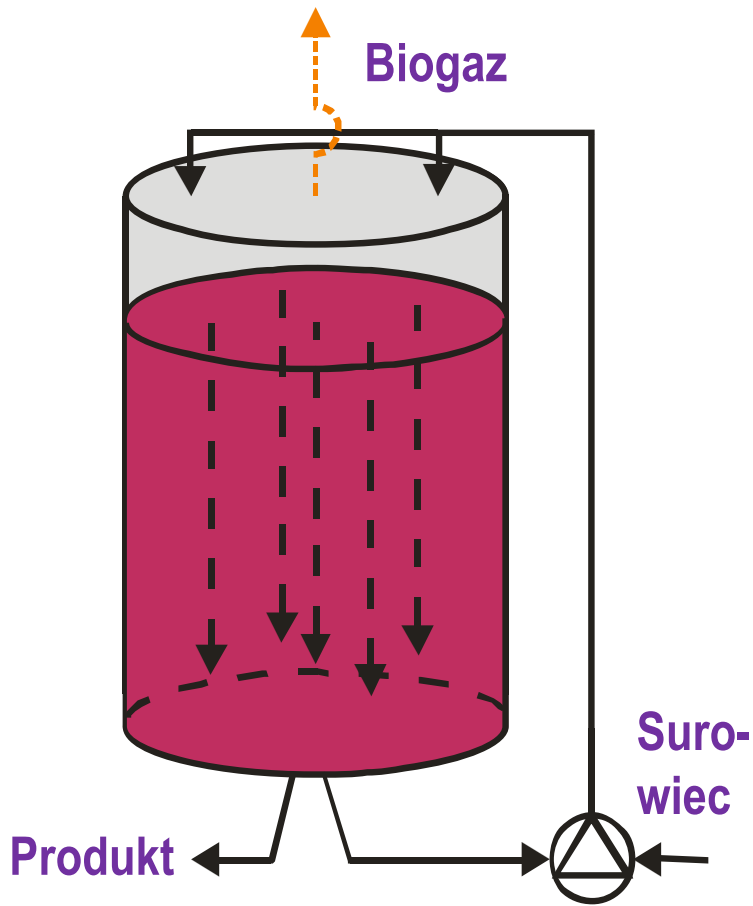
Reaktory z pełnym wymieszaniem

- Są to reaktory tradycyjnie stosowane do fermentacji osadów ściekowych, których standard został ustalony w latach siedemdziesiątych XX w.
- Zawartość reaktora jest intensywnie mieszana.
- Mieszanie spełnia kilka bardzo ważnych funkcji:
 - eliminuje gradienty stężeń i temperatury,
 - zapewnia, dobry kontakt między biomasą i organicznym materiałem,
 - zapobiega wytwarzaniu się kożucha oraz odkładaniu frakcji mineralnej (piasku) na dnie komory,





Reaktory o przepływie tłokowym

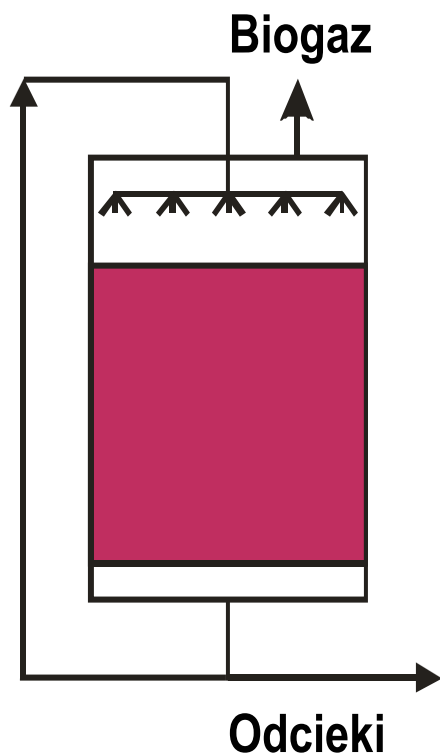


- Reaktory o przepływie tłokowym stosowane są do fermentacji odpadów o zawartości od 20 do 40% sm.
- Stosowane są reaktory
 - **poziome i pionowe,**
 - **bez mieszania i z mieszaniem odpadów wewnątrz komory.**
- Niskie uwodnienie odpadów sprzyja eksploatacji komór w termofilowym zakresie temperatury (50-55 °C).
- Stosunkowo prosta konstrukcja urządzeń zapewnia, że są one stosunkowo tanie.



