



**KAPITAŁ LUDZKI**  
CZŁOWIEK – NAJLEPSZA INWESTYCJA!

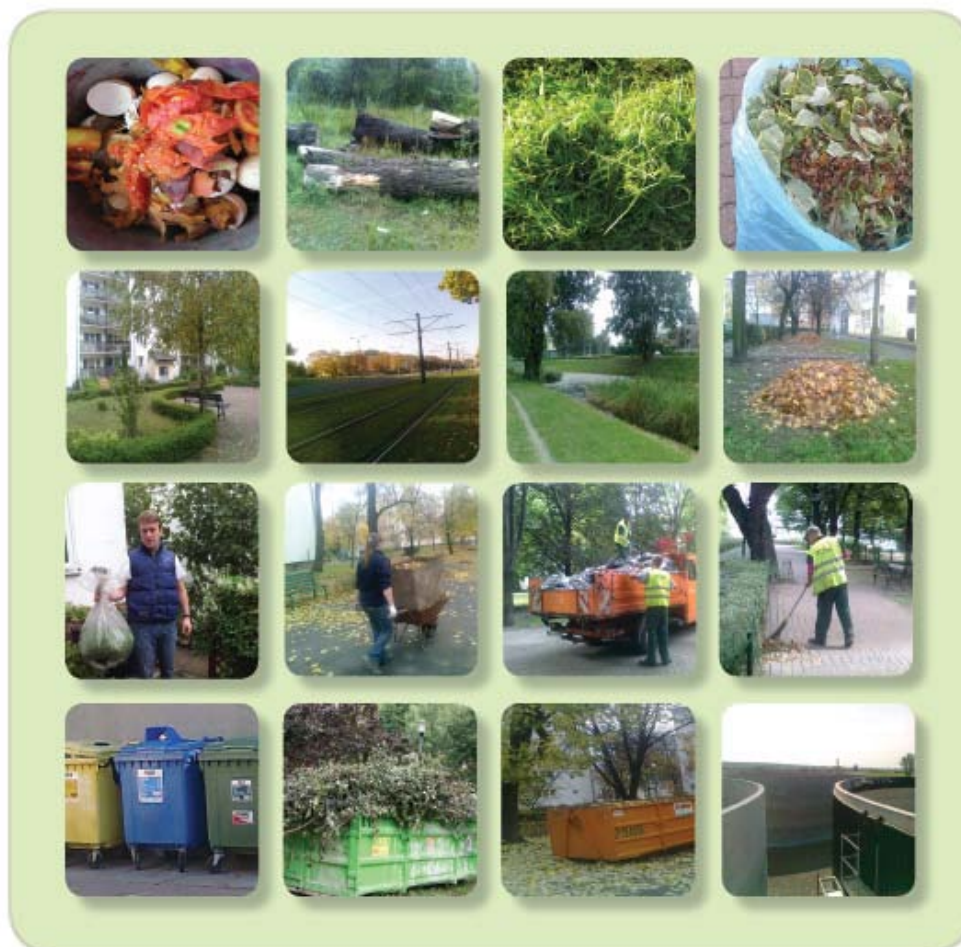
**UNIA EUROPEJSKA**  
EUROPEJSKI  
FUNDUSZ SPOŁECZNY



## RECYKLING ORGANICZNY I ODZYSK ENERGII Z SEGREGOWANYCH U ŹRÓDŁA

### BIOODPADÓW POCHODZENIA KOMUNALNEGO

#### PRZEWODNIK PRZEDSIĘBIORCY



## TECHNOLOGIE PRZETWARZANIA SELEKTYWNIE ZBIERANYCH BIOODPADÓW

### POCHODZENIA KOMUNALNEGO - FERMENTACJA METANOWA

Opracowanie: dr Ewa Krasuska

Współpraca: mgr inż. Anna Oniszk-Popławska

Warszawa, październik 2013r.

## PODZIĘKOWANIE

Niniejsze opracowanie powstało w ramach projektu „Naukowcy dla gospodarki Mazowsza” współfinansowanego ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego. Autorki pragną złożyć szczególne podziękowania za życzliwą konsultację podczas zbierania informacji oraz pisania niniejszej pracy następującym osobom:

- dr Ewie Kochańskiej z Centrum Badań i Innowacji Pro-Akademia za zachętę, wyznaczenie kierunków i opiekę merytoryczną podczas trwania projektu,
- dr Emilii den Boer z Politechniki Wrocławskiej oraz dr Krystynie Lelicińskiej-Serafin z Politechniki Warszawskiej za konsultacje merytoryczne w zakresie gospodarki odpadami,

oraz firmom Ekopark, AG-Complex, „Zieleń i Ty” oraz Green Energy za konsultacje merytoryczne rozwiązań skierowanych do małych i średnich przedsiębiorstw związanych z gospodarką odpadami.

Warszawa, październik 2013

dr Ewa Krasuska

mgr inż. Anna Oniszk-Popławska

Przewodnik jest jednym z serii dokumentów opracowanych w ramach rozwiązania innowacyjnego. **„Recykling organiczny i odzysk energii z selektywnie zbieranych bioodpadów pochodzenia komunalnego”**. Pozostałe części dotyczą zagadnień prawnych oraz systemów zbiórki. Integralną częścią rozwiązania innowacyjnego jest także kalkulator zasobowo-energetyczny oraz opis dwóch modeli biznesowych adresowanych do przedsiębiorców.

## SPIS TREŚCI

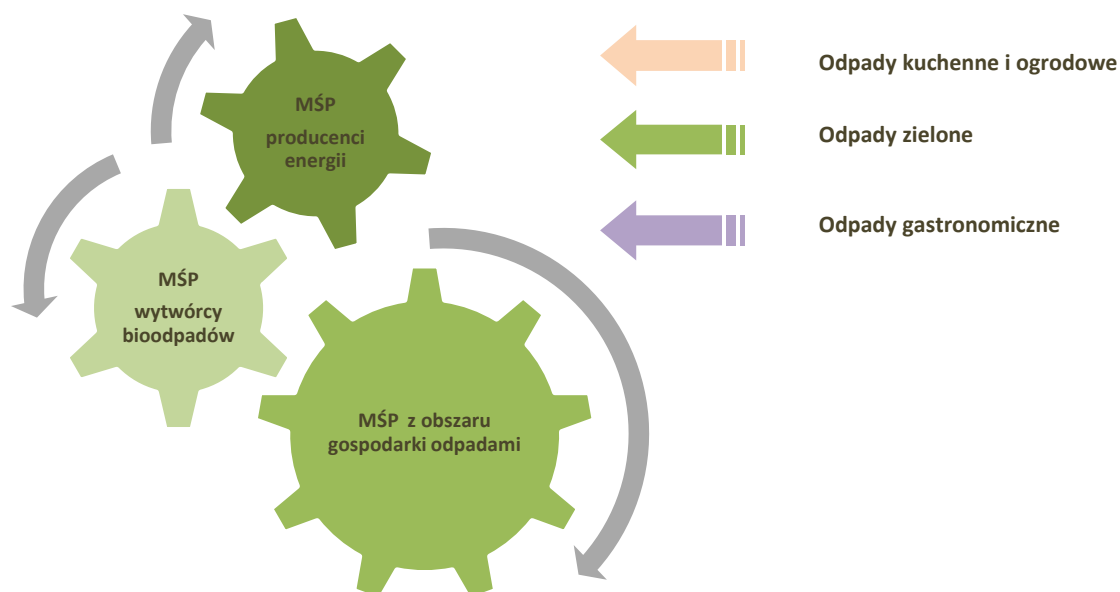
|      |   |    |
|------|---|----|
| 1.   | Wprowadzenie do projektu.....   | 4  |
| 2.   | Wybrane definicje .....   | 7  |
| 2.1. | Wybrane definicje odpadów .....   | 7  |
| 2.2. | Pozostałe definicje.....  | 8  |
| 3.   | Wstęp .....   | 12 |
| 4.   | ABC procesu fermentacji metanowej.....  | 13 |
| 5.   | Charakterystyka bioodpadów .....  | 18 |
| 6.   | Opcje technologiczne dla fermentacji metanowej bioodpadów .....                         | 22 |
| 6.1. | Fermentacja mokra a fermentacja sucha.....  | 23 |
| 6.2. | Fermentacja mezofilowa a fermentacja termofilowa .....                                  | 26 |
| 6.3. | Fermentacja ciągła a fermentacja okresowa (wsadowa) .....                               | 27 |
| 6.4. | Fermentacja jednostopniowa a fermentacja z rozdziałem faz procesu.....                  | 29 |
| 7.   | Technologie wstępnej obróbki bioodpadów.....  | 31 |
| 7.1. | Obróbka mechaniczna .....   | 33 |
| 7.2. | Obróbka chemiczna .....   | 37 |
| 7.3. | Obróbka ciśnieniowo-termiczna .....   | 37 |
| 7.4. | Obróbka mikrofalami.....  | 38 |
| 7.5. | Mikro-natlenianie .....   | 39 |
| 7.6. | Obróbka biologiczna .....   | 39 |
| 8.   | Rozwiązania dostępne na rynku .....   | 41 |
| 8.1. | Wybrane technologie fermentacji mokrej .....  | 44 |
| 8.2. | Wybrane technologie fermentacji suchej .....  | 47 |
| 9.   | Jak wybrać właściwą opcję technologiczną?.....  | 55 |
| 10.  | Fermentacja odpadów zielonych .....   | 57 |
| 11.  | Kierunki wykorzystania biogazu .....  | 61 |
| 12.  | Zagospodarowanie masy pofermentacyjnej .....  | 64 |
|      | Literatura .....  | 66 |
|      | Załącznik 1: Przykłady instalacji fermentacji na bioodpady pochodzenia komunalnego..... | 73 |

## 1. Wprowadzenie do projektu

Dr Ewa Krasuska i mgr inż. Anna Oniszk-Popławska, autorki wspólnego rozwiązania innowacyjnego **„Recykling organiczny i odzysk energii dla segregowanych u źródła bioodpadów pochodzenia komunalnego”**, zaproponowały nowy standard usługowy oparty na łańcuchu powiązań kooperacyjnych, w celu wytworzenia nowych produktów i usług dla małych i średnich przedsiębiorstw w obszarze gospodarki odpadami i produkcji zielonej energii.

W analizie zasobowej ograniczono się do selektywnie zbieranych bioodpadów pochodzenia komunalnego tj. odpadów zielonych, odpadów kuchennych i ogrodowych oraz odpadów gastronomicznych. Odzysk ww. bioodpadów w procesie recyklingu organicznego (tj. produkcja materiału o przydatności nawozowej) w połączeniu z odzyskiem energii jest w Polsce zagadnieniem nowym. Dotychczas recykling rozumiany był głównie jako odzysk materiałowy tworzyw sztucznych, papieru, metali i szkła. Natomiast produkcja energii odnawialnej z biomasy rozważana była raczej w kontekście substratów lub odpadów pochodzenia rolniczego czy z przemysłu rolno-spożywczego. Tymczasem konieczność spełnienia wymogów Unii Europejskiej, zarówno w obszarze gospodarki odpadami (stopniowe ograniczanie możliwości składowania odpadów komunalnych ulegających biodegradacji na składowiskach), jak i w obszarze energetyki odnawialnej (wyznaczone cele ilościowe na rok 2020) stanowią szansę na stworzenie nowych możliwości biznesowych dla małych i średnich przedsiębiorstw.






Prezentowany łańcuch kooperacyjny ma charakter kompleksowy. Ogniwem początkowym, obok gospodarstw domowych, są firmy będące źródłem bioodpadów, np. firmy gastronomiczne, sklepy i hurtownie spożywcze, zakłady produkujące i wprowadzające do obrotu żywność, czy firmy zajmujące się konserwacją zieleni miejskiej. Następne ogniwo to przedsiębiorcy działający w obszarze gospodarki odpadami tj. realizujący usługi zbiórki selektywnej, w tym systemy gromadzenia i logistyki dla bioodpadów pochodzenia komunalnego (odpadów zielonych, odpadów kuchennych i ogrodowych, odpadów gastronomicznych). Ogniwem końcowym łańcucha mogą być MŚP wykorzystujące bioodpady, prowadzące działalność gospodarczą zarówno w sektorze gospodarki odpadami, jak i w sektorze produkcji energii odnawialnej; m.in. operatorzy biogazowni, operatorzy regionalnych instalacji przetwarzania odpadów komunalnych, przedsiębiorstwa wytwarzające bioodpady i chcące je przetwarzać we własnym zakresie itp.




### Możliwość wykorzystania bioodpadów pochodzenia komunalnego


Założeniem projektowym jest pokazanie możliwości organizacyjnych, technicznych i biznesowych, które otwierają się przed sektorem MŚP na każdym etapie funkcjonowania proponowanego łańcucha kooperacyjnego (planowanie, zbiórka, wywóz, przetwarzanie, technologie recyklingu organicznego i wytwarzania energii). Produkty powstałe w wyniku wdrożenia proponowanego rozwiązania, tj. energia (ciepło, energia elektryczna) i produkt o właściwościach nawozowych (masa pofermentacyjna lub komposty) otwierają kolejne możliwości rozszerzenia działalności przez wybrane MŚP na terenie Województwa Mazowieckiego.


Autorki rozwiązania innowacyjnego opracowały kompendium wiedzy dedykowane przedsiębiorcom, dostępne w blokach tematycznych:

-  Przewodnik dla przedsiębiorcy: systemy zbiórki, gromadzenia i odbioru, autor: mgr inż. Anna Oniszk-Popławska;
-  Kalkulator zasobowo-energetyczny wraz z  przykładem obliczeniowym, autor: mgr inż. Anna Oniszk-Popławska;
-  Przewodnik dla przedsiębiorcy: technologie recyklingu organicznego i odzysku energii, autor: dr Ewa Krasuska;
-  Przewodnik dla przedsiębiorcy: otoczenie formalno-prawne, autor: dr Ewa Krasuska.

Dodatkowo autorki przedstawiły dwa przykładowe  modele biznesowe, które wydają się szczególnie atrakcyjne dla przedsiębiorców wykorzystujących bioodpady pochodzenia komunalnego:



1)  Model biznesowy 1: Istniejące lub planowane biogazownie przyjmujące zmieszany strumień substratów. Jest to model biznesowy dla MŚP zainteresowanego wykorzystaniem dodatkowych substratów do istniejącej lub planowanej biogazowni w celu zdobycia przewagi konkurencyjnej na lokalnym rynku.

2)  Model biznesowy 2: System kaskadowy wykorzystania odpadów zielonych: biogazownia, kompostownia, kocioł na biomasę. Jest to model biznesowy dla MŚP zainteresowanego stworzeniem nowych produktów i usług na bazie dostępnych odpadów zielonych (wytworzonych podczas wykonywanej działalności w obszarze pielęgnacji/ konserwacji terenów zielonych).

Proponowana innowacja może stać się podstawą budowania strategii rozwoju przedsiębiorstwa w perspektywie następnych kilku lub kilkunastu lat. Ma służyć małym i średnim przedsiębiorcom do wypracowania nowego standardu usługowego, jego wdrożeniu, a następnie zdobyciu przy jego pomocy przewagi rynkowej.

## 2. Wybrane definicje

### 2.1. Wybrane definicje odpadów

**Bioodpady** – ulegające biodegradacji odpady z ogrodów i parków, odpady spożywcze i kuchenne z gospodarstw domowych, gastronomii, zakładów zbiorowego żywienia, jednostek handlu detalicznego, a także porównywalne odpady z zakładów produkujących lub wprowadzających do obrotu żywność (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach); bioodpady nie obejmują natomiast odpadów rolniczych, odchodów, osadów ściekowych, odpadów z leśnictwa; nie obejmują również takich odpadów ulegających biodegradacji jak włókna naturalne, papier czy tektura oraz tych produktów ubocznych produkcji żywności, które nigdy nie stają się odpadami (Zielona Księga w sprawie gospodarowania bioodpadami w Unii Europejskiej);

**Biotona**- w Niemczech uważa się, że odrębny system zbiórki dla odpadów ogrodowych i kuchennych z prywatnych posesji jest zbyt dużym wysiłkiem organizacyjnym, dlatego też ww. odpady zbierane są najczęściej razem w jednym zbiorniku z odpadami kuchennymi, zwanym „biotoną”, definicja własna;

**Odpady** – każda substancja lub przedmiot, których posiadacz pozbywa się, zamierza się pozbyć lub do których pozbycia się jest obowiązany (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach);

**Odpady gastronomiczne** – wszystkie odpady żywnościowe, w tym zużyty olej kuchenny pochodzący z restauracji, obiektów gastronomicznych i kuchni, łącznie z kuchniami zbiorowymi i domowymi (definicja na podstawie *Rozporządzenia Komisji (UE) nr 142/2011 z dnia 25 lutego 2011 r. w sprawie wykonania rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 określającego przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi, oraz w sprawie wykonania dyrektywy Rady 97/78/WE w odniesieniu do niektórych próbek i przedmiotów zwolnionych z kontroli weterynaryjnych na granicach w myśl tej dyrektywy*);

**Odpady komunalne** – odpady powstające w gospodarstwach domowych, z wyłączeniem pojazdów wycofanych z eksploatacji, a także odpady niezawierające odpadów niebezpiecznych pochodzące od innych wytwórców odpadów, które ze względu na swój charakter lub skład są podobne do odpadów powstających w gospodarstwach domowych; zmieszane odpady komunalne pozostają zmieszanymi odpadami komunalnymi, nawet jeżeli zostały poddane czynności przetwarzania odpadów, która nie zmieniła w sposób znaczący ich właściwości (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach);

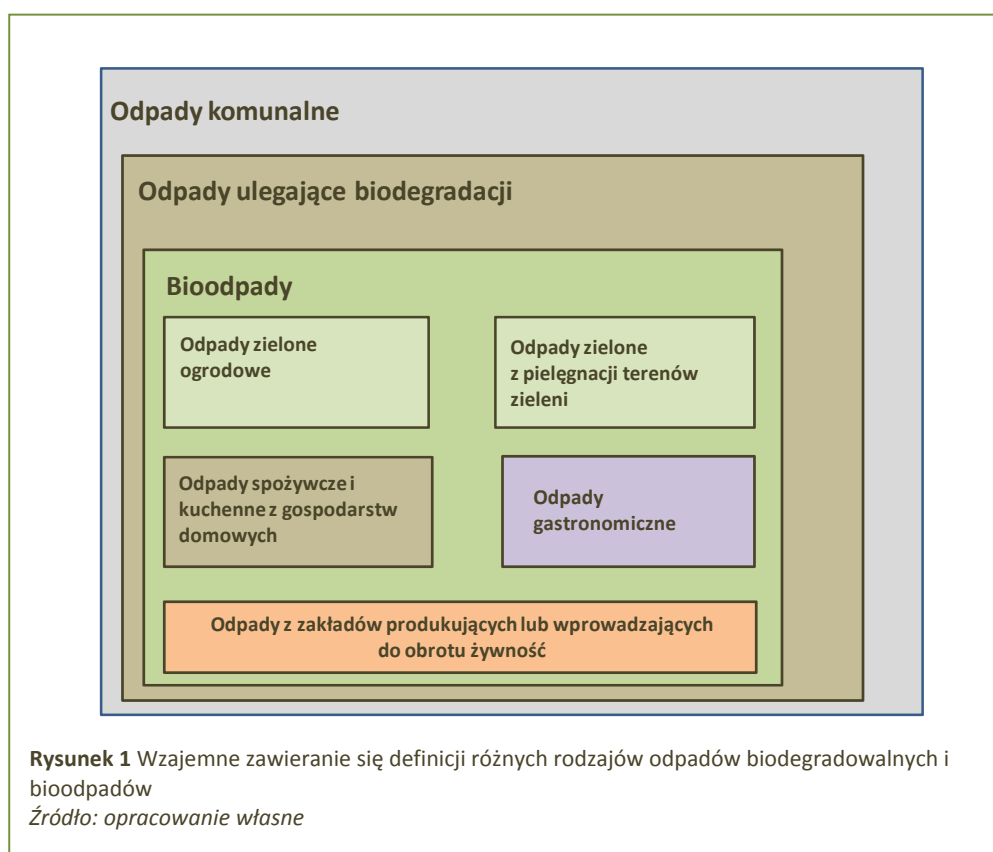
**Odpady kuchenne** – odpady pochodzące z gospodarstw domowych, związane z przygotowaniem posiłków, w tym resztki żywności i produkty spożywcze, które utraciły przydatność do spożycia; (definicja własna);

**Odpady ogrodowe** – odpady z pielęgnacji ogrodów, ogródków przydomowych, zawierające ścinki traw i gałęzie drzew, zasadniczo stanowią część odpadów zielonych; (definicja własna);

**Odpady ulegające biodegradacji** – rozumie się przez to odpady, które ulegają rozkładowi tlenowemu lub beztlenowemu przy udziale mikroorganizmów (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach);

**Odpady zielone** – rozumie się przez to odpady komunalne stanowiące części roślin pochodzących z pielęgnacji terenów zielonych, ogrodów, parków i cmentarzy, a także z targowisk, z wyłączeniem odpadów z czyszczenia ulic i placów (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach);

**Odpady z czyszczenia ulic i placów** – zanieczyszczenia uprzątnięte z chodników i jezdni (zmiotki uliczne) oraz odpady zgromadzone w przeznaczonych do tego celu pojemnikach ustawionych na chodniku (zawartość koszy ulicznych), a także błoto, śnieg, lód usuwane z powierzchni ulic (na podstawie Art. 3. Ustawy o utrzymaniu czystości i porządku w gminach).