Reaktory perkolacyjne

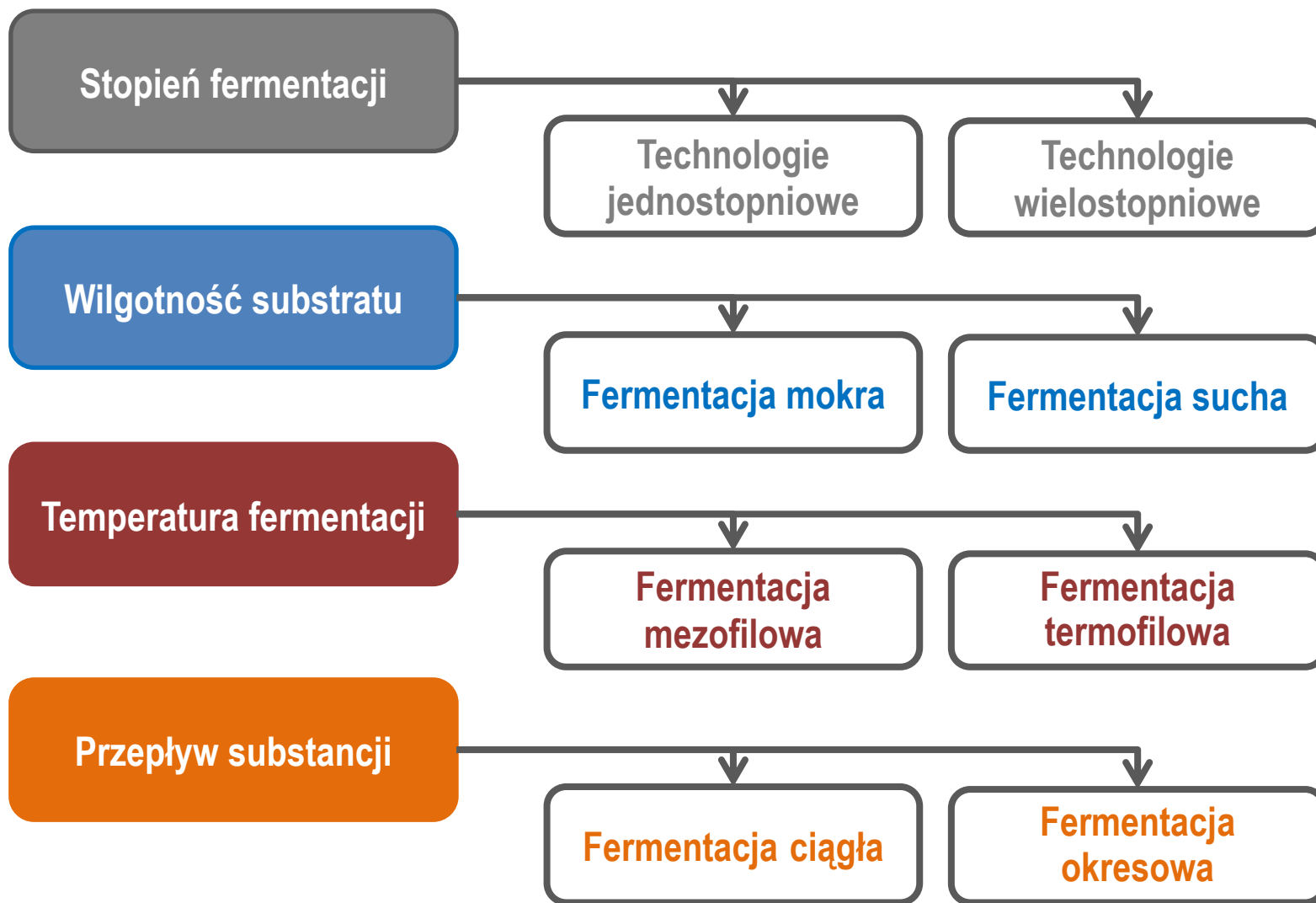
W reaktorach perkolacyjnych zrezygnowano w ogóle z mieszania odpadów. Rolę mieszania przejmuje tutaj cyrkulacja wód procesowych.



- Po zakończeniu fermentacji, komora jest otwierana, rozładowywana i ponownie napełniana świeżym surowcem.
- **Wadami** są okresowa natura operacji i konieczność zwiększonej obróbki, aby zapewnić produkcję odpowiedniej jakości produktu fermentacji.
- **Zalety** tej technologii to prosta konstrukcja komory oraz potrzeba tylko minimalnego przygotowania surowca i mechanicznej obsługi.



Systematyka technologii fermentacji





Technologie jednostopniowe i wielostopniowe

- W technologiach jednostopniowych fermentacja kwaśna i metanogenna przebiegają równocześnie w jednym bioreaktorze.
- W technologii wielostopniowej instalacja zbudowana jest z kilku, szeregowo połączonych bioreaktorów, w których panują różne warunki środowiskowe.
- W technologiach dwustopniowych:
 - w I reaktorze (LA) prowadzi się **fermentację kwaśną**,
 - w II reaktorze, zwykle przepływowym, **fermentację metanową**.
- Rozdział faz kwaso- i metanogennej miał zapewnić:
 - całkowity czas procesu <12 dni,
 - wyższy stopień rozkładu związków organicznych,
 - wyższą i bardziej stabilną produkcję biogazu.
- Heterogenny charakter bioodpadów oraz wyższe koszty całkowite układu nie zawsze są jednak rekompensowane przez uzyskiwane efekty



Wady i zalety procesu fermentacji metodą jednostopniową

Cechy	Metoda jednostopniowa	Metoda wielostopniowa
Zalety	<ul style="list-style-type: none">prosty i przejrzysty sposób prowadzenia procesuniskie nakłady inwestycyjne i eksploatacyjne	<ul style="list-style-type: none">wysoka stabilność procesu i możliwość wpływu na jego przebieg (łatwa regulacja parametrów procesu)
Wady	<ul style="list-style-type: none">brak optymalnych warunków dla przemian biochemicznych i możliwości oddziaływania na poszczególne fazy fermentacjiniebezpieczeństwo hamowania procesu przez amoniak lub nadmierne zakwaszenia wsadu	<ul style="list-style-type: none">proces bardziej złożony technologicznie

Fermentacja jednostopniowa prowadzona jest w >90% działających instalacji

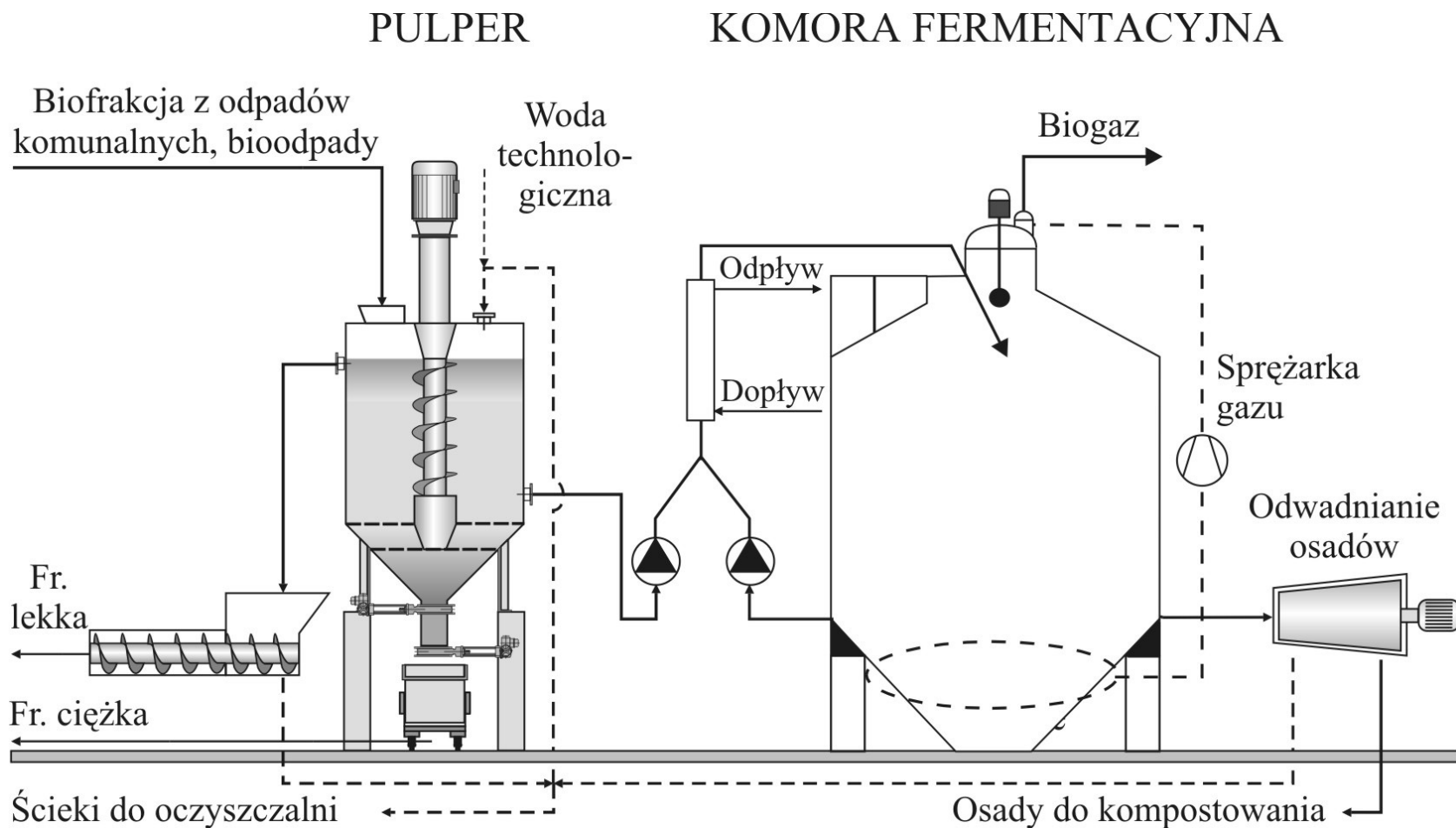


Fermentacja mokra i sucha

- Procesy jednostopniowe mogą być prowadzone jako:
 - fermentacja mokra,
 - fermentacja sucha.
- Jako „**mokra**” określa się fermentację substratów płynnych, w których zawartość suchej masy nie przekracza 15% i wynosi najczęściej **od 8 do 12%**.
- Fermentację odpadów o wyższej zawartości suchej masy nazywa się „**sucha**”. Maksymalna zawartość suchej masy w substratach **<40%**.