## 2.2. Pozostałe definicje

**Biogazownia** – instalacja fermentacji metanowej, której głównym celem jest wytworzenie biogazu oraz przefermentowanego produktu (pofermentu);

**Biologiczne procesy przetwarzania odpadów** – procesy przetwarzania odpadów ulegających biodegradacji; można je podzielić na procesy tlenowe i beztlenowe; do procesów tlenowych należy tlenowa stabilizacja i kompostowanie, natomiast do procesów beztlenowych fermentacja metanowa, opracowanie własne;

**Fermentacja metanowa** – proces recyklingu organicznego, którego głównym celem jest wytworzenie biogazu oraz przefermentowanego produktu, opracowanie własne;

**Fermentat/poferment/produkt fermentacji/masa pofermentacyjna** – przefermentowany produkt będący wynikiem fermentacji metanowej, który spełnia kryteria jakościowe dla nawozów organicznych lub środków wspomagających uprawę roślin, opracowanie własne;



**Kompost/produkt kompostowania** – produktu procesu kompostowania, który spełnia kryteria jakościowe dla nawozów organicznych lub środków wspomagających uprawę roślin (definicja własna);

**Kompostowanie** – proces recyklingu organicznego (R3), którego głównym celem jest wytworzenie kompostu (definicja własna);

**Nawozy organiczne** – nawozy wyprodukowane z substancji organicznej lub z mieszanin substancji organicznych, w tym komposty, a także komposty wyprodukowane z wykorzystaniem dżdżownic (art. 2. ust 1. Ustawy o nawozach i nawożeniu);

**Odzysk** – jakiegokolwiek proces, którego głównym wynikiem jest to, aby odpady służyły użytecznemu zastosowaniu przez zastąpienie innych materiałów, które w przeciwnym przypadku zostałyby użyte do spełnienia danej funkcji, lub w wyniku którego odpady są przygotowywane do spełnienia takiej funkcji w danym zakładzie lub ogólnie w gospodarce (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach);

**Odzysk energii** – termiczne przekształcanie odpadów w celu odzyskania energii (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach);

**Podłoże do upraw** – materiał inny niż gleba, w tym substraty, w którym są uprawiane rośliny (art. 2. ust 1. Ustawy o nawozach i nawożeniu);

**Przetwarzanie** – procesy odzysku lub unieszkodliwiania odpadów, w tym przygotowanie poprzedzające odzysk lub unieszkodliwianie (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach);

**Recykling** – odzysk, w ramach którego odpady są ponownie przetwarzane na produkty, materiały lub substancje wykorzystywane w pierwotnym celu lub innych celach; obejmuje to ponowne przetwarzanie materiału organicznego (recykling organiczny), ale nie obejmuje odzysku energii i ponownego przetwarzania na materiały, które mają być wykorzystane jako paliwa lub do celów wypełniania wyrobisk (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach);

**Recykling organiczny** – obejmuje ponowne przetwarzanie materiału organicznego, np. bioodpadów na produkty, materiały lub substancje wykorzystywane w pierwotnym celu lub innych celach, ale nie obejmuje odzysku energii i ponownego przetwarzania na materiały, które mają być wykorzystane jako paliwa lub do celów wypełniania wyrobisk (na podstawie art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach);

**Regionalna instalacja do przetwarzania odpadów komunalnych (RIPOK)** – zakład zagospodarowania odpadów o mocy przerobowej wystarczającej do przyjmowania i przetwarzania odpadów z obszaru zamieszkałego przez co najmniej 120 tys. mieszkańców, spełniający wymagania najlepszej dostępnej techniki lub technologii, o której mowa w art. 143 ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska oraz zapewniający termiczne przekształcanie odpadów lub:

(i) mechaniczno-biologiczne przetwarzanie zmieszanych odpadów komunalnych i wydzielanie ze zmieszanych odpadów komunalnych frakcji nadających się w całości lub w części do odzysku, lub

(ii) przetwarzanie selektywnie zebranych odpadów zielonych i innych bioodpadów oraz wytwarzanie z nich produktu o właściwościach nawozowych lub środków wspomagających uprawę roślin, spełniających wymagania określone w przepisach odrębnych, lub materiału po procesie

kompostowania lub fermentacji dopuszczonego do odzysku w procesie odzysku R10, spełniającego wymagania określone w przepisach wydanych na podstawie art. 30 ust. 4, lub

(iii) składowanie odpadów powstających w procesie mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych oraz pozostałości z sortowania odpadów komunalnych o pojemności pozwalającej na przyjmowanie przez okres nie krótszy niż 15 lat odpadów w ilości nie mniejszej niż powstająca w instalacji do mechaniczno-biologicznego przetwarzania zmieszanych odpadów komunalnych (art. 35. ust 6. Ustawy o odpadach);

**Selektywne zbieranie** – zbieranie, w ramach którego dany strumień odpadów, w celu ułatwienia specyficznego przetwarzania, obejmuje jedynie odpady charakteryzujące się takimi samymi właściwościami i takimi samymi cechami (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach);

**Środek poprawiający właściwości gleby** – substancje dodawane do gleby w celu poprawy jej właściwości lub jej parametrów chemicznych, fizycznych, fizykochemicznych lub biologicznych, z wyłączeniem dodatków do wzbogacenia gleby wytworzonych wyłącznie z produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego w rozumieniu przepisów rozporządzenia (WE) nr 1774/2002 Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 3 października 2002 r. ustanawiającego przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi (art. 2. ust 1. Ustawy o nawozach i nawożeniu);

**Środki wspomagające uprawę roślin** – środki poprawiające właściwości gleby, stymulatory wzrostu i podłoża do upraw (art. 2. ust 1. Ustawy o nawozach i nawożeniu);

**Tereny zieleni** - tereny wraz z infrastrukturą techniczną i budynkami funkcjonalnie z nimi związanymi pokryte roślinnością, znajdujące się w granicach wsi o zwartej zabudowie lub miast, pełniące funkcje estetyczne, rekreacyjne, zdrowotne lub osłonowe a w szczególności parki, zieleńce, promenady, bulwary, ogrody botaniczne, zoologiczne, jordanowskie i zabytkowe oraz cmentarze a także zieleń towarzyszącą ulicom, placom, zabytkowym fortyfikacjom, budynkom, składowiskom, lotniskom oraz obiektom kolejowym i przemysłowym (art. 5 pkt. 21 Ustawy o ochronie przyrody).

**Termiczne przekształcanie odpadów** – rozumie się przez to:

- a) spalanie odpadów przez ich utlenianie,
- b) inne niż wskazane w lit. a procesy termicznego przetwarzania odpadów, w tym pirolizę, zgazowanie i proces plazmowy, o ile substancje powstające podczas tych procesów są następnie spalane (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach);

**Unieszkodliwianiu odpadów** – proces niebędący odzyskiem, nawet jeżeli wtórnym skutkiem takiego procesu jest odzysk substancji lub energii (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach);

**Wytwórca odpadów** – każdy, kogo działalność lub bytowanie powoduje powstawanie odpadów (pierwotny wytwórca odpadów), oraz każdy, kto przeprowadza wstępną obróbkę, mieszanie lub inne działania powodujące zmianę charakteru lub składu tych odpadów; wytwórca odpadów powstających w wyniku świadczenia usług w zakresie budowy, rozbiórki, remontu obiektów, czyszczenia zbiorników lub urządzeń oraz sprzątnięcia, konserwacji i napraw jest podmiot, który

świadczy usługę, chyba że umowa o świadczenie usługi stanowi inaczej (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach);

**Zbieranie odpadów** – gromadzenie odpadów przed ich transportem do miejsc przetwarzania, w tym wstępne sortowanie nieprowadzące do zasadniczej zmiany charakteru i składu odpadów i niepowodujące zmiany klasyfikacji odpadów oraz tymczasowe magazynowanie odpadów (art. 3. ust 1. Ustawy o odpadach).

### 3. Wstęp

W Polsce dotychczas odpady ulegające biodegradacji kierowane były na składowiska w strumieniu zmieszanych odpadów komunalnych. Jednocześnie wymagania prawne nakładają obowiązek stopniowego ograniczania składowania tej frakcji. Należy zatem opracować nowe podejście do tematyki gospodarki odpadami biodegradowalnymi, m.in. poprzez wdrożenie selektywnej zbiórki bioodpadów w celu efektywnego ich wykorzystania.

Selektywna zbiórka bioodpadów, takich jak odpady spożywcze, kuchenne z gospodarstw domowych, z gastronomii i punktów zbiorowego żywienia oraz odpadów zielonych, stosowana jest w Polsce w znikomym stopniu. Obecne przepisy prawa nie nakładają obowiązku zbiórki selektywnej bioodpadów, choć dają możliwość zainicjowania takich działań na poziomie gminy. Wydaje się, że jest to przyszłościowy kierunek rozwoju systemu gospodarki odpadami komunalnymi w Polsce.

Selektywna zbiórka bioodpadów i przetwarzanie ich w instalacjach fermentacji metanowej (biogazowniach) pozwala na recykling organiczny (uzyskanie pełnowartościowego produktu stosowanego w celach nawozowych) oraz odzysk energii zawartej w bioodpadach (produkcja biogazu i przetwarzanie go na energię). Jest to rozwiązanie najbardziej uzasadnione ze środowiskowego punktu widzenia. W Europie systemy gospodarki bioodpadami z selektywną zbiórką „u źródła” funkcjonują w wielu krajach. Do liderów należą Dania, Szwecja, Niemcy. Polska może czerpać z bogatych doświadczeń tych krajów.

#### Adresaci przewodnika

Przewodnik kierowany jest w szczególności do przedsiębiorców zajmujących się zagospodarowaniem i przetwarzaniem odpadów komunalnych.

#### Zakres przewodnika

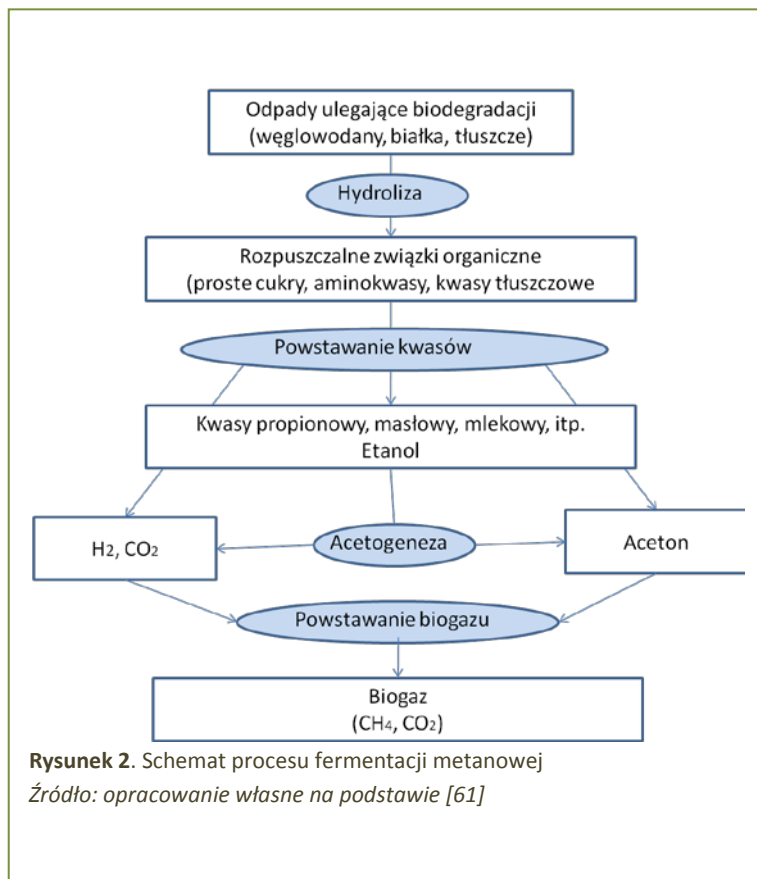
W niniejszym przewodniku przedsiębiorca znajdzie odpowiedź na następujące pytania:

1. Na czym polega proces fermentacji metanowej?
2. Jakie rodzaje bioodpadów nadają się jako wsad do instalacji biogazowej?
3. Jakie są dostępne na rynku technologie w zakresie beztlenowego przetwarzania bioodpadów?
4. Jak dobrać odpowiednią technologię?
5. Do czego służą procesy obróbki wstępnej bioodpadów? Jakie metody stosowane są w skali komercyjnej?
6. Jakie są możliwości w zakresie zagospodarowania pofermentu?
7. Czy odpady kuchenne/zielone/gastronomiczne nadają się do wykorzystania w procesach fermentacji?
8. Jakie są możliwości wykorzystania uzyskanego w procesie fermentacji biogazu?
9. Na jakich rozwiązaniach bazują istniejące instalacje biogazowe w Europie?

#### 4. ABC procesu fermentacji metanowej

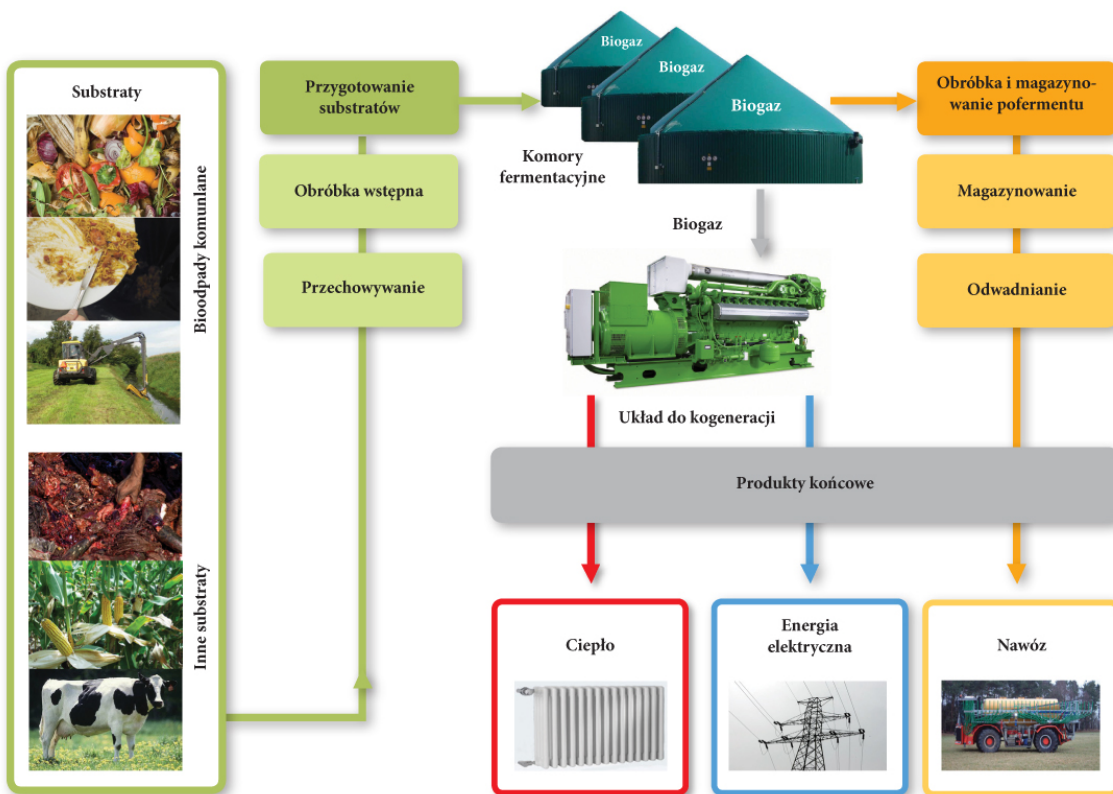
Kluczowym procesem zachodzącym w instalacji biogazowej jest fermentacja metanowa. Jest to zespół reakcji chemicznych bardzo podobny do tych zachodzących w żwaczach krowich. Fermentacja odbywa się w czterech fazach (Rysunek 1): hydrolizy, acydofilnej (wytwarzanie kwasów), octanogennej (wytwarzanie kwasu octowego), metanogennej.

Fermentacja prowadzi do rozkładu materii organicznej, w wyniku którego powstaje biogaz i tzw. poferment (produkty fermentacji). Biogaz składa się głównie z metanu ( $\text{CH}_4$ ) oraz dwutlenku węgla ( $\text{CO}_2$ ), a także zawiera w niewielkich ilościach domieszkę innych gazów (siarkowodór, azot, tlen, wodór, amoniak). Metan jako gaz palny jest najcenniejszym składnikiem biogazu (typowo jego zawartość waha się w zakresie 50-70%). Decyduje on o wartości energetycznej biogazu, co przekłada się na wyniki ekonomiczne działania instalacji biogazowej.



Centralnym elementem instalacji jest komora fermentacyjna. Przed załadunkiem wsadu do komory prowadzone są procesy związane z jego przygotowaniem, takie jak: magazynowanie substratów i obróbka wstępna. Integralną częścią instalacji jest najczęściej układ oczyszczania biogazu oraz układ kogeneracyjny do wytwarzania energii elektrycznej i ciepła w skojarzeniu (CHP). Biogaz może także być uzdatniany do jakości gazu ziemnego i przeznaczony do załączania do lokalnej sieci gazowej. Ponadto, w biogazowni występują moduły do obróbki masy pofermentacyjnej oraz zbiorniki do jej gromadzenia. Na schemacie poniżej (Rysunek 2) przedstawiono podstawowe procesy w ciągu technologicznym biogazowni.





**Rysunek 3.** Podstawowe procesy zachodzące w biogazowni wytwarzającej biogaz do produkcji energii elektrycznej i ciepła  
*Źródło: opracowanie własne*

#### Podstawowe parametry procesu fermentacji, wpływające na jego efektywność:

- temperatura,
- hydrauliczny czas retencji (HRT),
- obciążenie komory fermentacyjnej ładunkiem związków organicznych (OLR),
- pH,
- stosunek zawartości węgla do azotu (C:N).

Z punktu widzenia prowadzenia procesu fermentacji ważne są również:

- brak obecności inhibitorów,
- dodawanie innych substratów (kofermentacja) lub substancji pomocniczych, np. enzymów.

## Temperatura

Dla zapewnienia ciągłego i stabilnego procesu fermentacyjnej konieczne jest utrzymanie stałej (w odpowiednim zakresie), jednorodnej temperatury w całej objętości zbiornika. W odniesieniu do przetwarzania bioodpadów pochodzenia komunalnego wyróżnia się fermentację [38, 37, 13]

- mezofilową w temp. ok. 35°C (20-45°C)

- termofilową w temp. ok. 55°C (50-65°C).

Charakterystyka obu procesów została omówiona w rozdziale **Fermentacja mezofilowa a fermentacja termofilowa**.

## Hydrauliczny czas retencji (HRT, czas zatrzymania w komorze)

Określa średni czas przebywania wsadu w komorze fermentacyjnej. Powinien być dostosowany do rodzaju wsadu, tak by umożliwić jego pełny rozkład. Minimalny HRT uzależniony jest także od temperatury w jakiej przebiega fermentacja. Podczas fermentacji mezofilowej czas retencji dla odpadów komunalnych ulegających biodegradacji, wynosi typowo 15-21 dni, a dla fermentacji termofilowej – około 14 dni [18].

Substancje organiczne ulegają rozkładowi w różnym tempie. Najdłuższy czas retencji wymagany jest w przypadku substratów o podwyższonej zawartości substancji trudno rozkładalnych, np.: celulozy, hemicelulozy i ligniny. Dla substratów o takich właściwościach typowo stosuje się obróbkę wstępną w warunkach wysokiej temperatury i ciśnienia (hydrolizy ciśnieniowej), by podwyższyć wydajność procesu fermentacji. Stosuje się także dodawanie enzymów [15]. Jednak metody te łączą się z wyższymi kosztami.

W przypadku zastosowania komór z ciągłym mieszaniem dla całego wsadu występuje uśredniony jednakowy czas retencji. Dla wsadu o krótkim HRT stosuje się mniejszy rozmiar komory, co przekłada się na niższe koszty inwestycyjne. Jednocześnie krótszy HRT wiąże się często z niższym stopniem rozkładu materii organicznej zawartej we wsadzie oraz zmniejszoną stabilnością procesu [61].

Wartość HRT zależy będzie również od tego, jakie rozwiązanie technologiczne zastosowano, dla fermentacji zachodzącej w wyższej temperaturze (termofilowej) będzie on krótszy niż dla fermentacji mezofilowej.

## Obciążenie komory fermentacyjnej ładunkiem związków organicznym (ORL)

Parametr ten wyraża ilość masy organicznej, która ma być przetworzona w określonej wielkości komory fermentacyjnej w określonym czasie, pozostaje on w ścisłym powiązaniu z hydraulicznym czasem retencji (HRT) i jest kluczowym wskaźnikiem przebiegu procesu fermentacji. Produkcja biogazu rośnie przy zwiększaniu obciążenia do wartości granicznej, a po osiągnięciu maksimum, kiedy następuje przeciążenie układu, produkcja biogazu spada. Dla biodegradowalnej frakcji odpadów komunalnych średnio wartość ta wynosi 3,3 kg s.m.o. m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> i waha się od 1,6 do 7,0 [36]. Gwałtowny wzrost zawartości masy organicznej we wsadzie zadawanym do komory fermentacji powoduje wzrost stężenia kwasów tłuszczowych (intensyfikacja I fazy procesu fermentacji), co prowadzi do spadku pH, hamując działanie bakterii metanogennych.

W zależności od stopnia biodegradowalności materiału poddanego procesowi fermentacji, zakres ORL może być bardzo różny (Tabela 1).

**Tabela 1.** Obciążenie komory ładunkiem związków aorganicznych

| Obciążenie komory ładunkiem związków organicznych<br>kg s.m.o. m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> |         |
|--|---------|
| Ścieki komunalne   |         |
| Niskie obciążenie  | 0,8-2,2 |
| Wysokie obciążenie   | 2,5-5,0 |
| Stałe odpady ulegające biodegradacji   |         |
| Bardzo wysokie obciążenie  | 10-13   |

Źródło: [18]

## pH

Fermentacja metanowa powinna być prowadzona przy obojętnym odczynie wsadu (pH około 7). Optymalny odczyn pH jest jednak różny w zależności od typu bakterii charakterystycznych dla poszczególnych etapów procesu fermentacji. Wartość pH optymalna dla baterii acidogennych waha się w zakresie 5,5-6, a acetogenne bakterie preferują pH bliskie obojętnemu. Dla bakterii metanogennych warunki optymalne to pH od 6,8 do 7,6. Obserwowano spadek uzysku metanu przy pH niższym niż 6,3 lub wyższym niż 7,8 [61]. W niektórych technologiach rozdziela się etapy prowadzenia procesów fermentacji – w pierwszej komorze zachodzi hydroliza, w drugiej – metanogeneza.

## Inhibitory procesu

Inhibitory to substancje, które w niewielkich ilościach działają toksycznie na bakterie, spowalniając proces rozkładu materii organicznej, a w krańcowych sytuacjach nawet go zatrzymując. Inhibitory znajdują się we wsadzie bądź są wynikiem działania bakterii w komorze fermentacyjnej. Inne substancje zaburzające proces fermentacji to siarczki, jony metali lekkich (Na, K, Cu, Mg), jony metali ciężkich (Cu, Ni, Cr).

**Tabela 2.** Stężenie inhibitorów, przy którym dochodzi do zatrzymania procesu fermentacji metanowej

| Wyszczególnienie          | Stężenie inhibitora w przeliczeniu na objętość komory fermentacyjnej (mg dm <sup>-3</sup> ) |
|---------------------------|---|
| Lotne kwasy tłuszczowe    | >2.000 (jako kwas octowy)<br>>6.000–8.000 (jako całkowite kwasy lotne)                      |
| Całkowity azot amonowy    | 1.500–3.000 (dla pH >7,6)   |
| Wolny amoniak             | 600–800   |
| Siarczki                  | 250 (jako H <sub>2</sub> S dla pH 6,4–7,2)<br>90 (jako H <sub>2</sub> S dla pH 7,8–8,0)     |
| Siarczki                  | >100 (jako rozpuszczalne siarczki)  |
| Miedź (Cu)                | 0,5 (forma rozpuszczona); 150   |
| Kadm (Cd)                 | 150   |
| Żelazo (Fe)               | 1710  |
| Chrom (Cr <sup>3+</sup> ) | 3   |
| Chrom (Cr <sup>6+</sup> ) | 500   |
| Nikiel                    | 2   |
| Wapno                     | 2.500–4.500; 8.000 (silny inhibitor procesu)  |
| Magnez                    | 1.000–1.500; 3.000 (silny inhibitor procesu)  |

Źródło: [38]

## Stosunek węgla do azotu (C:N)

Bakterie biorące udział w procesie fermentacji metanowej, aby rosnąć i rozmnażać się, wymagają pożywki, jaką jest materia organiczna. Stosunek C:N może wahać się od bardzo niskich wartości, jak np. 6 dla gnojowicy zwierzęcej, do bardzo wysokich, np. 500 dla zrębków drewna [38]. Przyjmuje się, że stosunek węgla do azotu (C:N) w materiale poddawanym procesowi fermentacji powinien mieścić się w zakresie 20-30, co zapewnia mikroorganizmom odpowiedni dostęp do azotu [83, 38]. Przykładowo dla odpadów kuchennych (resztek warzyw i owoców) optymalny stosunek C:N dla efektywnej fermentacji mieści się w zakresie 22-25 [5]. W Czechach świeże bioodpady kuchenne pozyskane od mieszkańców z zabudowy wielorodzinnej charakteryzowały się stosunkiem C:N średnio na poziomie 23,6 [29]. Sposobem przeciwdziałania wysokiemu stężeniu azotu może być dodatek biomasy o wysokiej zawartości węgla (np. słomy) i dzięki temu zwiększenie stosunku C:N we wsadzie.

Stosunek C:N można poprawić również poprzez zastosowanie worków papierowych lub wykonanych z kukurydzy, jednak w warunkach brytyjskich, gdzie ok. 13 instalacji przyjmuje odpady kuchenne w takich workach, prawie wszyscy operatorzy biogazowni nie byli z nich zadowoleni narzekając na ich słabą rozkładalność [87].

## Kofermentacja, czyli wspólna fermentacja różnych substratów

Dodawanie do odpadów komunalnych ulegających biodegradacji innego rodzaju wsadu do procesu fermentacji zasadniczo ma na celu zwiększenie uzysku biogazu, zapewnienie bardziej stabilnych warunków przebiegu procesów biologiczno-chemicznych, a także łatwiejsze operowanie wsadem w instalacji (transport, załadunek, itp.). Kluczową sprawą dla kofermentacji jest zapewnienie właściwego bilansu makro- i mikrośladników stanowiących pożywkę dla mikroorganizmów w komorze fermentacyjnej.

Bioodpady pochodzenia komunalnego mogą być poddane procesowi fermentacji razem z innymi substratami, takimi jak osad ściekowy, gnojowica zwierzęca, a także bioodpady pochodzenia przemysłowego. Podjęto też próby łączenia odpadów komunalnych z uprawami energetycznymi [59].

Osad ściekowy wydaje się szczególnie interesującym kosubstratem, gdyż dostępny jest w dużych ilościach, a jego dodatek do odpadów komunalnych poprawia stosunek C:N oraz pozwala uzyskać pożądane uwodnienie wsadu do fermentacji. Przykładowo do fermentacji mokrej stosuje się domieszkę w proporcji 25:75 objętościowo lub 80:20 na podstawie zawartości suchej masy (s.m.) [32].

Stosowanie kosubstratów z odpadami komunalnymi jest dość powszechne. W szczególności w Danii, istnieją aż 22 instalacje w skali przemysłowej, gdzie do stałych, ulegających biodegradacji odpadów komunalnych, stosuje się domieszkę głównie gnojowicy, a także bioodpady przemysłowe oraz osad ściekowy. W roku 2010 w skali całej Europy około 10% instalacji przetwarzania stałych biodegradowalnych odpadów komunalnych ulegających biodegradacji stosowało kofermentację, głównie z zastosowaniem gnojowicy [61].

Obecnie, ze względu na wysokie ceny upraw celowych do biogazowni rolniczych (kiszonka kukurydziana), wśród wielu operatorów instalacji bazujących na substratach pochodzenia rolniczego rośnie zainteresowanie kofermentacją mieszanych strumieni bioodpadów, w tym komunalnych.



## 5. Charakterystyka bioodpadów

Technologie fermentacji metanowej mogą być stosowane do przetwarzania szerokiego zakresu odpadów, w tym pochodzenia komunalnego. Chodzi o:

- segregowane u źródła bioodpady, tj.: odpady spożywcze i kuchenne z gospodarstw domowych, z gastronomii i punktów zbiorowego żywienia oraz odpady zielone,
- ulegającą biodegradacji frakcję wyodrębnioną ze strumienia zmieszanych odpadów komunalnych (segregacja mechaniczna tzw. mechaniczno-biologiczne przetwarzanie MBP).

**Przedmiotem niniejszego opracowania są wyłącznie bioodpady selektywnie zbierane u źródła, tj.: odpady spożywcze i kuchenne z gospodarstw domowych, z gastronomii i punktów zbiorowego żywienia oraz odpady zielone**

W Wielkiej Brytanii w 2010 r. funkcjonowało 48 instalacji fermentacji metanowej, w tym 37% substratów wykorzystywanych w biogazowniach stanowiły bioodpady pochodzenia komunalnego [87].

Należy zaznaczyć, że opisane poniżej technologie fermentacji metanowej dotyczą przetwarzania zarówno bioodpadów selektywnie zbieranych, jak i biodegradowalnej frakcji wyodrębnionej ze strumienia zmieszanych odpadów komunalnych na etapie wtórnej segregacji mechanicznej.

Selektywne zbieranie odpadów komunalnych „u źródła” zwykle pozwala na dostarczenie do biogazowni odpadów o wyższej jakości i o mniejszej zawartości innych frakcji nieulegających biodegradacji. Mechanicznie wydzielona frakcja ulegająca biodegradacji odpadów komunalnych jest bardziej zanieczyszczona, co prowadzi do problemów z obsługą instalacji i niższą jakością pofermentu.

Aby przybliżyć skład bioodpadów z gospodarstw domowych selektywnie zbieranych przywołano poniżej wyniki badań przeprowadzonych w Pradze, w Czechach [29]. Ze względu na sąsiedztwo obu krajów, podobne nadwyżki żywieniowe oraz klimat, wyniki te mogą być interesujące dla Polski.

O bioodpadach pochodzenia komunalnego segregowanych u źródła oraz systemach selektywnej zbiórki i ich gromadzenia można przeczytać w przewodniku pt.: **“Systemy zbiórki, gromadzenia i odbioru”**.

Tabela 3 zawiera uśredniony skład poszczególnych frakcji [29], wyrażony jako % świeżej masy bioodpadów zebranych w ciągu roku w czeskiej Pradze. Natomiast Tabela 4 zawiera zestawienie podstawowych parametrów tych odpadów istotnych dla procesu fermentacji. Odpady z zabudowy wielorodzinnej charakteryzowały się niższą zawartością suchej masy (s.m.) ze względu na relatywnie wyższy udział odpadów kuchennych w całej masie pozyskanych bioodpadów. Niższe pH wiąże się prawdopodobnie z wyższą zawartością kwasów organicznych o krótkich łańcuchach w resztkach warzyw i owoców. Średnia zawartość suchej masy organicznej była w ciągu roku w obu typach



zabudowy na zbliżonym poziomie. Dla stosunku C:N notowano duże wahania w ciągu roku, jednak wartość uśredniona jest zbliżona do optymalnego zakresu 20-30.

**Tabela 3.** Skład bioodpadów z gospodarstw domowych w Pradze (% wagowy świeżej masy zebranych odpadów w ciągu roku)

| Wyszczególnienie          | Zabudowa wielorodzinna |      | Zabudowa jednorodzinna |      |
|---------------------------|------------------------|------|------------------------|------|
|                           | Średnia                | Max. | Średnia                | Max. |
| Trawa                     | 3,9                    | 5,6  | 29,0                   | 30,4 |
| Pozostałe rośliny         | 11,6                   | 5,7  | 5,8                    | 3,9  |
| Liście                    | 1,6                    | 1,6  | 27,6                   | 30,8 |
| Drewno                    | 1,1                    | 1,0  | 17,5                   | 4,7  |
| Owoce cytrusowe           | 14,0                   | 4,3  | 1,5                    | 2,3  |
| Pozostałe owoce i warzywa | 44,2                   | 7,8  | 5,4                    | 2,8  |
| Chleb                     | 3,2                    | 1,1  | 0,0                    | 0,0  |
| Ściółka                   | 3,9                    | 0,7  | 0,3                    | 0,6  |
| Ziemia                    | 9,3                    | 5,7  | 11,5                   | 11,1 |
| Papier                    | 2,7                    | 0,8  | 0,4                    | 0,5  |
| Niesklasyfikowane         | 3,8                    | 0,8  | 0,3                    | 0,3  |
| Niebiodegradowalne        | 0,8                    | 0,6  | 0,5                    | 0,3  |

Źródło: [29]

**Tabela 4.** Parametry bioodpadów z gospodarstw domowych w Pradze

|                  | Zabudowa wielorodzinna |           | Zabudowa jednorodzinna |           |
|------------------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|
|                  | Średnia                | Min- max. | Średnia                | Min- max. |
| Zawartość s.m.   | 28,5                   | 22,3-35,4 | 32,5                   | 27,7-38,2 |
| pH               | 5,6                    | 4,9-6,2   | 5,95                   | 5,4-6,7   |
| Zawartość s.m.o. | 73                     | 60-86     | 71                     | 60-81     |
| Azot (%)         | 1,57                   | 1,38-1,78 | 1,37                   | 1,12-1,68 |
| C:N              | 23,6                   | 19,9-31,2 | 26,7                   | 19,3-36,2 |

Źródło: [29]

Opracowania niemieckie wskazują, że odpady kuchenne zawierają zazwyczaj około 15-25% suchej masy oraz 85-94% suchej masy organicznej (s.m.o) i charakteryzują się niskim pH. Dlatego gdy kierowane są jako wsad do biogazowni należy zwracać szczególną uwagę, aby pH wsadu nie spadło poniżej 4 [40].

Za każdym razem jakość i skład wsadu jest zależna od czynników lokalnych. Uzysk biogazu jest warunkowany rodzajem, dostępnością i charakterystyką bioodpadów, dlatego przed skierowaniem ich jako wsadu do biogazowni bardzo ważne jest określenie laboratoryjnie zawartości poszczególnych związków chemicznych w dostępnej masie bioodpadów. Dodatkowo wsad musi zostać scharakteryzowany pod względem uzysku metanu. W przypadku bioodpadów z gospodarstw domowych, najważniejszym składnikiem z punktu widzenia procesu fermentacji są węglowodany [19].

**Rodzaj i charakterystyka bioodpadów decydują o uzysku biogazu, dlatego przed podjęciem decyzji o budowie biogazowni należy zbadać laboratoryjnie dostępne substraty.**

Wielokrotnie badano uzysk biogazu z biodegradowalnych odpadów komunalnych. Kształtuje się on w szerokim zakresie i jest zróżnicowany w zależności od rodzaju bioodpadów, co prezentuje Tabela 5. Produkcja biogazu różni się także w zależności od tego jaką technologię fermentacji wybrano [40].

**Tabela 5.** Uzysk metanu z fermentacji metanowej ulegających biodegradacji odpadów komunalnych

| Rodzaj wsadu  | W przeliczeniu na suchą masę organiczną<br>$\text{dm}^3 \text{CH}_4 \text{kg}^{-1} \text{s.m.o.}$ | W przeliczeniu na masę świeżych odpadów<br>$\text{dm}^3 \text{CH}_4 \text{kg}^{-1}$ |
|---|---|---|
| Biotona (odpady kuchenne i ogrodowe)                  | 75-390  | 40-78   |
| Selektywnie zbierane odpady kuchenne i gastronomiczne | 90-305  | 22-300  |
| Świeże odpady zielone miękkie (trawy)                 | 310-408   | 36-43   |

Źródło: [35,64, 8]

Warto tutaj także przytoczyć wyniki austriackie i niemieckie. Produktywność biogazu dla odpadów kuchennych selektywnie zbieranych według badań laboratoryjnych przeprowadzonych w Austrii waha się w zakresie  $120\text{-}170 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$ , natomiast w Niemczech  $80\text{-}130 \text{ dm}^3 \text{ kg}^{-1}$  (50-75% metanu) [40], [86].


Poniżej Tabela 6 zestawia uzysk metanu dla różnych rodzajów substratów w warunkach niemieckich.

**Tabela 6.** Uzysk biogazu z wybranych substratów w przeliczeniu na tonę substratu

| Substrat   | Jednostkowy uzysk metanu<br>$\text{m}^3 \text{Mg}^{-1} \text{substratu}$ | Substrat   | Jednostkowy uzysk metanu<br>$\text{m}^3 \text{Mg}^{-1} \text{substratu}$ |
|--|--|--|--|
| Odpady zielone   | 43   | Wywar zbożowy gorzelniany                          | 18   |
| Odpady ogrodowe  | 43   | Sok ziemniaczany przy produkcji skrobi             | 11   |
| Odpady kuchenne  | 57   | Ziemniaki(odpad produkcyjny)                       | 92   |
| Odpady gastronomiczne                                  | 80   | Pulpa ziemniaczana                                 | 66   |
| Tłuszcz posmażalniczy                                  | 562  | Obierki ziemniaczane                               | 66   |
| Obornik koński   | 35   | Woda procesowa przy produkcji skrobi ziemniaczanej | 3  |
| Kurzeniec  | 82   | Pulpa ziemniaczana przy produkcji skrobi           | 61   |
| Obornik bydlęcy  | 53   | Wywar ziemniaczany oprócz gorzelnianego            | 18   |
| Gnojowica bydlęca                                      | 17   | Wywar ziemniaczany gorzelniany                     | 17   |
| Obornik kozi i owczy                                   | 59   | Śruta rzepakowa                                    | 274  |
| Obornik świńska  | 45   | Makuch rzepakowy                                   | 317  |
| Gnojowica świńska                                      | 12   | Gliceryna  | 421  |
| Jelita (wieprzowe)                                     | 27   | Odpady z produkcji kwiatów, cięte kwiaty           | 55   |
| Treść żwacza   | 33   | Wysłodki buraczane                                 | 64   |
| Krew   | 83   | Wywar melasowy z buraka (produkcja cukru)          | 166  |
| Młóto browarnicze (wysłodziny)                         | 61   | Krajanka buraczana (rozdrobione buraki)            | 50   |
| Maślanka   | 32   | Burak pastewny                                     | 52   |
| Odtłuszczone mleko świeże (nieprzydatne do konsumpcji) | 33   | Całe rośliny buraków cukrowo-pastewnych            | 38   |
| Odtłuszczone mleko w proszku                           | 363  | Liście buraka cukrowego                            | 46   |
| Mleko (nieprzydatne do konsumpcji)                     | 70   | Kolby kukurydzy (CCM)                              | 242  |
| Twaróg (nieprzydatny do konsumpcji)                    | 92   | Zboża(całe rośliny)*                               | 103  |
| Laktoza  | 378  | Ziarna zbóż  | 320  |

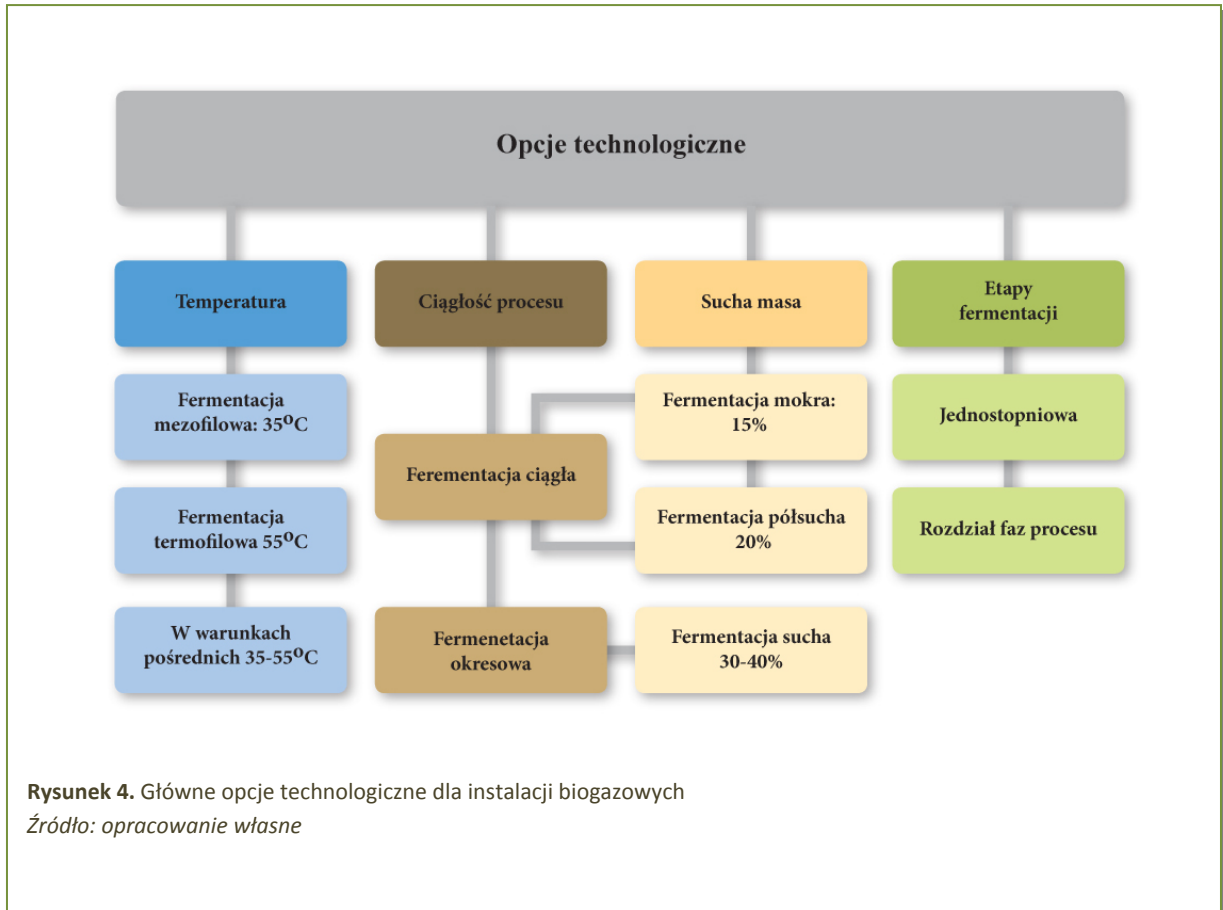
| Substrat  | Jednostkowy uzysk metanu<br>$m^3Mg^{-1}$ substratu | Substrat                                   | Jednostkowy uzysk metanu<br>$m^3Mg^{-1}$ substratu |
|---|--|--|--|
| Permeat mleka z laktozą   | 91   | Trawy (wł. wiechlinowate)                  | 100  |
| Permeat mleka z laktozą niskoproteinowy                           | 69   | Żyto paszowe (całe rośliny)                | 72   |
| Serwatka  | 18   | Rośliny strączkowe(całe rośliny)           | 63   |
| Podsuszona serwatka (koncentrat serwatki bez laktozy)             | 298  | Łęty ziemniaczane                          | 30   |
| Kazeina   | 392  | Ziarno kukurydzy                           | 324  |
| Kwaśna serwatka   | 42   | Kolby kukurydzy                            | 148  |
| Kwaśna serwatka świeża  | 20   | Kukurydza(całe rośliny)                    | 106  |
| Podpuszczka odwodniona  | 44   | Słonecznik(całe rośliny)                   | 67   |
| Podpuszczka   | 18   | Sorgo (całe rośliny)                       | 80   |
| Zawartość separatora tłuszczu                                     | 15   | Sorgo sudańskie                            | 80   |
| Tłuszcze poflotacyjne   | 43   | Życica                                     | 79   |
| Szlamy poflotacyjne   | 81   | Burak cukrowy                              | 75   |
| Warzywa (odpady)  | 40   | Inne rośliny do wytwarzania biogazu        | 50   |
| Rośliny lecznicze i zioła (odpad produkcyjny)                     | 58   | Tereny z pielęgnacji kwitnących łąk        | 72   |
| Odpady z czyszczenia warzyw                                       | 26   | Sylfia przerośnięta (Silphium perfoliatum) | 67   |
| Wytłoki owoców i winogron   | 49   | Koniczyna(przy płodozmianie)               | 86   |
| Stary chleb   | 254  | Różne rośliny strączkowe                   | 79   |
| Odpady przemysłu piekarniczego                                    | 344  | Łubin                                      | 80   |
| Odpady z czyszczenia ziarna                                       | 254  | Lucerna mieszańcowa(uprawa polowa)         | 79   |
| Otręby  | 270  | Facelia                                    | 80   |
| Zboże niespełniające wymagań jakościowych dla zbóż konsumpcyjnych | 272  | Słoma                                      | 161  |
| Pył zbożowy   | 172  | Inne nie ww. rośliny energetyczne          | 50   |
| Wywar zbożowy za wyjątkiem gorzelnianego                          | 22   |  |  |

Źródło: [8]

Przedsiębiorca ma możliwość przeprowadzenia obliczeń uzysku biogazu i energii w  **Modelu biznesowym 1: Istniejące lub planowane biogazownie przyjmujące zmieszany strumień substratów.**

## 6. Opcje technologiczne dla fermentacji metanowej bioodpadów

Procesy fermentacji w instalacjach biogazowych można prowadzić na różne sposoby. Rysunek poniżej przedstawia dostępne opcje technologiczne.