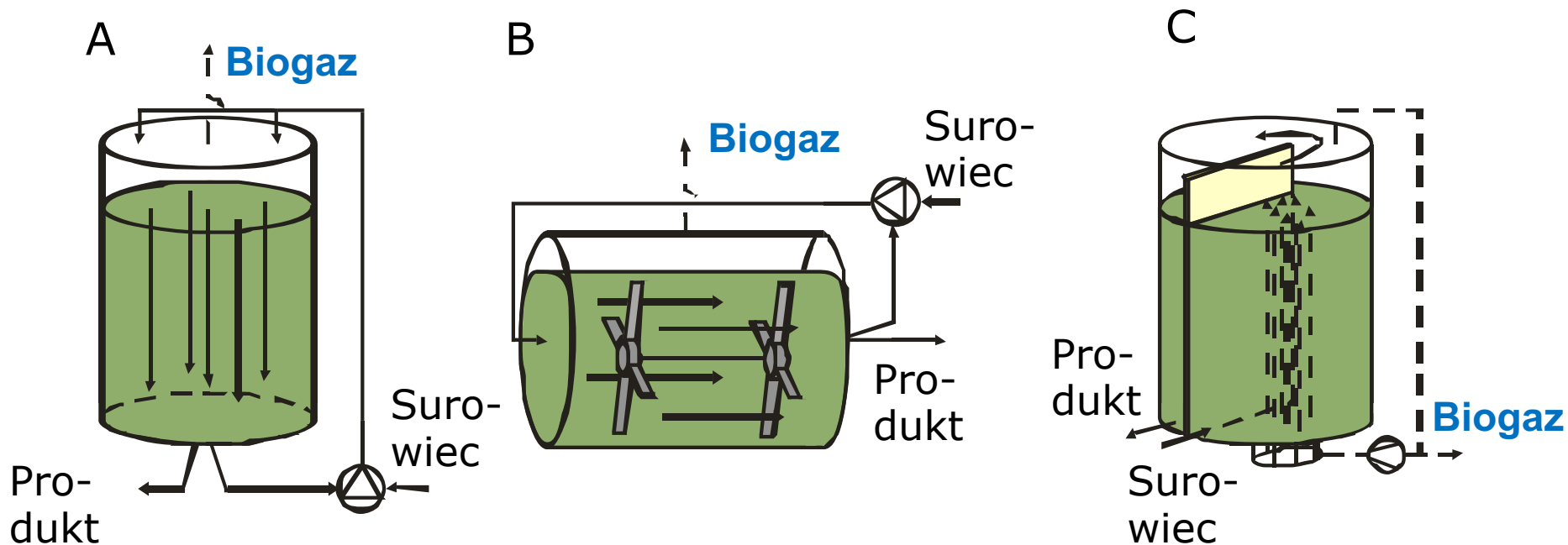
Typowa instalacja do jednostopniowej fermentacji odpadów metodą mokrą





Typy reaktorów do suchej fermentacji odpadów

- A - rozwiązanie Dranco,
- B - system Kompogas
- C - reaktor Valorga





Porównanie technologii fermentacji „mokrej” i „suchej”

Cechy	Fermentacja sucha	Fermentacja mokra
Zalety	<ul style="list-style-type: none">mała objętość reaktoramałe przepływy substancji - mniejsze zapotrzebowanie energii	<ul style="list-style-type: none">konwencjonalne metody transportu i mieszania wsadupewna produkcja gazu
Wady	<ul style="list-style-type: none">specjalne techniki transportu i mieszanianiebezpieczeństwo niepełnej fermentacji	<ul style="list-style-type: none">większa pojemność reaktorówduże przepływy materiidodatkowe procesy rozdziału fazy stałej i ciekłej

Wydajność biogazu na kilogram wsadu odpadów jest prawie taka sama dla technologii suchych i mokrych

Fermentacja sucha prowadzona jest w blisko 70% działających instalacji



Porównanie fermentacji mezofilowej i termofilowej

Temperatura w istotny sposób wpływa na szybkość fermentacji, a więc i na czas jej trwania oraz na ilość i skład wydzielanego gazu

- Fermentacja mezofilowa; **30 – 35 °C, 20-30 dni**
- Fermentacja termofilowa; **52 - 55 °C, 10-14 dni**

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 około 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■ mniejsza produkcja energii netto■ niekiedy gorsza jakość kompostu

W roku 2015 fermentacja termofilowa prowadzona była w 37% działających instalacji



Technologie dwufazowe

1. Zastąpienie rozdziału faz procesu, rozdziałem angażowanych w proces biocenozy:

- **W I stopniu** proces prowadzi się w termofilowym zakresie temperatur, uzyskując szybki rozkład rozpuszczonych składników oraz higienizację materiału.
- **W II stopniu**, prowadzi się proces mezofilowy.