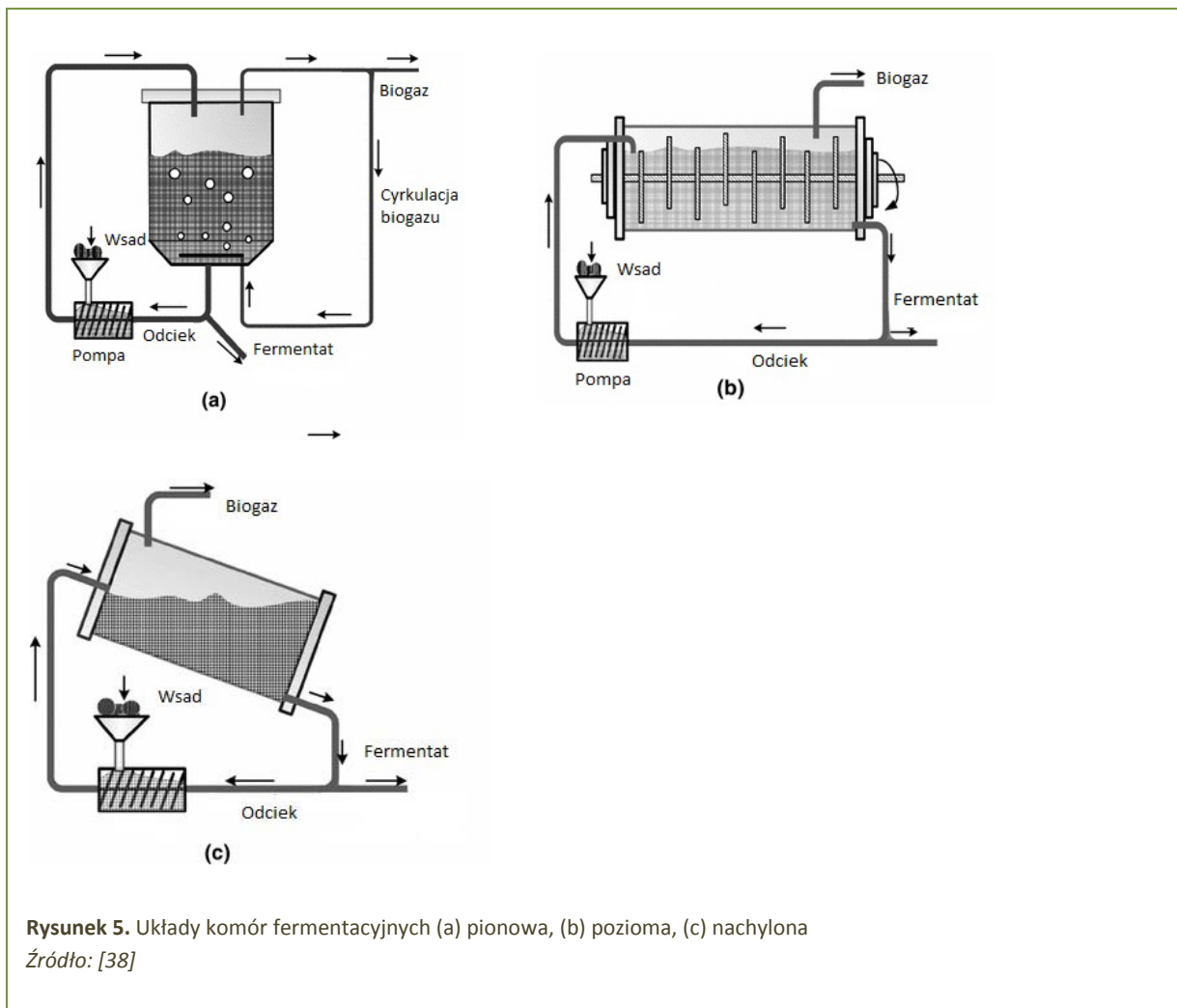
Rysunek 4. Główne opcje technologiczne dla instalacji biogazowych

Źródło: opracowanie własne

Procesy fermentacji mogą być prowadzone w komorach pionowych, poziomych lub nachylonych. Najbardziej powszechne są komory pionowe. W systemie poziomym materiał jest lepiej wymieszany, w porównaniu z komorą pionową, natomiast koszt takiego rozwiązania jest wyższy z powodu występowania elementów mechanicznych (wymuszone mieszanie) [38].

Poszczególne typy komór fermentacyjnych zostały scharakteryzowane przy okazji opisu dostępnych na rynku technologii przetwarzania bioodpadów – patrz **rozdział 8 Rozwiązania dostępne na rynku**.

Rozwiązania dostępne na rynku.



### 6.1. Fermentacja mokra a fermentacja sucha

W zależności od uwodnienia wsadu, a tym samym zawartości suchej masy (s.m.), proces fermentacji określany jest jako **mokry** (s.m. <15%), **suchy** (s.m. 30–40%) lub **pół-suchy** (s.m. około 20%). Ponieważ biodegradowalna frakcja odpadów komunalnych stanowi najczęściej substrat o zawartości suchej masy na poziomie 30%, fermentacja sucha jest najwłaściwszym procesem [61].

W warunkach niemieckich przyjęto podział technologii na: proces mokry 12-15% s.m., proces suchy ciągły 20-30% s.m. oraz proces suchy okresowy 30-40% s.m. [40].

W Europie funkcjonuje obecnie ok. 200 biogazowni, w których stosuje się odpady komunalne, z czego 60% działa w systemie fermentacji suchej. **W ciągu ostatnich 5 lat ponad 70% nowobudowanych biogazowni powstawało w systemie suchym**[38]. Należy przy tym zauważyć, że wcześniejsze instalacje były budowane zazwyczaj w systemie mokrym, przykładowo w Wielkiej Brytanii 94% systemów stanowią systemy fermentacji mokrej [87].

Główną zaletą **fermentacji suchej** jest zastosowanie obciążenia komory ładunkiem związków organicznych (OLR) na poziomie  $10 \text{ kg s.m.o. m}^3\text{d}^{-1}$  i wyższym. Przekłada się to na mniejsze



jednostkowe nakłady inwestycyjne, związane z mniejszymi wymiarami komory fermentacyjnej w porównaniu do systemów fermentacji mokrej. W przypadku fermentacji suchej wyprodukować można porównywalną ilość biogazu jak w systemie mokrym, przy 4-6 krotnie wyższym OLR, a więc odpowiednio mniejszych rozmiarach komory [38].

Wadą fermentacji suchej jest brak możliwości całkowitego wymieszania wsadu oraz brak możliwości zagwarantowania pełnego kontaktu bakterii z materiałem organicznym w całej masie wsadu. W konsekwencji poszczególne procesy zachodzą w różnych częściach komory, co ogranicza optymalną współpracę mikroorganizmów zaangażowanych w proces fermentacji metanowej. Ponadto w przypadku fermentacji suchej, występują często problemy z przepompowywaniem substratu. Systemy suche wymagają większej ilości inokulum<sup>1</sup>. W przypadku fermentacji suchej szczególną uwagę należy zwrócić na jakość pofermentu i możliwość jego dalszego wykorzystania [38] – patrz rozdział 12 **Zagospodarowanie masy pofermentacyjnej**.

Fermentacja mokra może być prowadzona w konwencjonalnych (stosowanych standardowo, np. w biogazowniach rolniczych) komorach fermentacyjnych, gdzie homogeniczność wsadu jest uzyskiwana poprzez mieszanie. Aby obniżyć zawartość suchej masy, konieczne jest jej rozcieńczenie poprzez dodawanie wody lub poprzez zawracanie (recyrkulację) części odcieków z powrotem do komory fermentacyjnej. Z problemem rozcieńczania można sobie także poradzić poprzez użycie odpowiedniej ilości dodatkowych substratów o dużym uwodnieniu. To ostatnie rozwiązanie jest atrakcyjną metodą łączenia kilku strumieni odpadów, takich jak np. bioodpady pochodzenia komunalnego z osadami ściekowym lub gnojowicą [32].

---

<sup>1</sup>skoncentrowana zawiesina bakterii niezbędna do zainicjowania procesu w świeżym wsadzie zadawanym do komory

**Tabela 7.** Zalety i wady systemów suchych i mokrych

|                   | Zalety  | Wady   |
|-------------------|---|--|
| Fermentacja sucha | <p>Niższe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, niskie zapotrzebowanie na energię procesową.</p> <p>Brak konieczności rozcieńczania, tj. mniejsze zużycie wody.</p> <p>Możliwość większego obciążenia komory ładunkiem zanieczyszczeń organicznych (5–12 kg s.m.o m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>).</p> <p>Ograniczone oddziaływanie inhibitorów z powodu ograniczonego mieszania.</p> <p>Niewielkie problemy eksploatacyjne (brak elementów ruchomych).</p> <p>Odwodniony materiał po fermentacji, mniejsze ilości pofermentu.</p> <p>Możliwość prowadzenia procesu w małych komorach fermentacyjnych.</p> | <p>Brak możliwości całkowitego wymieszania wsadu, występowanie stref o niższej produkcji biogazu.</p> <p>Duże ilości inokulum potrzebne do zaszczepienia wsadu i uzyskania wysokiej wydajności procesu produkcji biogazu.</p> <p>Wymagana instalacja zabezpieczająca przed wybuchem metanu gromadzącego się w komorze.</p>   |
| Fermentacja mokra | <p>Mieszadła zapewniają równomierną temperaturę w całej komorze i jednorodny oraz stabilny przebieg procesów biologicznych; zapobiegają opadaniu cząstek stałych, usuwają na bieżąco powstający biogaz.</p>   | <p>Wymagana duża pojemność komory fermentacyjnej.</p> <p>Niezbędne znaczne ilości wody do rozcieńczania.</p> <p>Niskie obciążenie komory ładunkiem organicznym (2–5 kg s.m.o m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>).</p> <p>Zwiększony negatywny wpływ inhibitorów z powodu mieszania.</p> <p>Wykorzystanie mieszadeł i innych elementów eksploatacyjnych zwiększa potencjalnie awaryjność systemu.</p> <p>Tworzenie się piany i kożucha.</p> <p>Większe ilości powstającej masy pofermentacyjnej; kosztowny proces odwadniania pofermentu</p> |

Źródło: opracowanie własne na podstawie [38]

Systemy suche charakteryzują się wydajnością produkcji biogazu na poziomie 90 m<sup>3</sup> Mg<sup>-1</sup> dla świeżych odpadów zielonych (ogrodowych) do 150 m<sup>3</sup> Mg<sup>-1</sup> dla świeżych odpadów kuchennych [25, 78]. Taki uzysk biogazu odpowiada uzyskowi metanu na poziomie 210-300 m<sup>3</sup> Mg<sup>-1</sup> s.m.o, przy 50-70% rozkładu masy organicznej [83; 67; 78].

Warto także przytoczyć uzyski biogazu w podziale na fermentację suchą i mokrą z uwzględnieniem dostępnych na rynku rozwiązań technologicznych [40]:

- Fermentacja mokra (komora pionowa): biogazodochodowość dla odpadów kuchennych 90-145 m<sup>3</sup> Mg<sup>-1</sup> przy zawartości 12-15% s.m., wymaga większej energii procesowej m.in. na mieszanie (technologia BTA),

- Fermentacja sucha (komora pozioma): biogazodochodowość dla odpadów kuchennych 100-130 m<sup>3</sup> Mg<sup>-1</sup> przy zawartości 20-30% s.m. (technologia KOMPOGAS, DRANCO).

Więcej o rozwiązaniach rynkowych w rozdziale **8 Rozwiązania dostępne na rynku**

## 6.2. Fermentacja mezofilowa a fermentacja termofilowa

Fermentacja metanowa w większości przypadków prowadzona jest jako proces **mezofilowy w temperaturze około 35 °C** (przedział to 20-45°C) [37; 20]. Proces **termofilowy 55 °C** (50–65 °C), prowadzony w wyższej temperaturze, jest mniej stabilny i częściej dochodzić może do załamania procesów biologiczno-chemicznych. Wymaga zatem większej kontroli, trzymania reżimu technologicznego i szybkiej reakcji w przypadku pojawienia się problemów. Rekompensatę stanowi większe tempo rozkładu substancji organicznej, co powoduje, że proces jest bardziej wydajny, z mniejszym czasem retencji (a tym samym wymaga mniejszej pojemności komór). Fermentacja termofilowa potrzebuje również krótszego czasu niezbędnego do rozruchu biogazowni [38]. W okresie ostatnich 20 lat powstało wiele instalacji w oparciu o fermentację termofilową [37; 20]. W badaniach wykazano, że dla fermentacji suchej odpadów komunalnych produkcja biogazu w warunkach termofilowych była dwukrotnie wyższa niż produkcja biogazu w warunkach mezofilowych [13].

**W Europie blisko 70% zastosowanych rozwiązań dla biodegradowalnych odpadów komunalnych opartych jest na fermentacji mezofilowej** [38,87] tj. w niższym zakresie temperatur. W 2010 r. całkowita moc przerobowa instalacji biogazowych działających w warunkach mezofilowych była na poziomie 4,100 mln Mg rok<sup>-1</sup>, podczas gdy łączna moc zainstalowana biogazowni pracujących w warunkach termofilowych wyniosła ok. 1 900 mln Mg rok<sup>-1</sup> [88]. Instalacje mezofilowe działają przede wszystkim jako systemy z fermentacją moką, natomiast instalacje termofilowe to głównie systemy z fermentacją suchą [88].

Warto tu zauważyć, że warunki mezofilowe nie pozwalają na pełną higienizację fermentowanego materiału. Natomiast wysoki stopień higienizacji fermentowanego wsadu zapewniają warunki termofilowe. W Danii wymaga się by odpady kuchenne były przetrzymywane w temperaturze powyżej 70°C przez jedną godzinę, jeśli poferment ma być wykorzystany jako nawóz organiczny dla upraw spożywczych. W Polsce, w przypadku wykorzystania do celów nawozowych produktu fermentacji (pofermentu), zaleca się, aby procesy fermentacji termofilowej prowadzić tak, by temperatura wynosiła min. 55°C w okresie min. 24 godzin, a całkowity czas trwania procesu fermentacji nie był krótszy niż 12 dni. W przypadku gdy utrzymywana jest niższa temperatura lub czas fermentacji jest krótszy, odpady surowe (przed fermentacją) albo odpady przefermentowane muszą przez min. 1 godzinę być poddane obróbce w temp. 70°C, bądź poferment musi zostać poddany kompostowaniu [74; 18].

Fermentacja prowadzona w warunkach termofilowych jest bardziej wrażliwa na zmianę warunków procesu, a regeneracja flory bakteryjnej jest znacznie dłuższa, zwłaszcza w systemach ciągłych, dlatego przy wyższej temperaturze stosuje się raczej systemy wsadowe a nie ciągłe [38].

**Tabela 8.** Zalety i wady systemów mezo- i termofilowych

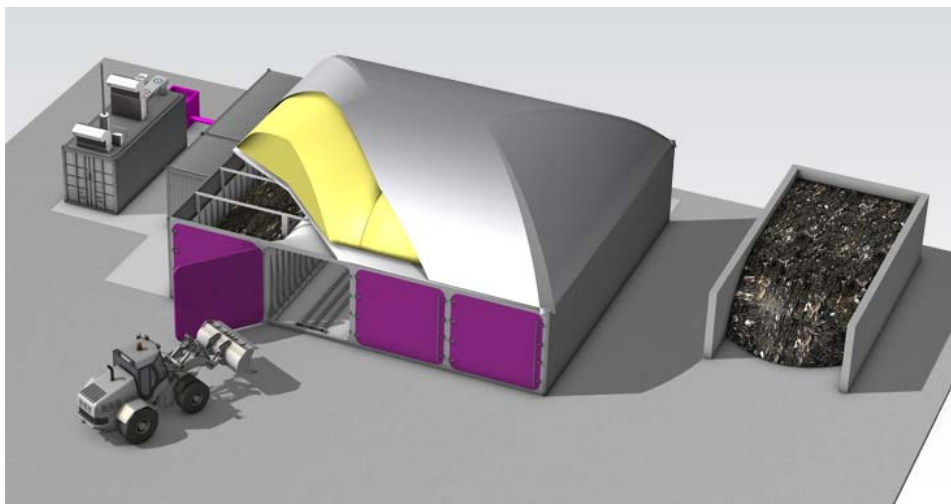
| Zalety                  |  | Wady   |
|-------------------------|--|--|
| Fermentacja mezofilowa  | Mniejsze zapotrzebowanie na energię do ogrzewania komory fermentacyjnej.<br><br>Proces bardziej stabilny niż fermentacja termofilowa.  | Wymagana większa objętość komory fermentacyjnej.<br><br>Brak pełnej higienizacji fermentowanego materiału.<br><br>Potrzeba dodatkowej obróbki termicznej (higienizacji) przed lub po procesie fermentacji. |
| Fermentacja termofilowa | Większe tempo rozkładu materii organicznej; proces jest bardziej wydajny, z krótszym hydraulicznym czasem retencji.<br><br>Mniejsza wymagana objętość komory fermentacyjnej.<br><br>Znaczna lub całkowita higienizacja fermentowanego materiału (w zależności od temp. i czasu fermentacji). | Proces mniej stabilny; łatwiej dochodzi do załamania procesów biologiczno-chemicznych.<br><br>Większe zapotrzebowanie na energię procesową.  |

Źródło: opracowanie własne

### 6.3. Fermentacja ciągła a fermentacja okresowa (wsadowa)

Technologia okresowa – wsadowa (zwana też garażową) polega na napełnieniu komory wsadem, zamknięciu jej, a następnie po ściśle wyliczonym czasie fermentacji (HRT) otworzeniu i usunięciu prefermentowanego materiału (pofermentu). W systemach ciągłych wsad wprowadzany jest w sposób ciągły do komory i jednocześnie odbierany jest w równoważnej ilości poferment.

**Systemy wsadowe** stosuje się jako systemy fermentacji suchej. Stosuje się kilka równolegle działających komór fermentacyjnych. Do głównych zalet należą niższe, w porównaniu do systemów ciągłych, koszty inwestycyjne warunkowane brakiem konieczności stosowania systemów rozdrabniania odpadów, złożonych mechanizmów mieszających i skomplikowanych konstrukcyjnie komór fermentacyjnych [78; 43].



**Rysunek 6.** Schemat instalacji z zastosowaniem fermentacji okresowej (system wsadowy)

Źródło: opracowanie własne

**Systemy ciągłe** są najbardziej rozpowszechnione, głównie dla instalacji bazujących na upłynnionych substratach, czyli w technologii fermentacji mokrej (<15% s.m.). Są powszechnie stosowane np. w biogazowniach bazujących na gnojowicy zwierzęcej lub na bioodpadach z przemysłu mleczarskiego lub poubojowego. Mniej powszechne są przy przetwarzaniu ulegających biodegradacji odpadów wyodrębnionych ze zmieszanych odpadów komunalnych. Systemy ciągłe wymagają mieszania, co poprawia wydajność procesu fermentacji poprzez zapewnienie jednorodnych warunków fermentacji w całej komorze oraz uwalnianie na bieżąco powstającego biogazu. Są one jednak bardziej awaryjne ze względu na elementy ruchome w komorze fermentacyjnej. Ponadto, jeśli dojdzie do załamania procesu fermentacji, jest go dużo trudniej odtworzyć niż w przypadku systemów wsadowych, gdzie zwykle ma to miejsce w jednej z kilku komór, a wsad może być łatwo usunięty lub wymieniony.

**Tabela 9.** Zalety i wady systemów wsadowych (okresowych)

| Zalety   | Wady  |
|--|---|
| Nieskomplikowane technologicznie rozwiązania.                          | Zatykanie się otworów w komorze.  |
| Odporne na działanie obecnych we wsadzie zanieczyszczeń mechanicznych. | Ryzyko eksplozji w czasie opróżniania komory.   |
| Proces fermentacji możliwy do prowadzenia równoległe w kilku komorach. | Niższy uzysk biogazu.   |
| Stosunkowo tanie rozwiązania.  | Duże zapotrzebowanie na teren pod kilka komór fermentacyjnych (porównywalne jak dla kompostowania). |
| Niskie zużycie wody.   | Wymagana duże ilości materiału zaszczipiającego (inokulum) kolejny cykl fermentacji                 |

Źródło: opracowanie własne na podstawie: [78]

Poniżej Tabela 10 zawiera zestawienie podstawowych parametrów dla systemów ciągłych i wsadowych w warunkach niemieckich, z uwzględnieniem podziału na proces fermentacji suchej i mokrej.



**Tabela 10.** Podstawowe parametry prowadzenia procesu w trybie ciągłym lub okresowym (wsadowym) z uwzględnieniem fermentacji suchej i mokrej

|   | Fermentacja ciągła |                   | Fermentacja okresowa        |
|---|--------------------|-------------------|-----------------------------|
|   | Fermentacja mokra  | Fermentacja sucha | Fermentacja sucha (wsadowa) |
| Zawartość suchej masy, %  | 12-15              | 20-30             | 30-40                       |
| Produktywność biogazu dla odpadów kuchennych, m <sup>3</sup> Mg <sup>-1</sup> | 90-145             | 100-130           | 80-120                      |
| Zapotrzebowanie na energię elektryczną, kWh Mg <sup>-1</sup>                  | 170-260            | 200-280           | 180-260                     |
| Zapotrzebowanie na ciepło, kWh Mg <sup>-1</sup>                               | 200-250            | 230-310           | 150-320                     |
| Koszty inwestycyjne, EUR Mg <sup>-1</sup>                                     | 250-490            | 250-480           | 180-310                     |
| Koszty eksploatacyjne, EUR Mg <sup>-1</sup>                                   | 21-40              | 18-38             | 15-30                       |

Źródło: [40]

#### 6.4. Fermentacja jednostopniowa a fermentacja z rozdziałem faz procesu

Technologie jednostopniowe polegają na prowadzeniu procesu fermentacyjnego w jednej komorze fermentacyjnej. Fermentacja jednostopniowa jest najbardziej powszechnym rozwiązaniem w odniesieniu do komercyjnych instalacji, głównie ze względu na niższe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne w porównaniu do metod z rozdzielaniem faz. **W stosowanych w Europie rozwiązaniach ponad 90% to instalacje oparte na fermentacji jednostopniowej** [17], chociaż w Wielkiej Brytanii 30% instalacji wykorzystuje fermentację dwustopniową [87].