Taka kolejność stopni fermentacji wykorzystuje zalety obu biocenozy:

- biocenoza termofilowa jest mniej wrażliwa na przeciążenia niż mezofilowa,
- materiał po fermentacji mezofilowej odwadnia się znacznie lepiej niż po fermentacji termofilowej.

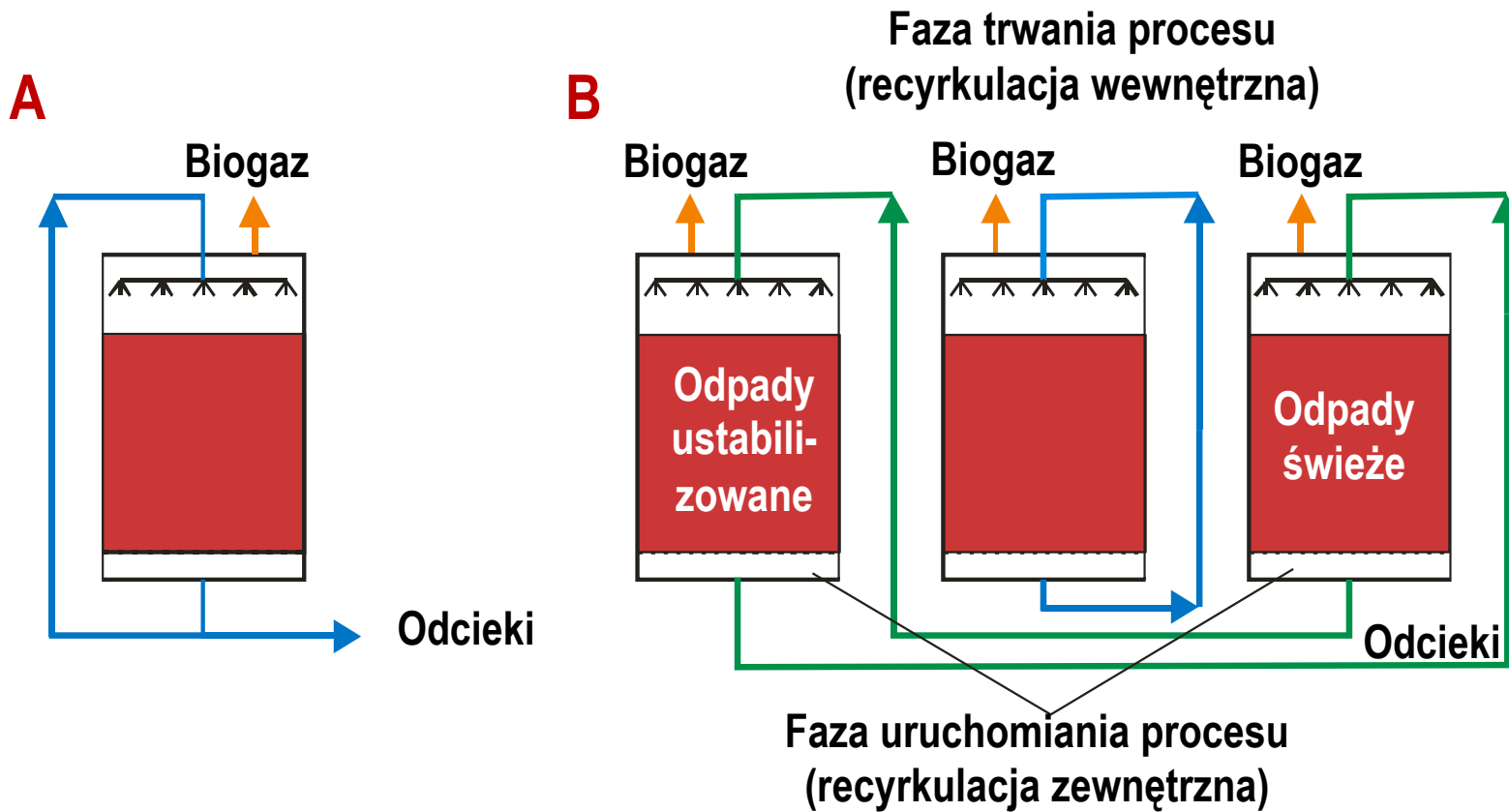
2. Technologie z rozdziałem zawiesiny usuwanej z reaktora hydrolizy, na fazę ciekłą i stałą.

- **Faza ciekła**, zawierająca ok. 70% składników metanogennych, doprowadzana jest do reaktora intensywnej metanogenezy.
- **Faza stała**, po stabilizacji tlenowej, usuwana jest na składowisko lub wykorzystywana do rekultywacji terenów zdegradowanych.



Technologie okresowe

- Sucha fermentacja okresowa - proces fermentacji, rozpoczyna się i kończy w tym samym reaktorze - A
- Proces prowadzony jest w kilku reaktorach aby uniknąć pików w produkcji biogazu - B





Porównanie ciągłego i okresowego sposobu prowadzenia procesu

Cecha	Proces ciągły	Proces okresowy
Zalety	<ul style="list-style-type: none">■ wyższa wydajność■ równomierna produkcja biogazu■ łatwiejsza możliwość automatyzacji procesu	<ul style="list-style-type: none">■ tańsze rozwiązania reaktorów■ wszystkie substraty mają ten sam czas przetrzymania
Wady	<ul style="list-style-type: none">■ wyższe koszty inwestycyjne■ możliwe „krótkie spięcia” przepływu (niebezpieczeństwo niepełnej higienizacji produktu)	<ul style="list-style-type: none">■ z reguły kilka reaktorów■ wyższe koszty eksploatacji■ nierównomierność ilościowo-jakościowa produkcji biogazu■ niekiedy niższy stopień rozkładu