Popularność **procesów jednostopniowych** związana jest także z faktem powszechności stosowania w miarę jednorodnego wsadu [10]. Wraz ze zwiększeniem jego różnorodności pojawia się konieczność zwiększenia stopnia homogenizacji wsadu i intensywności mieszania, co doprowadzić może do zwiększenia kosztów operacyjnych. W fermentacji jednostopniowej czas retencji jest uśredniony, a substraty o wyższej zawartości substancji organicznej pozostają częściowo nieprzefermentowane. Powyższe wiąże się ze stratami w uzysku biogazu. Rozwiązaniem dla układów o wsadzie heterogenicznym może być **fermentacja z rozdziałem faz procesu**. Chodzi o optymalizację warunków pracy bakterii hydrolizujących i bakterii metanogennych, tak by poprawić całkowity stopień rozkładu substancji organicznej.

W warunkach fermentacji suchej, proces dwuetapowy pozwala na znaczące skrócenie hydraulicznego czasu retencji oraz wyższe obciążenie komory związkami organicznymi w porównaniu do konwencjonalnego jednoetapowego reaktora o wysokim obciążeniu komory ładunkiem zanieczyszczeń organicznych [28]. Fermentacja z rozdziałem faz jest również uważana za proces bardziej stabilny [10].

W badaniach wykazano, że zasadne może być poddanie materii organicznej obróbce w reaktorze hydrolizy jako drugi etap po fermentacji, co umożliwi hydrolizę opornych cząstek materii organicznej, które nie zostały rozłożone [33]. Po czasie retencji 1-2 dni mogą być razem z odciekami zawracane z powrotem do głównej komory fermentacyjnej, w której zachodzi metanogeneza. Proces ten umożliwi lepszą higienizację odpadów i zawracanie wody procesowej. Higienizacja prowadzona po procesie fermentacji była stosowana w 62% instalacji w Wielkiej Brytanii [87].

Podsumowując, fermentacja z rozdziałem faz (oddzielna komora do hydrolizy) jest zalecana tylko dla bioodpadów o dużym udziale trudno rozkładalnej materii organicznej. Wydzielenie dwóch komór jest uzasadnione jeśli obie fazy – hydrolizy i metanogenezy – mogą być właściwie rozdzielone.

Należy zaznaczyć, że realizacja procesu dwustopniowego wymaga wyższych nakładów inwestycyjnych oraz eksploatacyjnych. Skrócenie czasu fermentacji może być niewystarczającym argumentem za jej stosowaniem. Warto ją rozważyć, gdy mamy do czynienia z trudno biodegradowalnym wsadem.

**Tabela 11.** Zalety i wady systemów jednostopniowych i z rozdziałem faz

| Zalety                       |   | Wady  |
|------------------------------|---|---|
| Systemy jednostopniowe       | Odpowiednie dla wsadu o jednorodnym charakterze<br>Niższe koszty inwestycyjne i eksploatacyjne.   | W przypadku wsadu o niejednorodnym charakterze, część wsadu pozostaje nieprzefermentowana; wiąże się to ze stratami w uzysku biogazu. |
| Fermentacja z rozdziałem faz | Odpowiednie rozwiązanie dla przetwarzania bioodpadów o dużym udziale trudno rozkładalnej materii organicznej.<br><br>Skrócenie hydraulicznego czasu retencji oraz możliwość wyższego obciążenia komory związkami organicznymi w porównaniu do procesu jednoetapowego. | Systemy złożone.<br><br>Wyższe nakłady inwestycyjne oraz eksploatacyjne.  |

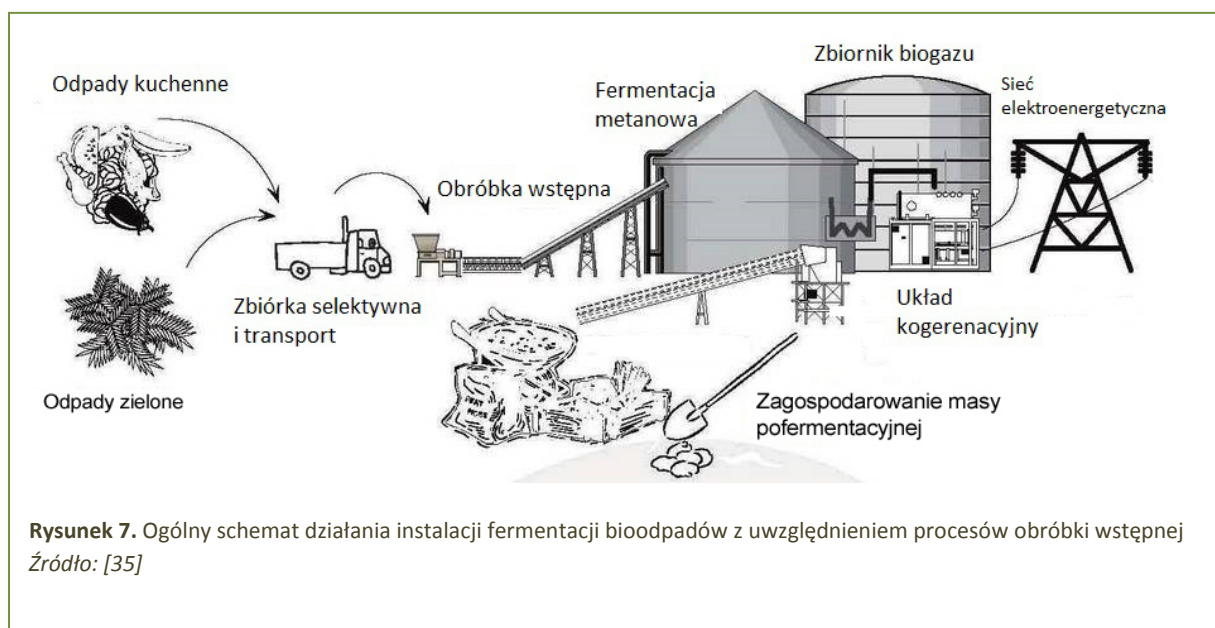
Źródło: opracowanie własne

## 7. Technologie wstępnej obróbki bioodpadów

Przesłanką dla zastosowania procesów obróbki wstępnej jest dążenie do poprawy wydajności instalacji biogazowej, co przekłada się na korzyści ekonomiczne. Obróbka wstępna wpływa na efektywność fermentacji metanowej, a tym samym na uzysk biogazu.

Poniżej omówiono typowe procesy obróbki wstępnej dla bioodpadów segregowanych u źródła - przede wszystkim dla odpadów spożywczych i kuchennych z gospodarstw domowych i gastronomii, ale także domieszki odpadów zielonych.

Schemat poniżej (Rysunek 6) wskazuje na miejsce obróbki wstępnej w ciągu technologicznym instalacji fermentacji.



**Rysunek 7.** Ogólny schemat działania instalacji fermentacji bioodpadów z uwzględnieniem procesów obróbki wstępnej  
Źródło: [35]

Segregowane u źródła bioodpady z gospodarstw domowych i z gastronomii prawie zawsze zawierają pewną ilość materiałów niepożądanych, takich jak tworzywa sztuczne, metale, szkło, papier, kamienie. Wagowo udział innych frakcji (nieulegających biodegradacji) waha się w zakresie 1-5% [29]. Zauważono, że ilość ta w odpadach kuchennych selektywnie zbieranych zależy w dużym stopniu od typu terenu z jakiego pochodzą. Przykładowo na terenach wiejskich zanieczyszczenie innymi frakcjami jest mniejsze i wynosi do 1%, natomiast na terenach w centrach miast nawet do 10% [40].

Procesy obróbki wstępnej mają zasadniczo na celu usunięcie niepożądanych frakcji z bioodpadów oraz zwiększenie stopnia ich podatności na biodegradację przed skierowaniem do dalszych procesów technologicznych. Dopiero po ich usunięciu materiał jest poddawany homogenizacji i przechodzi do etapu fermentacji.

Główne rezultaty obróbki wstępnej to:

- (i) rozdrobnienie,
- (ii) rozpuszczenie,
- (iii) zwiększenie podatności na biodegradację.

Inne efekty obróbki wstępnej to:

- (i) zmniejszenie ryzyka pienia się wsadu w komorze fermentacyjnej,
- (ii) higienizacja materiału,
- (iii) zmniejszenie emisji nieprzyjemnych zapachów

Choć odpady kuchenne z gospodarstw domowych stanowią substrat charakteryzujący się wysoką jednostkową produkcją biogazu, to także i w tym przypadku efektywność procesu fermentacji w znacznym stopniu zależy od poprzedzających fermentację procesów wstępnego przetwarzania. Najczęściej stosowane metody obróbki wstępnej to obróbka mechaniczna, termiczna i chemiczna [12]. Prowadzone są także badania nad zastosowaniem mikrofal, zamrażania/odtawiania, impulsów pola elektrycznego oraz mokrego natleniania [12]. Wszystkie te procesy prowadzą zasadniczo do wzrostu podatności na biodegradację materiału, czyli podatności na rozkład poprzez mikroorganizmy.

Modyfikacja wsadu w wyniku obróbki wstępnej oddziałuje na proces fermentacji poprzez wpływ na tempo i stopień rozkładu materii organicznej, które są bezpośrednio skorelowane z uzyskiem metanu. Tempo rozkładu materii zwiększa się poprzez rozpuszczanie lub zmniejszenie wielkości cząstek materii organicznej, która w przeciwnym razie podlegałaby bardzo wolno pierwszemu etapowi procesu rozkładu, tj. hydrolizie. Obróbka wstępna powoduje ekspozycję powierzchni materiału organicznego na działanie mikroorganizmów, tym samym zwiększając jego podatność na biodegradację [12].

Procesy obróbki wstępnej, poza zwiększeniem uzysku metanu, a tym samym wydajności instalacji, mają także wpływ na produkt fermentacji, czyli poferment. Rozdrobnienie cząstek wsadu pogorsza np. możliwość odwadniania pozostałości pofermentacyjnej [12].

Możliwe jest łączenie kilku metod obróbki w jednej instalacji. Najczęściej obróbka mechaniczna poprzedza inne metody. Dobre efekty uzyskuje się dla obróbki mechaniczno-termicznej. Tabela 12 zawiera krótkie podsumowanie różnych typów obróbki wstępnej. Warto zauważyć, że procesy te w większości przypadków są dość kosztowne, zatem ich wybór musi być uzasadniony odpowiednio wyższą wydajnością procesów biogazowych.

**Tabela 12.** Ogólna charakterystyka procesów obróbki wstępnej

|                | Mechaniczna   | Termiczna  | Chemiczna  | Obróbka biologiczna                                       |
|----------------|---|--|--|---|
| Istota procesu | Przesiewanie, siekanie, mielenie, maceracja, ekstruzja. | Poddawanie działaniu temperatury lub mikrofal.     | Dodawanie substancji chemicznych (zasady i kwasy). | Mieszanie z inokulum, dodatek enzymów.                    |
| Efekt          | Usuwanie zanieczyszczeń, rozdrobnienie i homogenizacja. | Rozpuszczanie związków organicznych; higienizacja. | Rozpuszczanie związków organicznych.               | Zaszczepienie wsadu, rozpuszczanie związków organicznych. |

## 7.1. Obróbka mechaniczna

Usuwanie innych frakcji takich jak tworzywa sztuczne, szkło, metale, drewno i inne elementy niepożądane jest zaliczane do procesów wstępnych obróbki mechanicznej. Po tym etapie następuje właściwa obróbka mechaniczna.

W przypadku bioodpadów pochodzenia komunalnego mamy do czynienia z relatywnie dużą wielkością cząstek. Obróbka mechaniczna ma na celu zmniejszenie rozmiarów cząstek wsadu kierowanego do komory fermentacyjnej oraz ich homogenizację. Dlatego często stosuje się obróbkę mechaniczną w warunkach wysokiego ciśnienia, odwirowywanie, macerację i ekstruzję[12].

**Rozdrabnianie** zachodzi przy zastosowaniu obróbki mechanicznej, podczas gdy rozpuszczanie jest wynikiem zastosowania pozostałych metod.

**Maceracja** to proces mielenia lub mieszania polegający na rozdrobnieniu odpadów stałych do zawiesiny, którą daje się pompować; służy także zmniejszeniu objętości masy odpadów. Podobny efekt uzyskuje się dzięki **ekstruzji**, przy czym dodatkowo umożliwia ona separację frakcji miękkiej (ulegającej biodegradacji) od innych elementów zawartych w masie bioodpadów. Jest to proces przetwarzania masy odpadów przez ekstruder (komora z perforowanymi ścianami) pod wysokim ciśnieniem. Przez otwory przechodzi miękka frakcja kierowana następnie do fermentacji, pozostałość to tzw. frakcja sucha stanowiąca balast zawierający tworzywa sztuczne, itp.

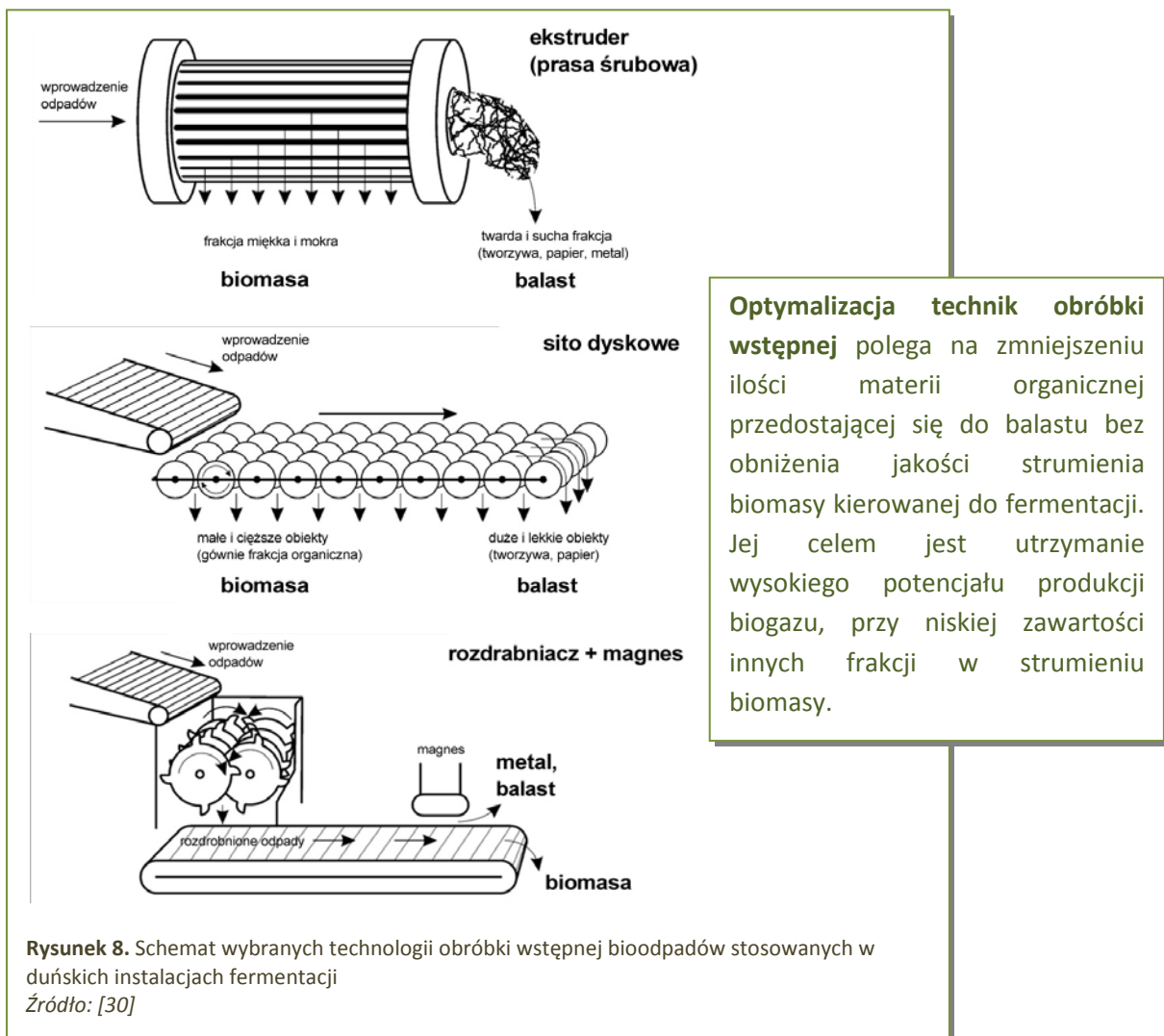
W Danii w instalacjach fermentacji działających w oparciu o sortowane u źródła bioodpady (głównie odpady kuchenne) powszechnie stosowane są następujące systemy mechanicznej obróbki wstępnej mające na celu separację materii organicznej od frakcji, które nie ulegają biodegradacji [30]:

- prasa śrubowa – działa w oparciu o proces ekstruzji; jest to metalowa komora, w której odpady są przeciskane przez wąskie otwory powodując przejście „miękkiej” frakcji, podczas gdy frakcja „sucha” tj. tworzywa sztuczne, kawałki drewna, kości zwierząt i metale są oddzielane od strumienia odpadów kierowanych do fermentacji,
- sito dyskowe – stosowane jest do przesiewania masy bioodpadów poprzez ich przemieszczanie i przetrząsanie możliwe dzięki specjalnemu kształtowi dysków zamocowanych na obracających się wałach; pozwala na odseparowanie lekkich i dużych frakcji (głównie tworzywa sztuczne i papier), od mniejszych i cięższych frakcji (głównie materia organiczna łatwo rozkładalna),
- rozdrabniacz z separatorem magnetycznym – pozwala na zmniejszenie wielkości frakcji w masie odpadów oraz usunięcie metali.

Bioodpady zbierane w gospodarstwach domowych w worki z tworzyw sztucznych, papieru lub kukurydzy. Po dostarczeniu do biogazowni worki przechodzą przez tzw. rozrywacz worków w postaci wolno obracających się spirali. W ten sposób worki są rozcinane, a odpady mieszane. W przypadku zastosowania rozdrabniacza z separatorem magnetycznym odpady nie powinny zawierać frakcji takich jak tworzywa sztuczne, bo nie jest możliwe ich odseparowanie od wsadu kierowanego do



fermentacji. W przypadku zastosowania ekstrudera odpady powinny pochodzić z rejonu, gdzie system sortowania u źródła pozwala na zebranie odpowiednio bioodpadów nie zawierających zanieczyszczeń.

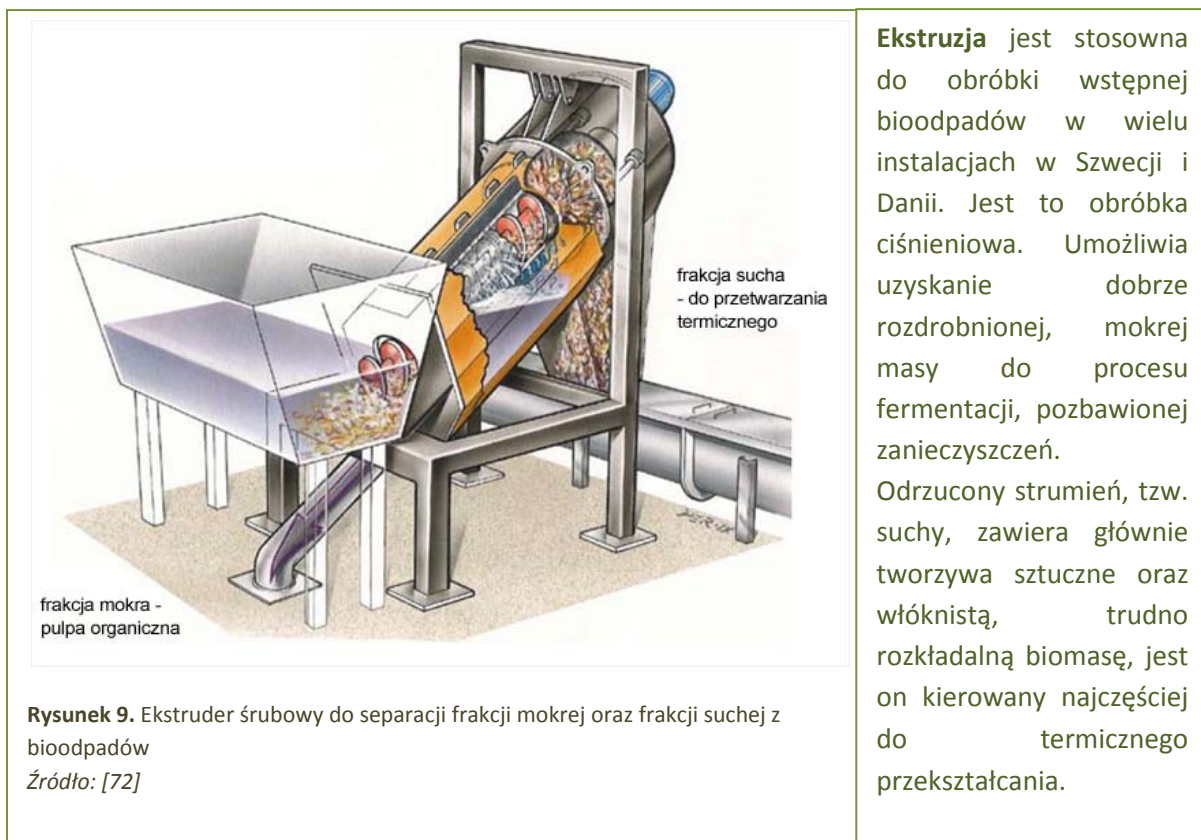


Po przejściu przez obróbkę wstępną powstają dwa strumienie: strumień biomasy kierowany do komory fermentacyjnej oraz strumień odpadów balastowych, w którym pozostają tworzywa sztuczne i inne materiały niepożądane, ale także część materii organicznej. Ten ostatni kierowany jest najczęściej do przekształcania termicznego.

Prasa śrubowa pozwala na uzyskanie najlepszego efektu segregacji strumienia odpadów, w przeciwieństwie do rozdrabniacza z separatorem magnetycznym, dla którego efekt segregacji jest ograniczony jedynie do wyodrębnienia zanieczyszczeń metalowych.