Produkty procesu fermentacji



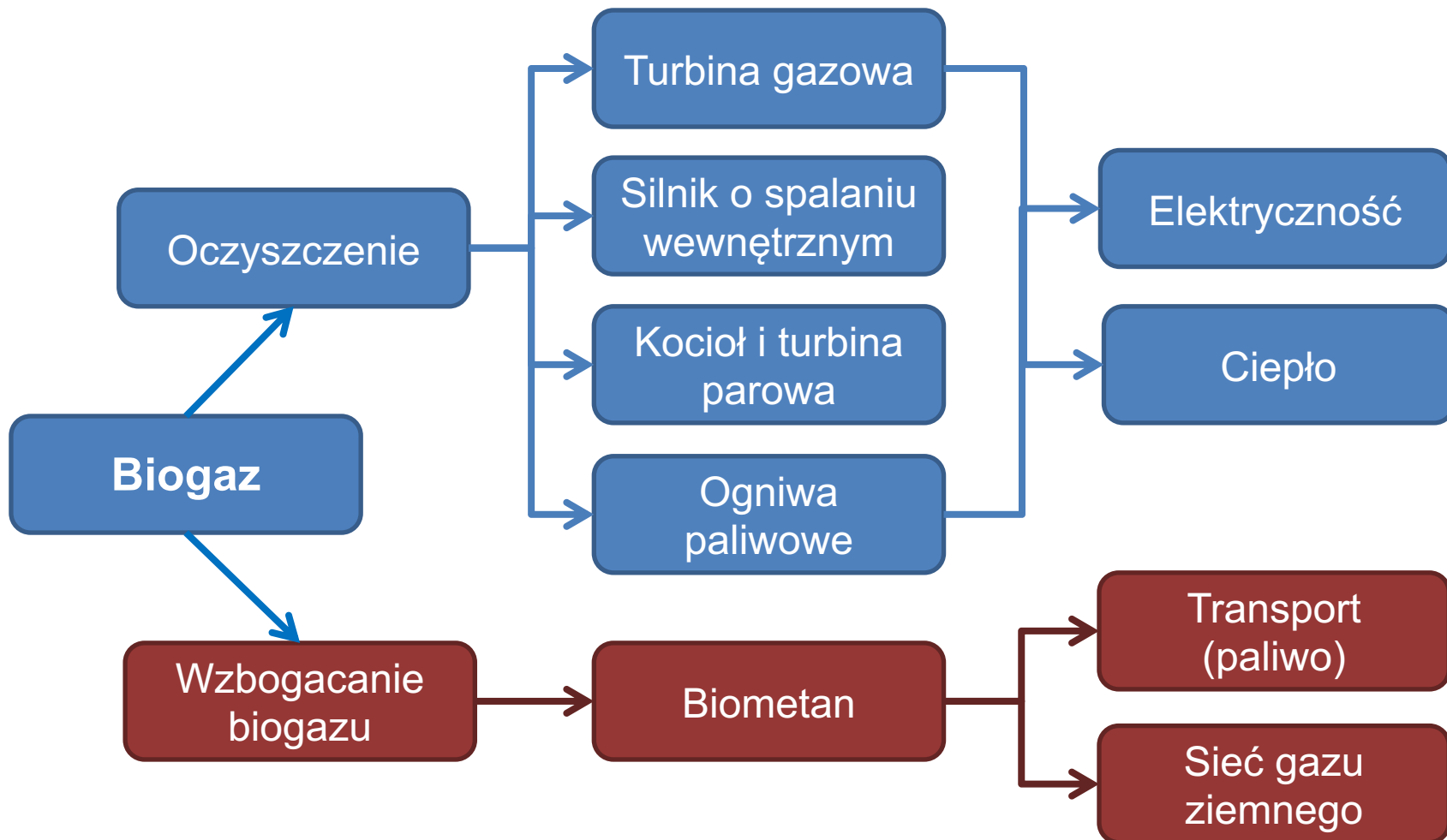
Skład i właściwości fizyczne biogazu

Właściwości	Składniki gazu fermentacyjnego			Mieszanina (CH ₄ – 65%)
	CH ₄	CO ₂	H ₂ S	
Udział, %	55-75	24-44	0,1–0,7	100
Wartość opałowa, kWh/m ³	10-11,1	-	6,3	6,5
Granica zapalności, % w powietrzu	5-15	-	4-45	6-12
Temperatura zapłonu, °C	700	-	270	650-750
Gęstość rzeczywista, kg/m ³	0,72	1,98	1,54	1,20
Gęstość względna (powietrze =1)	0,55	1,5	1,2	0,83

Z 1 Mg odpadów kuchennych powstaje ok. 100 m³ biogazu będącego energetycznym ekwiwalentem 100 l benzyny



Wykorzystanie biogaz





Poferment

- Fermentat (poferment) jest bogatym w składniki odżywcze produktem ubocznym fermentacji i może być stosowany jako nawóz lub środek poprawiający właściwości gleby

- Dostarcza składniki odżywcze i organiczne oraz nawadnia glebę
- Poprawia żyzność gleby
- Można łatwo pompować

Bezpośrednie wykorzystanie w rolnictwie
2-6% sm

- Może być źródłem patogenów i związków azotu, które mogą być przenoszone do wód gruntowych i powierzchniowych
- Możliwa emisja amoniaku

Stabilizacja tlenowa

- Znacznie zmniejsza objętość
- Zwiększa żyzność gleby,
- Poprawia strukturę gleby i retencję wody w glebie
- Może być przechowywany na polach ułożony w pryzmy

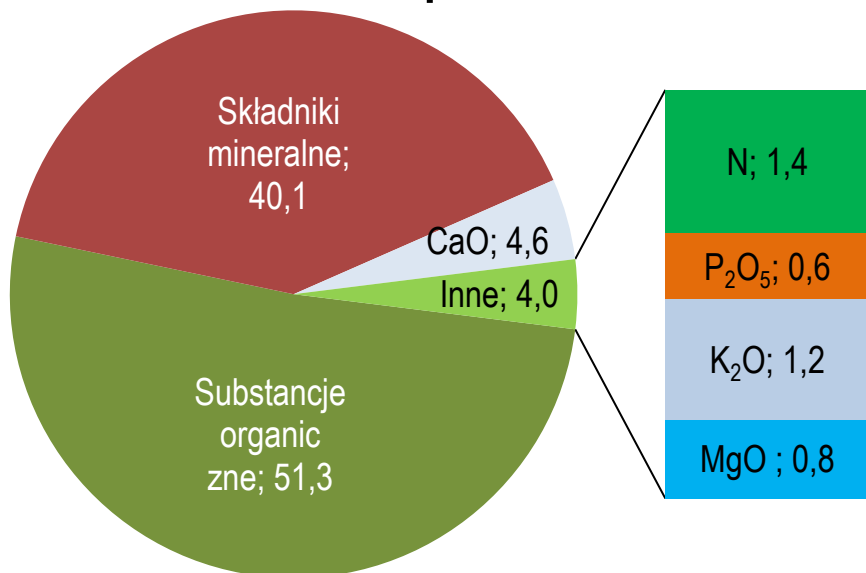
Nawóz – kompost stosowany w rolnictwie;
18-30 % sm

- Zanieczyszczenie gleby i wody w przypadku niewłaściwego magazynowania
- Emisja odorów, jeśli nie jest odpowiednio zarządzany