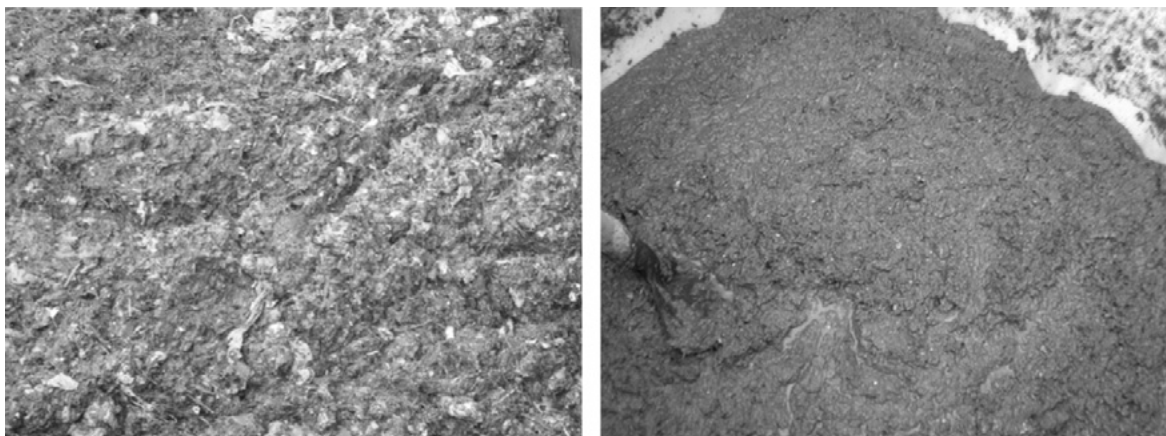
System obróbki ma wpływ na wielkość cząstek wsadu. W przypadku ekstruzji z zastosowaniem prasy śrubowej możliwy jest bardzo wysoki stopień rozdrobnienia. Otrzymuje się moką i łatwo ulegającą rozkładowi masę kierowaną do fermentacji [30]. Przy zastosowaniu rozdrabniacza i separatora magnetycznego otrzymuje się głównie relatywnie duże cząstki materii organicznej i papieru (>16 mm).

Istotnym zagadnieniem jest rodzaj worków, w które zbierane są bioodpady w gospodarstwach domowych. Po przejściu przez systemy obróbki wstępnej fragmenty worków trafiają razem z masą organiczną do fermentacji. W przypadku sita dyskowego dla odpadów zbieranych w tworzywowe i papierowe worki, widoczne były różnej wielkości kawałki folii lub papieru wymieszane z materiałem wsadowym. W przypadku worków z tworzyw sztucznych pozostają one nieprzefermentowane w masie opuszczającej komorę fermentacyjną. Stanowi to ograniczenie dla możliwości dalszego wykorzystania pofermentu do celów nawozowych.



W Szwecji w zakładach, w których prowadzona jest wstępna obróbka segregowanych u źródła odpadów spożywczych i kuchennych z gospodarstw domowych i gastronomii powszechnie stosowanym systemem obróbki wstępnej jest ekstruzja, rzadziej technika dyspersji [1]. Poniżej (Rysunek 8) przedstawiono schemat ekstrudera ze szwedzkiego zakładu SYSAV, w którym z odpadów kuchennych i przeterminowanej żywności wytwarza się pulpę organiczną, następnie przewożoną do biogazowni jako gotowy wsad.

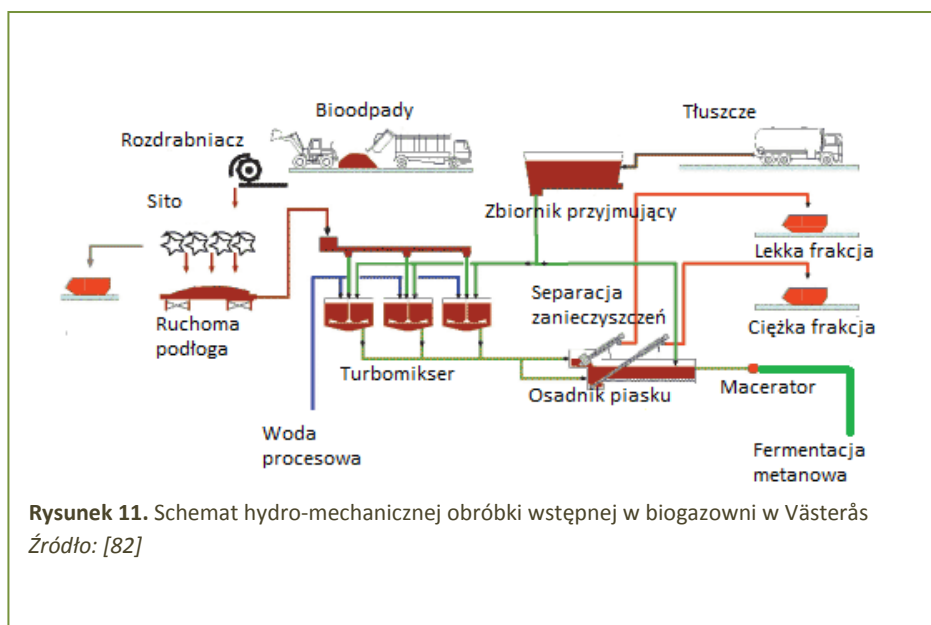
W procesie ekstruzji standardowo stosuje się prasy z otworami 13-16 mm (w zależności od potrzeb i pożądanej charakterystyki materiału po obróbce). Dla mniejszych otworów o średnicy 8 mm otrzymano frakcję organiczną po procesie ekstruzji o konsystencji błota (85% masy), oraz pozostałą część „suchą” (15% masy). Zastosowanie procesu ekstruzji pozwala na zwiększenie uzysku biogazu do poziomu  $800\text{dm}^3 \text{ kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$ , ale przede wszystkim ułatwia zagospodarowanie pofermentu w celach nawozowych[60].



**Rysunek 10.** Frakcja organiczna otrzymana po ekstruzji przez sito o oczkach 16 mm (po lewej) i 8 mm (po prawej)  
*Źródło: [60]*

W wielu instalacjach biogazowych stosuje się **obróbkę hydro-mechaniczną**. Istotą tej metody jest upłynnienie odpadów, a następnie usuwanie niepożądanych frakcji na zasadzie zjawiska sedimentacji (opadania na dno) lub flotacji (zdolność do unoszenia się na powierzchni). W wyniku obróbki hydro-mechanicznej otrzymuje się trzy strumienie odpadów: (i) upłynnioną organiczną zawiesinę, (ii) lekkie elementy, takie jak tworzywa sztuczne, folie, drewno, tekstylia, itp., (iii) ciężkie elementy, takie jak szkło, kości, baterie, itp.

Hydro-mechaniczna obróbka wstępna stosowana jest na przykład w szwedzkiej biogazowni w Västerås przetwarzającej selektywnie zbierane bioodpady z gospodarstw domowych. Dostarczony materiał jest upłynniany cieczą procesową i mieszany w turbomikserach do postaci pulpy (10% zawartości suchej masy). Na tym etapie usuwane są frakcje takie jak szkło, kamienie, kości. Następnie pulpa hydraulicznie przechodzi przez układ grabi zgarniających pływające na powierzchni kawałki tworzyw sztucznych, drewna i innych lekkich materiałów. Stosowany jest także separator piasku. Kolejnym etapem jest przejście zawiesiny przez układ maceracji, który rozdrabnia masę do wielkości cząstek nie większej niż 12 mm. Tak przygotowany wsad kierowany jest do zbiorników higienizacyjnych (higienizacja w temp. 70°C przez godzinę), a następnie do komory fermentacyjnej.



## 7.2. Obróbka chemiczna

Odczyn pH ma wpływ na prawidłowy przebieg procesu fermentacji metanowej. Niskie pH jest wynikiem tworzenia się kwasów tłuszczowych w pierwszych fazach fermentacji. Dlatego na etapie obróbki wstępnej można podwyższyć pH wsadu (do odczynu zasadowego) wzbogacając go wapnem gaszonym  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ , które również przyczynia się do szybszego rozkładu substratów i prowadzi do zwiększonej produkcji biogazu. Można również stosować zasadę sodową ( $\text{NaOH}$ ). W celu uniknięcia zakwaszenia wsadu można go również napowietrzać przed poddaniem do komory fermentacji, co jednak może skutkować nieznacznym zmniejszeniem poziomu produkcji biogazu. Dodawanie substancji zwiększających zasadowość przyczynia się również do skrócenia czasu rozruchu instalacji[20, 38].

**Obróbka chemiczna** polega na zastosowaniu reagentów chemicznych (zasad lub kwasów). Węglowodany i tłuszcze przechodzą w formy łatwo rozkładalne, a białka tracą ochronną strukturę enzymatyczną. Materia organiczna staje się łatwiej dostępna dla mikroorganizmów, co powoduje intensyfikację oraz przyspieszenie zachodzących procesów w kolejnych fazach fermentacji beztlenowej. Obróbka chemiczna służy regulacji pH, co jest szczególnie istotne w przypadku odpadów kuchennych, które często charakteryzują się niskim pH.

## 7.3. Obróbka ciśnieniowo-termiczna

Termiczna obróbka została wcześniej rozpoznana jako metoda o wysokim potencjale poprawy efektywności fermentacji i jest obecnie stosowana w skali przemysłowej w biogazowniach w wielu krajach [12]. Substraty są poddane działaniu temperatury do  $100^\circ\text{C}$  (obróbka niskotemperaturowa) lub wyższej  $>100^\circ\text{C}$  (obróbka wysokotemperaturowa) oraz wysokiemu ciśnieniu. Obróbka



wysokotemperaturowa jest często stosowana z wykorzystaniem strumienia pary. Ma zastosowanie do bardzo wielu różnych rodzajów substratów, także bioodpadów z gospodarstw domowych.

Metody obróbki termicznej mają szczególną zaletę w związku z możliwością wykorzystania ciepła powstającego w układach kogeneracyjnych w biogazowni. W wielu przypadkach energia elektryczna wytwarzana z biogazu jest priorytetowym produktem, a ciepło traktowane jest jako produkt uboczny i nie zawsze istnieje techniczna możliwość jego sprzedaży.

Badano wpływ wstępnej obróbki cieplnej na fizykochemiczne właściwości odpadów kuchennych i pozostałości warzyw/owoców [53]. Uzyskane wyniki pokazują, że wstępna obróbka cieplna w temperaturze 175°C w czasie 60 min. znacznie zmniejsza lepkość, poprawia wydajność odwadniania bioodpadów, zwiększa chemiczne zapotrzebowanie na tlen, zawartość rozpuszczalnych cukrów, białek, a zwłaszcza związków organicznych o dużej masie cząsteczkowej. Dla odpadów kuchennych i pozostałości warzyw i owoców odpowiednio 59,7% oraz 58,5% związków organicznych ulega rozkładowi na związki prostsze. Obróbka ciśnieniowo-termiczna zwiększa zatem uzysk biogazu.

#### 7.4. Obróbka mikrofalami

Wykorzystanie mikrofal jest metodą obróbki termicznej [38], stosowaną obecnie przede wszystkim w biogazowniach działających w oparciu o osady ściekowe z oczyszczalni ścieków. Prowadzone są badania nad wpływem zastosowania mikrofal do obróbki wstępnej bioodpadów pochodzenia komunalnego.

**Zastosowanie mikrofal** jest metodą obróbki termicznej. W tej metodzie stosuje się wysokie temperatury rzędu 140-175°C. Zapewnia to pełną higienizację wsadu.

W badaniach poddawano wsad od fermentacji działaniu mikrofal osiągając temperaturę 115, 145 i 175°C [71]. Dzięki zastosowaniu obróbki w temp. 115 i 145°C otrzymano podwyższony uzysk biogazu o 4-7% dla osadu ściekowego. Natomiast dla temp. 175°C uzysk biogazu obniżył się.

W innych badaniach nad wpływem mikrofal na uzysk metanu z osadów ściekowych ustalono, że obróbka wstępna z zastosowaniem mikrofal była skuteczniejsza niż niskotemperaturowa obróbka termiczna (30-100°C), oceniane było zwiększenie stopnia rozpuszczalności związków organicznych i uzysku biogazu. Dla kamory fermentacyjnej pracującej w trybie ciągłym, dzięki zastosowaniu mikrofalówki o mocy 900 W i temp. 60-70°C uzyskano o 35% więcej metanu niż przy braku obróbki wstępnej tą metodą. Ponadto, zastosowanie

**Obróbka ciśnieniowo-termiczna** polega na poddaniu substratów działaniu temperatury do 100°C lub wyższym zakresie >100°C oraz wysokiemu ciśnieniu. Ciepło jest przeważnie zadawane w formie pary. Ma to na celu przyspieszenie tempa hydrolizy i wydajności produkcji metanu. Obróbka ciśnieniowo-termiczna służy także higienizacji wsadu, co ma znaczenie dla możliwości wykorzystania pofermentu do celów nawozowych



mikrofal pozwala na zwiększenie stopnia higienizacji osadów ściekowych, co ma szczególne znaczenie dla możliwości zastosowania pofermentu [46].

### 7.5. Mikro-natlenianie

Do innych rodzajów obróbki wstępnej (chemicznej) należy m.in. **mikro-natlenianie**, czyli dodawanie bardzo niewielkich ilości tlenu przed zadaniem odpadów do komory fermentacji, co pozwala by w jednej komorze fermentacyjnej zachodziły zarówno procesy tlenowe jak i beztlenowe. Natlenianie jest procesem przede wszystkim w fazie badań. Badano wpływ dodatku tlenu na odpady kuchenne i spożywcze [51]. Tlen został w pełni skonsumowany przez fakultatywne mikroorganizmy (bakterie, które mogą żyć zarówno w warunkach tlenowych, jak i beztlenowych), a środowisko redukcyjne dla rozkładu substancji organicznych zostało utrzymane. Obróbka wstępna tlenowa doprowadziła do podwyższonego jednostkowego ładunku organicznego wyrażonego jako ChZT, większej akumulacji lotnych kwasów tłuszczowych i konwersji innych krótko-łańcuchowych kwasów tłuszczowych do octanu. Może to wynikać z wzmocnionego działania bakterii hydrolitycznych i kwasowych oraz przyspieszenia degradacji wolno biodegradowalnych związków. Wzrost wydajności produkcji biogazu ustalono na poziomie 10-210%, w zależności od tego czy substrat był zaszczepiony inokulum.

### 7.6. Obróbka biologiczna

Obróbka biologiczna ulegających biodegradacji odpadów polega na zaszczepieniu wsadu kierowanego do komory fermentacyjnej przy użyciu inokulum [88]. Inokulum zawiera różne mikroorganizmy zawarte w przefermentowanym już materiale; jest niezwykle istotne dla zainicjowania i powodzenia procesu rozkładu materii organicznej. Dlatego ważna jest jakość, a także ilość inokulum. Ilość określa się najczęściej procentowo w stosunku do zawartości suchej masy organicznej wsadu.

Rolę **inokulum** pełni często przefermentowany **materiał z komory fermentacyjnej, osady ściekowe** lub **świeża gnojowica zwierzęca**. Zaszczepienie wsadu pozwala znacznie skrócić rozruch instalacji, tj. czas rozpoczęcia działania komory fermentacyjnej. W przypadku procesów ciągłych, nowa partia wsadu jest zaszczepiana poprzez przefermentowany materiał lub perkolat (odciek z fermentacji).

Badano wpływ sześciu różnych rodzajów inokulum na fermentację selektywnie zbieranych bioodpadów pochodzenia komunalnego [23]. Badania prowadzone były w warunkach termofilowych dla dodatku inokulum na poziomie 25% stosunku wagowego oraz zawartości suchej masy wsadu na poziomie 30%. Osady ściekowe okazały się najlepszym inokulum, co pozwoliło na 43% redukcję s.m.o. we wsadzie oraz dało uzyskać  $530 \text{ dm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$  po 60 dniach. W innych badaniach [24] ustalono, że dla efektywnego rozkładu materii organicznej i uzysku biogazu, dodatek inokulum do selektywnie zbieranych bioodpadów pochodzenia komunalnego powinien być na poziomie 30% stosunku wagowego a zawartość suchej masy wsadu – na poziomie 20%.

Do obróbki biologicznej wsadu mogą być także stosowane enzymy, takie jak np. celulazy i hemicelulazy. Najczęściej są one stosowane w badaniach laboratoryjnych i demonstracyjnych do obróbki substratów o dużym udziale lignocelulozy, np. słoma pszeniczna, kolby kukurydzy, mискant, itp. Enzymy umożliwiają przede wszystkim rozkład celulozy do cukrów prostych w fazie kwaśnej. Jednocześnie **zastosowanie enzymów jest bardzo kosztowne** i nie zostało uznane za uzasadnione zwłaszcza w odniesieniu do obróbki dużych ilości stałych odpadów biodegradowalnych [38].

## 8. Rozwiązania dostępne na rynku

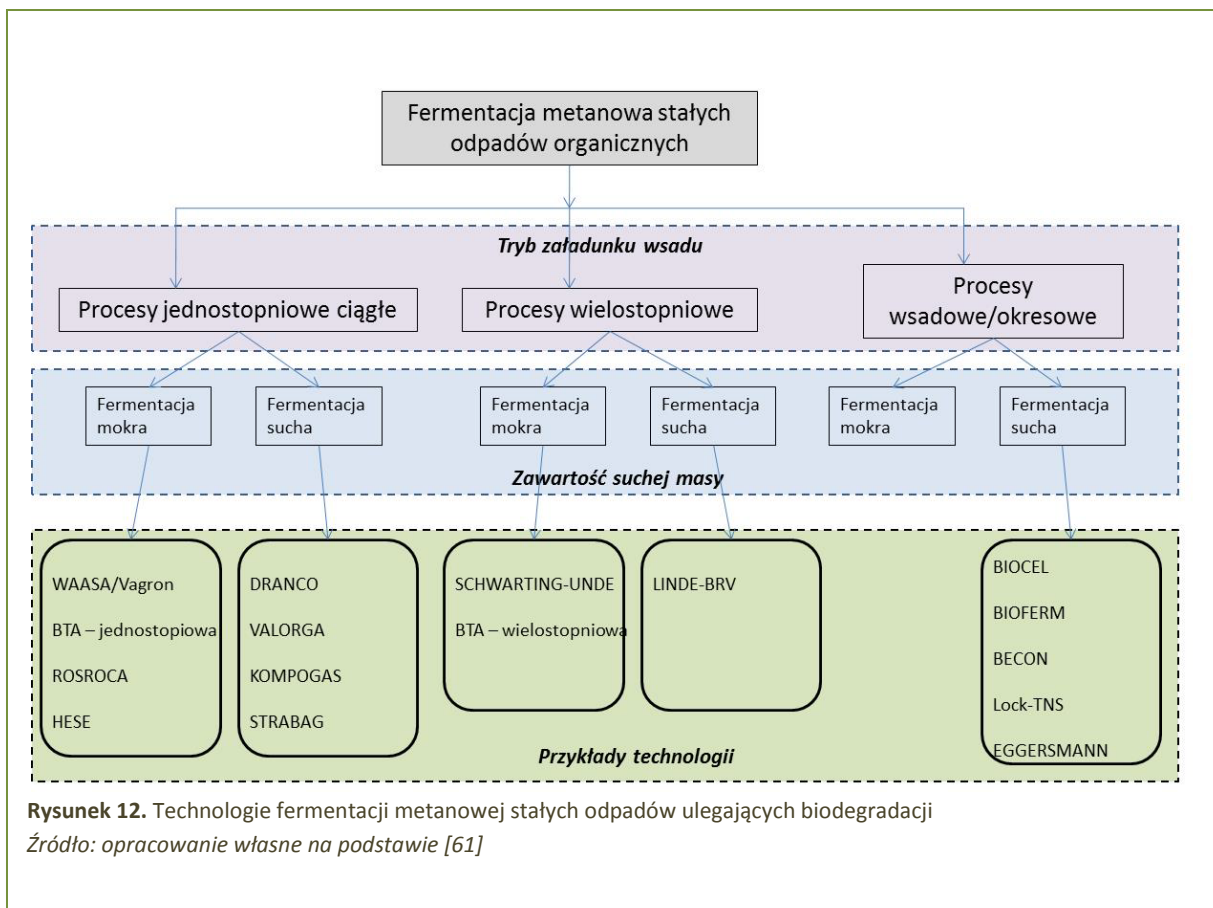
Technologie fermentacji metanowej zyskały status sprawdzonych rozwiązań do przetwarzania zarówno selektywnie zbieranych bioodpadów jak i frakcji bioodpadów wyodrębnionych wtórnie ze strumienia zmieszanych odpadów komunalnych. Najwięcej instalacji komercyjnych zostało zrealizowanych w technologiach:

- DRANCO,
- KOMPOGAS,
- VALORGA,
- BTA,
- Linde BRV/KCA,
- BIOCEL.

Systemy DRANCO, KOMPOGAS (termofilowe), VALORGA (mezofilowe) są popularne przede wszystkim w Europie. W innych częściach świata znajdują zastosowanie technologie: Linde (fermentacja sucha, dwustopniowa) oraz BIOCEL (fermentacja sucha wsadowa) [38]. Oprócz wyżej wymienionych oferowanych jest szereg innych technologii komercyjnie dostępnych, jak np.: RosRocca, Strabag, BioFerm, Bekon, Lock-TNS, Eggersmann, itp.

**W niniejszym opracowaniu przedstawiono tylko wybrane rozwiązania odzwierciedlające różne opcje technologiczne i warunki procesu fermentacji.**

Rozwiązania komercyjne dostępne na rynku można pogrupować przede wszystkim ze względu na tryb załadunku substratu i zawartość suchej masy we wsadzie do fermentacji.



Większość działających na świecie instalacji zrealizowano w technologiach fermentacji suchej. Najwięcej instalacji działa w oparciu o technologię KOMPOGAS, VALORGA i DRANCO. Wśród technologii mokrych dominuje BTA. Zestawienie ilości zrealizowanych instalacji, ich przepustowości oraz głównych charakterystyk przedstawiono poniżej (Tabela 13).

Tabela 14 zawiera podstawowe parametry trzech najbardziej rozpowszechnionych technologii fermentacji suchej bioodpadów. Warto zauważyć, że technologia KOMPOGAS wyróżnia się dużo niższym ładunkiem frakcji organicznej niż dwie pozostałe, natomiast uzysk metanu jest znacząco wyższy. Koszty operacyjne ustalono na zbliżonym poziomie dla trzech omawianych technologii.

**Tabela 13.** Zestawienie rynkowych technologii fermentacji metanowej odpadów komunalnych ulegających biodegradacji\*

| Technologia     | Ilość instalacji | Wielkość Mg rok <sup>-1</sup> | Jednostopniowa | Z rozdziałem faz (wielostopniowa) | Mokra <20% s.m. | Sucha >20% s.m. | Mezofilowa | Termofilowa |
|-----------------|------------------|-------------------------------|----------------|-----------------------------------|-----------------|-----------------|------------|-------------|
| BTA             | 45**             | 1.000 - 150.000               | x              | x                                 | x               |                 | x          | x           |
| BIOCELL         | 1                | 35.000                        | x              |                                   |                 | x               | x          |             |
| DRANCO          | 28**             | 3.000- 120.000                | x              |                                   |                 | x               |            | x           |
| KOMPOGAS        | 60**             | 1.000 – 275.000               | x              |                                   |                 | x               |            | x           |
| LINDE-BRV       | 8                | 15.000-150.000                |                | x                                 |                 | x               |            | x           |
| Schwarting-UHDE | 3                | 25.000 -87 600                |                | x                                 | x               |                 |            | x           |
| VALORGA         | 27**             | 6 500 -170.000                | x              |                                   |                 | x               | x          | x           |
| WAASA           | 10+**            | 3.000 – 230.000               | x              |                                   | x               |                 | x          | x           |

\*Obejmuje ulegającą biodegradacji frakcję wyodrębnioną ze zmieszanych odpadów komunalnych, odpady kuchenne, odpady spożywcze, odpady zielone. Bez instalacji działających w oparciu o odpady przemysłowe.

\*\* informacje ze stron internetowych dostawców technologii (dane z sierpnia 2013).

Źródło: opracowanie własne na podstawie [66] oraz danych dostawców technologii

**Tabela 14.** Charakterystyka porównawcza technologii DRANCO, KOMPOGAS, VALORGA

| Technologia | Wsad   | Typ komory/ rodzaj proces | Temp. (°C) | Obciążenie komory ładunkiem masy organicznej (kg s.m.o. m <sup>-3</sup> d <sup>-1</sup> ) | Czas retencji (dni) | Uzysk metanu (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> s.m.o.) | Koszty operacyjne (€ Mg <sup>-1</sup> wsadu) |
|-------------|--|---------------------------|------------|---|---------------------|---|--|
| DRANCO      | Biodopady selektywnie zbierane                             | Pionowa/ciągły            | 50–55      | 10–15   | 20                  | 0,21–0,30   | 62   |
| KOMPOGAS    | Frakcja biodegradowalna ze zmieszanych odpadów komunalnych | Pozioma/ciągły            | 55         | 4,3   | 29                  | 0,39–0,58   | 63   |
| VALORGA     | Biodopady selektywnie zbierane                             | Pionowa/ciągły            | 37–55      | 10–15   | 20                  | 0,21–0,30   | 68   |

Źródło: opracowanie własne na podstawie [38] oraz [37]



## 8.1. Wybrane technologie fermentacji mokrej

### Technologia BTA

Technologia BTA (z niem. Biotechnische Abfallverwertung GmbH – BTA) należy do firmy BTA International GmbH z siedzibą w Niemczech. Jest to technologia mokra przeznaczona do zagospodarowania zmieszanych odpadów komunalnych lub selektywnie zbieranych bioodpadów. Proces jest prowadzony w mezofilowym zakresie temperatur (35°C). Uzysk biogazu w zależności od składu odpadów waha się w przedziale 80-120m<sup>3</sup> Mg<sup>-1</sup> odpadów [46,14,58,61]. Powszechnie stosowana w systemie jednostopniowym. Możliwe jest także zastosowanie układów z rozdziałem faz w zależności od wielkości zakładu przetwarzania odpadów [61]. Proces jednostopniowy prowadzony jest w zakładzie o typowej wydajności na poziomie 2.000 do 15.000 Mg rocznie [80]. Systemy wielostopniowe mają zastosowanie dla zakładów o wydajności powyżej 50.000 Mg odpadów na rok.

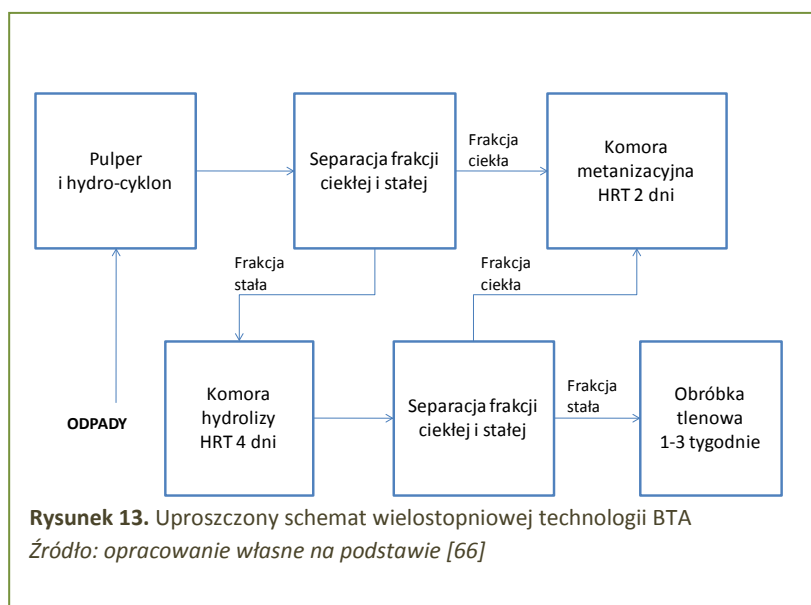
Fermentację metanową poprzedza hydro-mechaniczna obróbka wstępna. Odpady są rozcieńczane z zastosowaniem wody procesowej, tak by otrzymać zawartość suchej masy nie wyższą niż 10% [61]. Zawiesina unosząca się na powierzchni (flotaty), w postaci tworzyw sztucznych, tkanin, drewnajest usuwana przez system zgarniaczy. Zanieczyszczenia takie jak kamienie, baterie i metale są usuwane z osadnika frakcji ciężkiej. System może być uzupełniony o układ usuwania piasku, by oddzielić pozostającą drobną frakcją (piasek, małe kamyki, kawałki szkła). Powstaje gęsta zawiesina, która jest przepompowywana do komory fermentacyjnej.

Technologia BTA **wielostopniowa** zakłada rozdzielenie procesu fermentacji na odrębne komory (faza hydrolityczna i metanogenna), co pozwala na zapewnienie optymalnych warunków do rozwoju wszystkich grup mikroorganizmów biorących udział w procesie. W procesie wielostopniowym przygotowana zawiesina odpadów ulegających biodegradacji musi być rozdzielona na fazę stałą i ciekłą przy pomocy wirówki [78]. Powstała ciecz zawierająca składniki organiczne jest pompowana prosto do komory metanizacyjnej i jest tam przetrzymywana przez 2 dni. Odwodniony materiał stały jest ponownie mieszany z wodą i kierowany do komory hydrolizy (w warunkach mezofilowych przy pH 6-7). Po 4 dniach pulpa po przejściu przez komorę hydrolizy jest odwadniana a powstała ciecz trafia do komory metanizacyjnej, w której zachodzi intensywne mieszanie pod wpływem wprowadzenia biogazu pod ciśnieniem.

Pozostałość po fermentacji jest odwadniana w dekanterze i poddawana tlenowej obróbce końcowej. Zapotrzebowanie na rozcieńczanie jest zaspokajane poprzez wykorzystanie wody procesowej. W zależności od składu odpadów i uwarunkowań lokalnych nadwyżka wody procesowej jest kierowana do oczyszczalni ścieków lub jest oczyszczana na miejscu.

#### Technologia BTA:

- jednostopniowa/wielostopniowa,
- ciągła,
- mokra,
- mezofilowa,
- pionowa komora,
- mieszanie poprzez recyrkulację biogazu.



## Technologia Waasa

Jest to **mokra, jednostopniowa** fermentacja metanowa, która może być prowadzona **zarówno w warunkach mezofilowych, jak i termofilowych.**

### Technologia WAASA:

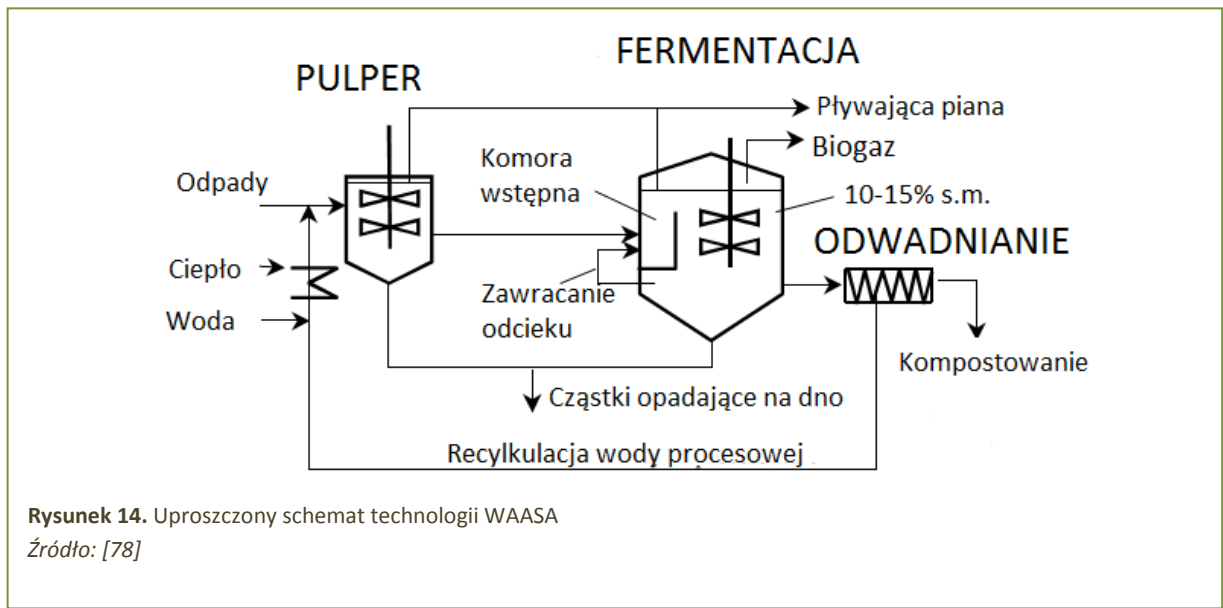
- jednostopniowa,
- ciągła,
- mokra,
- mezofilowa/termofilowa,
- pionowa komora,
- mieszadła mechaniczne.

Technologia Waasa została opracowana przez CiTec – grupę szwedzkich i fińskich firm. Stosuje się wsad o zawartości suchej masy na poziomie 10-15%. Uzysk biogazu waha się w zakresie 100-150 m<sup>3</sup> Mg<sup>-1</sup> bioodpadów, redukcja masy odpadów po fermentacji kształtuje się na poziomie 50-60% w stosunku do świeżej masy odpadów poddanych przetwarzaniu, a zużycie biogazu na potrzeby własne instalacji (ciepło) wynosi 20-30%. Czas retencji wynosi 10 oraz 20 dni, odpowiednio dla procesu w warunkach termofilowych oraz mezofilowych [85].

Proces stosowany jest do różnego rodzaju odpadów: frakcji ulegającej biodegradacji z mechanicznie sortowanych odpadów komunalnych, bioodpadów sortowanych selektywnie u źródła, osadu ściekowego, innych bioodpadów: poubojowych, z przemysłu przetwórstwa ryb i dla obornika.

Fermentacja zachodzi w komorze pionowej, przy czym jest ona wewnętrznie podzielona, umożliwiając wstępną fermentację wsadu. Podział komory ma zapobiegać możliwości wewnętrznego zderzania się przeciwprądowych strumieni przepływów. W komorze wstępnej, w przepływie ciągłym wsad przebywa 1-2 dni (wstępnie podgrzany parą). W komorze fermentacyjnej zachodzi pneumatyczne mieszanie i homogenizacja wsadu poprzez wpompowywanie biogazu przez otwory znajdujące się w podstawie komory [85,61].

Proces wstępnej obróbki obejmuje sortowanie mechaniczne (wyodrębnienie balastu kierowanego do spalarni odpadów) i płukanie, które poprzez separację mokrą (obróbka hydro-mechaniczna) pozwala na oddzielenie frakcji nadsitowej (>80 mm) i piasku. Do odpadów dodawana jest woda procesowa, tak by uzyskać pożądaną zawartość suchej masy wsadu na poziomie 10-15%. W pulperze odpady ulegają rozwłóknieniu i homogenizacji. Wsad poddawany jest higienizacji poprzez podgrzanie parą do temp. 70°C przez 1 godzinę. Powstała pulpa jest mieszana z niewielką ilością inokulum (osadu pofermentacyjnego) i wpompowywana do komory wstępnej, z czasem retencji 1 lub 2 dni. Następnie



materiał poddawany jest fermentacji w głównej komorze [85].

Proces Waasa w pełnej skali przemysłowej prowadzony może być w obu zakresach temperaturowych. Przy czym proces termofilowy wymaga czasu retencji 10 dni w porównaniu do 20 dni dla fermentacji mezofilowej [58].

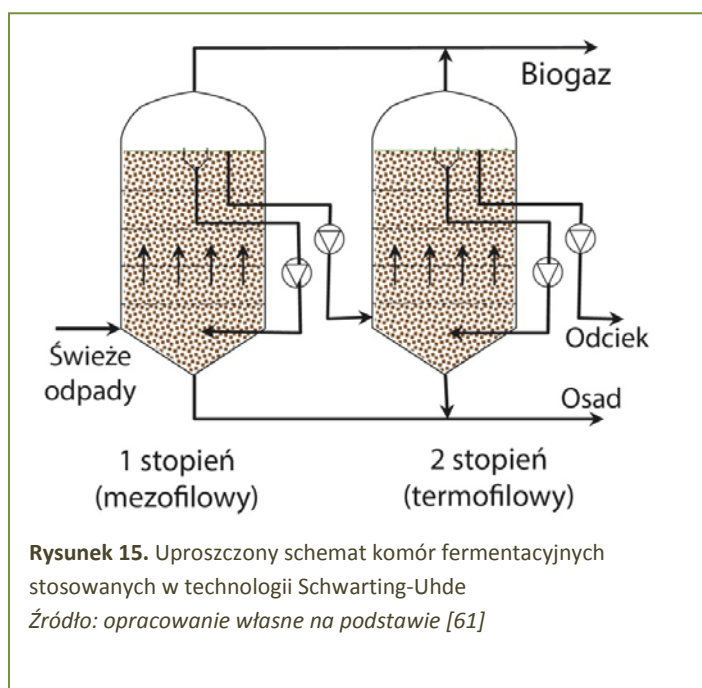
Instalacje przemysłowe oparte na technologii Waasa funkcjonują w Europie i w Japonii. Wydajności wahają się w zakresie 3.000-90.000Mg odpadów rocznie [85]. Są wśród nich instalacje na selektywnie zbierane bioodpady, a także instalacje na frakcję ulegającą biodegradacji wyodrębnioną ze zmieszanych odpadów komunalnych.

W Groningen w Holandii zastosowano zmodyfikowaną technologię Waasa (**Vagron**) do przetwarzania mechanicznie sortowanej frakcji ulegającej biodegradacji ze zmieszanych odpadów komunalnych. Instalacja osiągnęła stabilną pracę przy obciążeniu komory  $7,7 \text{ kg s.m.o. m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  [54].

### Schwarting-Uhde

Technologia Schwarting-Uhde oparta jest na dwóch pionowych komorach o przepływie tłokowym. W pierwszej komorze procesy hydrolizy i powstawania kwasów zachodzą w warunkach mezofilowych, podczas gdy w drugiej komorze zachodzi metanogeneza w termofilowym zakresie temperatur.

Proces przeznaczony jest dla bioodpadów selektywnie zbieranych u źródła. Są one mielone w celu zmniejszenia wielkości cząstek i rozcieńczane do zawartości suchej masy na poziomie 12%. Powstała w ten sposób pulpa jest podgrzewana do osiągnięcia pożądanej temperatury (poprzez wymiennik ciepła) i pompowana przez układ perforowanych płyt/przegród umieszczonych w komorze, które mają zapewnić równomierność ruchu wstępującego i utrzymanie wymuszonego przepływu okresowego. Mieszadła mechaniczne nie są potrzebne. Odpowiednie mieszanie zachodzi poprzez pionowe pulsacyjne podnoszenie się i opadanie płynu w zbiorniku przy użyciu okresowego pompowania wymuszonego, co powoduje turbulencje na perforowanych płytach/przegrodach.



#### Technologia Schwarting-Uhde :

- wielostopniowa,
- ciągła,
- mokra,
- termofilowa,
- pionowa komora,
- mieszanie przy użyciu okresowego pompowania.

Czas retencji w każdej komorze wynosi około 5-6 dni, co daje całkowity czas retencji około 10-12 dni. Biogaz zbiera się w górnej części komory, podczas gdy ciężkie cząstki stałe gromadzą się na dnie i są usuwane przez pompy śrubowe.

Zaletą technologii jest ograniczenie tworzenia się na powierzchni kożucha, który jest często występującą uciążliwością przy zastosowaniu technologii mokrych. Jednak ze względu na wysokie ryzyko zatykania się otworów w perforowanych przegrodach, technologia ta jest odpowiednia tylko dla stosunkowo czystych bioodpadów o wysokim stopniu biodegradowalności [51,78].

Instalacja Schwarting-Uhde w skali przemysłowej osiągnęła stabilne warunki działania przy obciążeniu ładunkiem organicznym na poziomie  $6 \text{ kg s.m. m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  [78].

## 8.2. Wybrane technologie fermentacji suchej

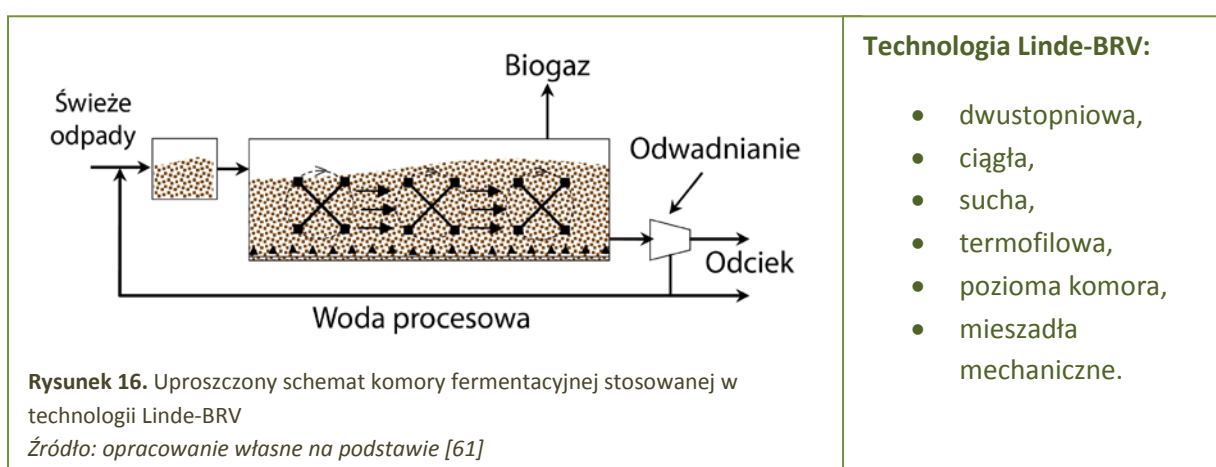
### Technologia Linde-BRV

Technologia opracowana przez firmę Linde-KCA-Dresden GmbH. Jest to proces fermentacji dwustopniowej, suchej. Proces prowadzony jest w warunkach termofilowych, ale dopuszczalna jest modyfikacja do warunków mezofilowych.



Po wstępnej obróbce (rozdrobienie, usunięcie zanieczyszczeń, rozcieńczenie), zawartość suchej masy powinna wynosić 34%. Pierwszy etap procesu prowadzony jest w warunkach tlenowych, masa organiczna jest częściowo hydrolizowana [78,66]. Po 2 dniach retencji, wstępnie rozłożona masa jest przepompowywana do betonowej komory fermentacyjnej z poziomym przepływem tłokowym. Do mieszania służy kilka mieszadeł o poprzecznych łopatkach. Poziomy okresowy przepływ wymuszony jest przez ruchomą podłogę w komorze, która transportuje osadzający się szlam do wylotu z komory, gdzie jest on usuwany [58; 88].

W przypadku procesu termofilowego, czas retencji wynosi 21-25 dni, a obciążenie ładunkiemorganicznym -  $8 \text{ kg s.m.o m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  [78,88]. Technologia może służyć przetwarzaniu odpadów o zawartości suchej masy w zakresie 15-45% [66]. Instalacje wykorzystujące tę technologię działają w Niemczech, Hiszpanii, Portugalii i Luxemburgu [66].



### Technologia VALORGA

Jest to jednostopniowa fermentacja sucha. Technologia rozwijana od 1981 r. przez firmę Valorga International S.A.S. Na skalę przemysłową została wprowadzona we Francji w połowie lat 80-tych. Technologia pierwotnie zaprojektowana dla segregowanych u źródła bioodpadów, a następnie dostosowana do zmieszanych odpadów komunalnych po wstępnej separacji frakcji [85].

Stosuje się relatywnie bardzo suchy wsad – odpady o zawartości 25-35% suchej masy. Fermentacja zachodzi w warunkach mezofilowych lub termofilowych z czasem retencji w zakresie 18-25 dni. Uzysk biogazu waha się w zakresie  $80-160 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$  wsadu [58].