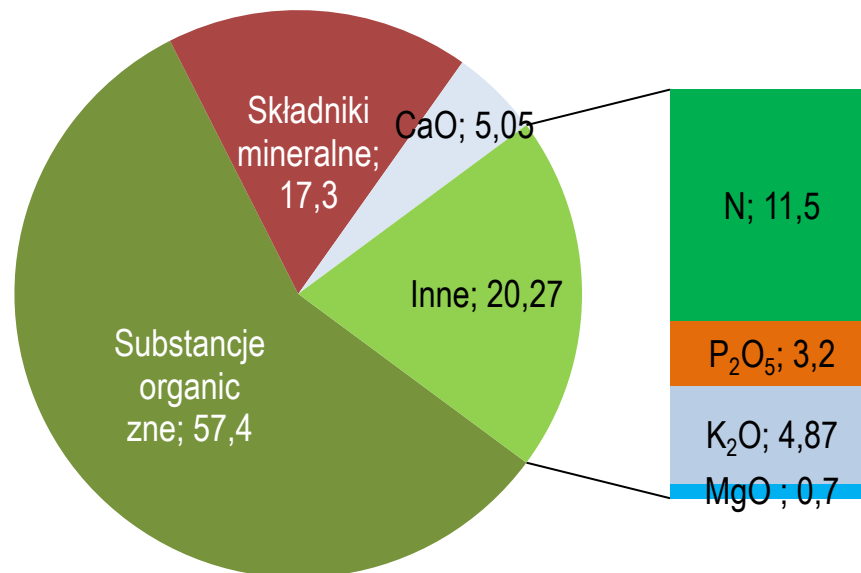
Poferment - wartość nawozowa

Kompost



70,9% s.m.; pH 8,6; zawartość soli 4,4 g/l
(3841 próbek)

Poferment płynny



4,6% s.m.; pH 8,5; zawartość soli 16,1 g/l
(1192 próbki)

Przy stosowaniu pofermentu jako nawozów należy kierować się zasadami zawartymi w **ustawie o nawozach i nawożeniu** oraz **Kodeksie Dobrej Praktyki Nawozowej**.

- Zalecana maksymalna dawka = 170 kgN/ha, termin stosowania – od 1 marca do 30 listopada.
- Biogazownia o mocy 1 MW wytwarza ok. 20 tys. m³ pofermentu/rok. Orientacyjna dawka - ok. 30-40 m³/(ha·rok) - ok. 150-200 kg N, w tym 60-80 kg stanowi N_{NH3} bezpośrednio dostępny dla roślin.



Perspektywy i wyzwania dla producentów kompostu i fermentatu

Badanie obrotu CE dla kompostu i pofermentu

	Mocne strony	Słabe strony
Kompost z odpadów zielonych	+++++	
Kompost z bioodpadów	+++	--
• Świeży kompost	+	-----
• Dojrzały kompost	++++	-
Poferment	+(+)	-(-)
• Stały poferment	++	---
• Płynny fermentat		----



Potencjalny wpływ na środowisko

- 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

Więcej ścieków powstaje w technologiach mokrych niż suchych. Ścieki z procesów termofilowych są bardziej obciążone zanieczyszczeniami niż ścieki z procesów mezofilowych.

Oznaczenie	Jednostki	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
Przewod. właś.	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 odorów

Sam proces AD jest zamknięty, ale emisje do atmosfery, w tym emisje odorów, mogą wystąpić na przykład z:

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



Stężenia lotnych związków w biogazie przed zbiornikiem magazynowym gazu, po spaleniu w gazmotorach oraz *podczas stabilizacji tlenowej pofermentu*

Związki	Fermentacja		Kompost. po ferm.
	Biogaz przed zbiornikiem	Gazy po spaleniu biogazu,	
	mg/Nm ³		
Alohole	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	n.w.
Inne	12	0,3	0
Suma	2360	4,3	440



Emisje do atmosfery

(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 -12 967	-



Metody dezodoryzacji gazów procesowych

W celu ograniczenia emisji zorganizowanej pyłów, związków organicznych i odorów, w tym H_2S i NH_3 , do powietrza, stosuje się jedną z poniższych technik lub ich kombinację:

- Adsorpcja;
- Filtr biologiczny:
 - W przypadku wysokiej zawartości NH_3 (np. 5–40 mg/Nm³) w celu kontrolowania pH środowiska i ograniczenia tworzenia N_2O w filtrze biologicznym może być potrzebne wstępne przetwarzanie gazów odlotowych przed filtrem biologicznym (np. przy pomocy wody lub płuczki kwasowej)
 - Niektóre inne związki zapachowe (np. merkaptany, H_2S) mogą powodować zakwaszanie mediów filtra biologicznego i wymagają użycia płuczki wodnej lub zasadowej do wstępnego przetwarzania gazów odlotowych przed filtrem biologicznym.
- Utlenianie termiczne;
- Oczyszczanie na mokro (wymywanie) - stosowane są płuczki wodne, kwasowe lub alkaliczne w połączeniu z biofiltrem lub adsorpcją na węglu aktywnym.



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.
- 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 oraz bioodpadów w kompostowniach, które w miarę upływu czasu starzeją się i wymagają modernizacji, ponieważ:
 - pozwala na wykorzystanie istniejącego sprzętu,
 - zmniejsza problemy z zapachami i nie wymagają dodatkowego obszaru
 - instalacja biologiczna z konsumenta energii staje się jej producentem.



Dziękuję za uwagę