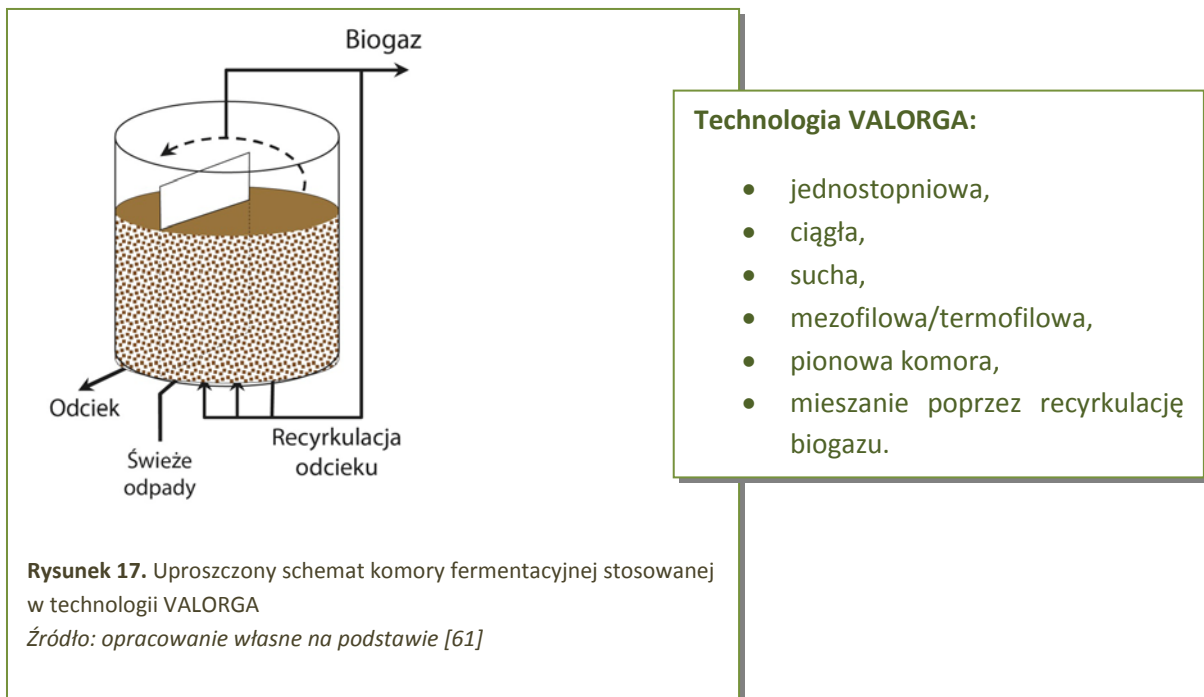
Obróbka wstępna odpadów przed procesem fermentacji obejmuje: suchą separację (usunięcie frakcji nadsitowej >100 mm i innych zanieczyszczeń), macerację odpadów o wielkości cząstek <80 mm, rozcieńczanie wodą (do zawartości s.m. na poziomie 25-35%), wstępne ogrzewanie parą [37].

Stosuje się pionową, cylindryczną komorę fermentacyjną z wewnętrzną recyrkulacją biogazu. Aby wymusić pionowy okresowy przepływ, w komorze fermentacyjnej znajduje się pionowa przegroda o szerokości 2/3 średnicy komory. Wsad jest wprowadzany przez wejście znajdujące się po jednej stronie przegrody, a ujście masy po fermentacji znajduje się po jej drugiej stronie. Pionowe mieszanie



w komorze jest wymuszane dzięki wtryskowi biogazu pod wysokim ciśnieniem co 15 minut poprzez układ dysz ulokowanych u podstawy komory.

Wadą technologii jest zatykanie się otworów wtryskiwania biogazu w przypadku wsadu o zawartości suchej masy <20% [78]. Technologia ta nie jest zatem odpowiednia dla relatywnie mokrego wsadu ze względu na sedimentację ciężkich cząstek stałych na dnie komory. Opisano przypadek czasowego zatrzymania pracy biogazowni w Szwajcarii opartej na technologii VALORGA z powodu dużych ilości nagromadzonych na spodzie komory fermentacyjnej osadów (piasku, żwiru), utrudniających mieszanie i ograniczających czynną objętość komory [20].

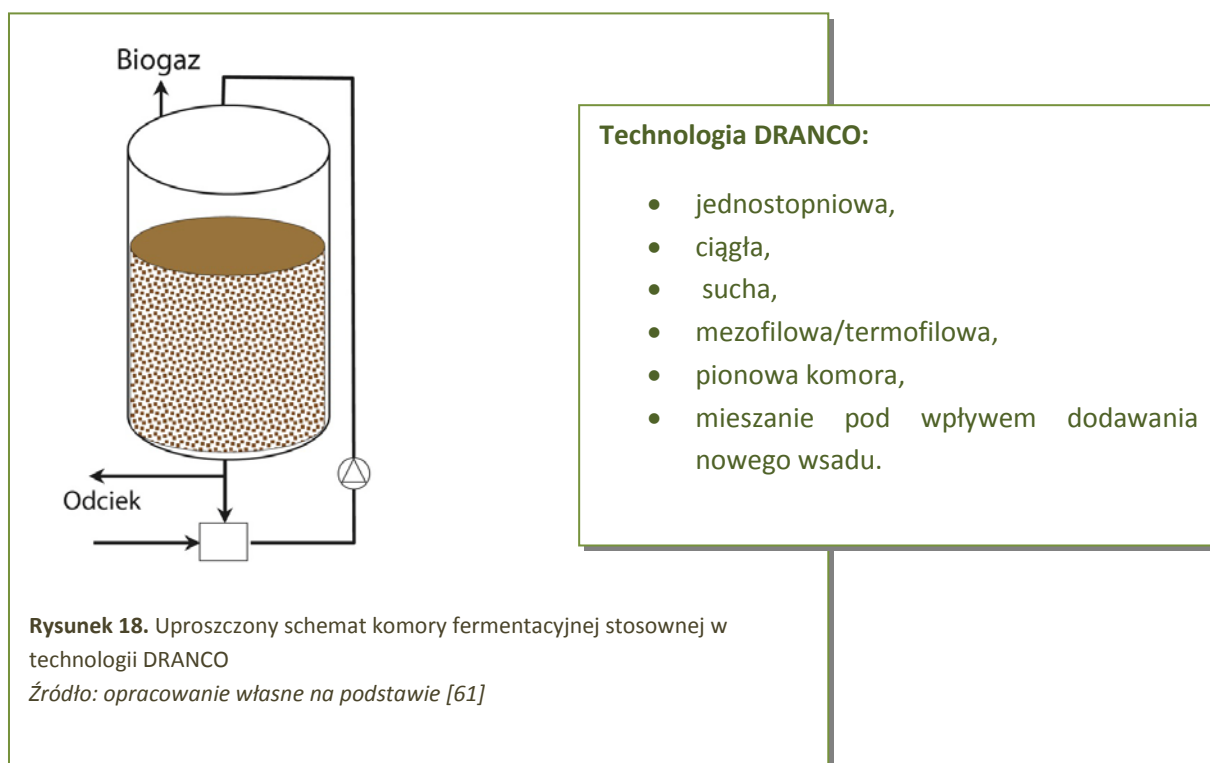


Instalacje przemysłowe oparte na technologii VALORGA powstały w wielu krajach Europy (Niemcy, Francja, Szwajcaria, Holandia, Belgia, Hiszpania, Włochy). Zakres mocy przerobowych waha się w przedziale 6 500-170.000, a nawet 270.000 Mg odpadów rok<sup>-1</sup> w Chinach. Mniejsze instalacje (do 50.000 Mg rok<sup>-1</sup>) działają w oparciu o selektywnie zbierane odpady kuchenne albo mieszanek odpadów kuchennych i odpadów zielonych. Duże i bardzo duże instalacje (> 100.000 Mg rok<sup>-1</sup>) działają w oparciu o ulegającą biodegradacji frakcję wyodrębnioną ze zmieszanych odpadów komunalnych [78].

### Technologia DRANCO

Technologia rozwijana przez belgijską firmę OrganicWasteSystems w Gent pod koniec lat 1980-tych, jest przeznaczona do odpadów komunalnych oraz przemysłowych. Po fermentacji zachodzi krótki proces tlenowego dojrzewania przefermentowanej masy[85]. DRANCO to proces jednostopniowy, suchy. Fermentacja prowadzona jest typowo w warunkach termofilowych (50-55°C). Typowy hydrauliczny czas retencji w pionowej komorze fermentacyjnej wynosi 20 dni, a produkcja biogazu sięga 100-200 m<sup>3</sup>Mg<sup>-1</sup> wsadu przy wydajności instalacji 10.000-35.000 Mg rok<sup>-1</sup>[80].

Wymagana jest wysoka zawartość suchej masy, w zakresie 20-40% w komorze fermentacyjnej dla optymalnego działania instalacji [61]. Inni uważają tę technologię za skuteczną dla odpadów o zawartości s.m. nawet do 50%[58]. W większości przypadków jest to technologia termofilowa, ale może być stosowany mezofilowy zakres temperatur dla niektórych rodzajów odpadów [16].



Stosuje się pionową komorę fermentacyjną z przepływem tłokowym z góry na dół. Wsad jest zadawany codziennie w górnej części komory, w tym samym czasie przefermentowana masa odbierana jest na dole komory. Zwykle część pofermentu jest stosowana jako inokulum i jest mieszana w proporcji 1:6-8 ze świeżym wsadem [78]. Niewielka ilość pary wodnej jest wprowadzana do mieszaniny by utrzymać temperaturę wsadu. Podgrzana wstępnie pulpa jest pompowana na szczyt komory fermentacyjnej. Nie ma potrzeby stosowania urządzeń mieszających. Masa przesuwana się z góry na dół komory fermentacyjnej pod wpływem dodawania nowego substratu i odbierania pofermentu [78,20,16]. Pozostałość po fermentacji jest odwadniana, a frakcja stała jest stabilizowana i higienizowana w warunkach tlenowych przez okres około 2 tygodni (faza dojrzewania tlenowego czyli kompostowania).

Komora fermentacji może być dostosowana do pożądanej wydajności, chociaż wymiary komory nie powinny przekraczać 3300 m<sup>3</sup> i wysokości 25 m [78].

Instalacje przemysłowe oparte o technologię DRANCO powstały w Szwajcarii, Niemczech, Austrii, Hiszpanii, Belgii i Włoszech. Zakres mocy przerobowych zawiera się w przedziale od 10.000 do 50.000 Mg rok<sup>-1</sup>[78].

W Polsce, w Trzebani koło Leszna (Wielkopolska), działa pierwszy w kraju zakład wykorzystujący technologię beztlenowej fermentacji do rozkładu odpadów. Oparty jest on na technologii DRANCO. W projekcie bierze udział ponad 250 tys. gospodarstw domowych z 18 gmin subregionu leszczyńskiego. Zmieszane odpady komunalne trafiające do instalacji są poddawane sortowaniu

(odzyskuje się tworzywa sztuczne, papier, szkło i metale). Frakcja podsitowa o wielkości <80 mm trafia do kolumny fermentacyjnej. Powstający biogaz wykorzystywany jest do produkcji ciepła oraz energii elektrycznej w skojarzeniu. Ciepło wykorzystywane jest na cele własne zakładu, a wytworzona energia – ponad 900 kW mocy trafia na sprzedaż do sieci energetycznej. Według założeń projektu zakład ma przerabiać 70.000 Mg odpadów rocznie.



Rysunek 19. Instalacja DRANCO w Zakładzie Zagospodarowania Odpadów w Trzebani

Źródło: [65]

W Białej Podlaskiej natomiast powstaje obecnie Zakład Zagospodarowania Odpadów, w którym jednym z zasadniczych elementów jest instalacja fermentacji metanowej w technologii poziomej suchej fermentacji firmy Eisenmann [55]. Materiał pofermentacyjny i frakcja podsitowa mają trafiać do kompostowania. Uzyskany biogaz będzie służył do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepła.

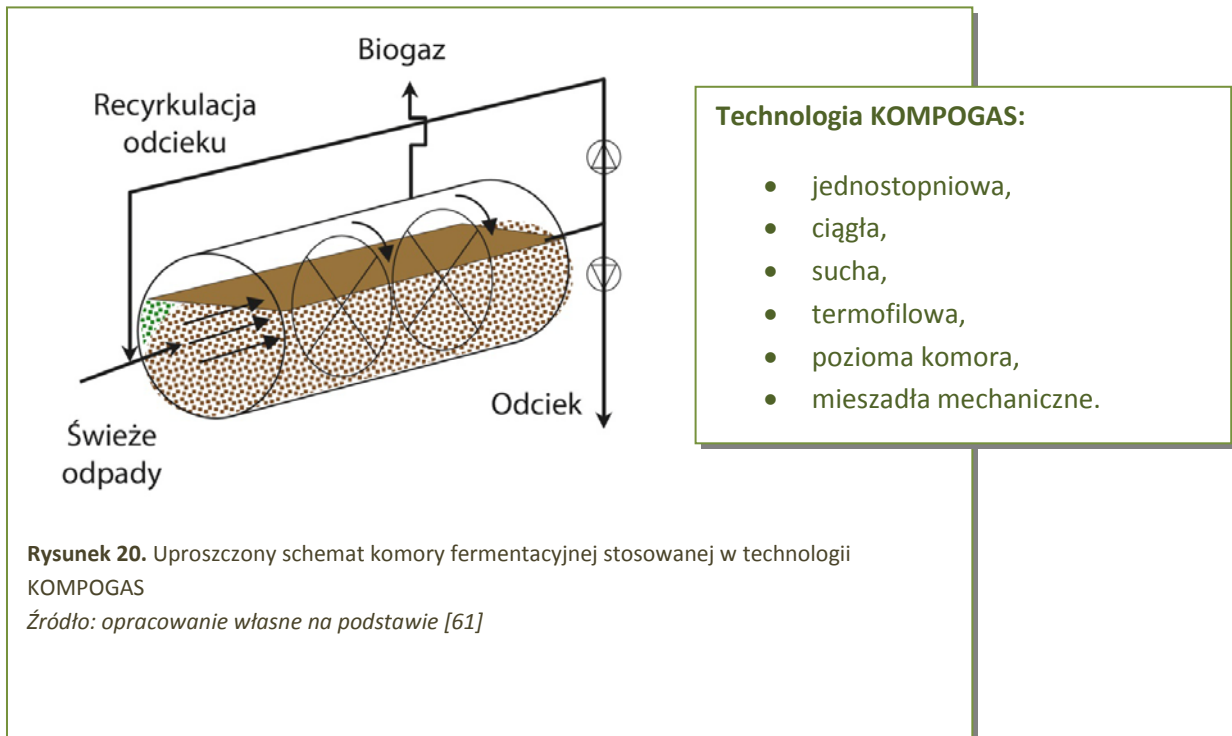
### Technologia KOMPOGAS

Jest to szwajcarska technologia opracowana pod koniec lat 80-tych przez Waltera Schmid. Fermentacja jednostopniowa, sucha, z czasem retencji 15-20 dni i typowym uzyskiem biogazu na poziomie  $100 \text{ m}^3 \text{ Mg}^{-1}$  wsadu [78]. Proces prowadzony jest w termofilowym zakresie temperatur ( $55\text{-}60^\circ \text{ C}$ ) [61]. Technologia przeznaczona jest do przetwarzania odpadów zielonych i bioodpadów kuchennych [85].

Przed zadaniem wsadu do komory, odpady stałe są poddane wstępnej obróbce by usunąć zanieczyszczenia [43]. Poprzez dodanie wody procesowej całkowita zawartość suchej masy jest ustalana na poziomie 23-28%. Poniżej tego zakresu, ciężkie cząstki, takie jak piasek czy szkło opadają na dno i gromadzą się wewnątrz komory fermentacyjnej. Wyższa zawartość suchej masy może powodować nadmierne opory przepływu w komorze fermentacji [78].

W technologii tej stosuje się poziomą cylindryczną komorę fermentacyjną z okresowym przepływem wymuszonym. Komora wyposażona jest w ustawione osiowo, wolno-obracające się i okresowo działające mieszadła, które mają zapewnić mieszanie i utrzymanie cięższych cząstek w zawieszynie

[61]. Mieszadła powodują także homogenizację i odgazowanie materiału[78]. Materiał po przejściu przez komorę fermentacji jest częściowo odwadniany. Część otrzymanego w ten sposób odcieku mieszana jest z wprowadzanym do komory świeżym wsadem odpadów, co zapewnia zaszczepienie wsadu bakteriami [85].

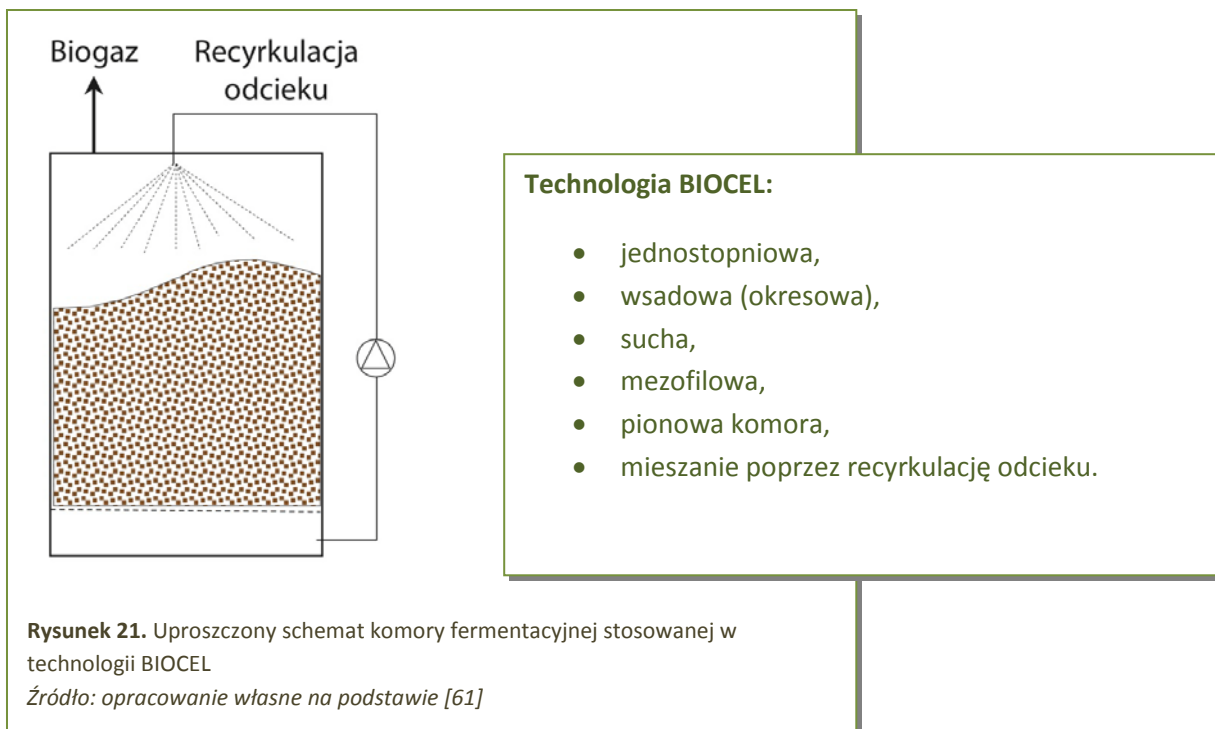


### Technologia BIOCEL

Jest to technologia wsadowa, jednostopniowa, z fermentacją suchą. Zawartość suchej masy odpadów ulegających biodegradacji musi być utrzymana w zakresie 30-40%. Proces zachodzi w warunkach mezofilowych (35-40°C). Typowy czas retencji wynosi 15-21 dni [10].

Fermentacja zachodzi w kilku prostokątnych betonowych komorach. Przed załadowaniem komory fermentacyjnej świeże odpady są mieszane z inokulum (poferment z poprzedniej partii poddawanej fermentacji) oraz załadowywane do komory przy pomocy sypiacza. Po zakończeniu załadunku gazoszczelne wrota komory są zamykane. W celu kontroli emisji odorów, instalacja znajduje się w zamkniętym budynku, w którym utrzymuje się niewielkie podciśnienie. Aby utrzymać temperaturę fermentacji w zakresie 35-40°C zawartość komory jest zraszana odciekem z fermentacji, który jest wstępnie podgrzewany przez wymiennik ciepła. Zraszanie odbywa się poprzez dysze umieszczone w górnej części komory [61]. Podłogi komór są perforowane i wyposażone w zbiornik na odcieki.





Instalacja BIOCEL w skali przemysłowej jest skuteczna w przetwarzaniu bioodpadów ogrodowych, warzywnych i owocowych z wydajnością 35.000 Mg rok<sup>-1</sup>. Z tony przetwarzanych odpadów można otrzymać ok. 310 kg wysokiej jakości kompostu, 455 kg odcieku, 100 kg piasku i 86 m<sup>3</sup> biogazu (z przeciętną zawartością metanu 58%) oraz 45 kg balastu nie poddawanego fermentacji [61].

Instalacja BIOCEL w Lelystad w Holandii osiągała wydajność produkcji biogazu na poziomie 67 m<sup>3</sup> Mg<sup>-1</sup> segregowanych u źródła bioodpadów. Jest to około 40% mniej niż wydajność uzyskiwana w systemach fermentacji ciągłej (jednostopniowych) przetwarzających tego samego typu odpady [71]. Obciążenie komory ładunkiem organicznym w instalacji w Lelystad wyniosło 3,6 kg s.m.o m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup> i wartości maksymalnej 5,1 kg s.m.o m<sup>-3</sup> d<sup>-1</sup>.

### Technologia BIOFerm

Technologia wsadowa oparta na fermentacji suchej w mezofilowym zakresie temperatur. Odpowiednia dla biomasy zawierającej 25-35% s.m. Technologia należy do Viessmann Group.

Technologia jest odpowiednia do przetwarzania bioodpadów wyodrębnionych ze strumienia odpadów komunalnych, w tym odpadów zielonych. Układ jest praktycznie odporny na obecność mechanicznych zanieczyszczeń w materiale wsadowym, gdyż wsad pozostaje nieruchomy i nie styka się z żadnym urządzeniem ruchomym w komorze fermentacyjnej.

Proces fermentacji jest zasadniczo podobny jak w technologii BIOCEL. Instalacja biogazowa składa się z kilku betonowych komór fermentacyjnych wyposażonych w gazoszczelne wrota. Bioodpady ładowane są do komór za pomocą ładowacza czołowego i są poddawane procesowi fermentacji średnio przez 28 dni. Ciepło jest dostarczane do komór przez wymienniki ciepła oraz przez rozprowadzanie perkolatu, którym zraszana jest zawartość każdej komory poprzez zamontowane u góry zraszacze. Perkolat pełni też funkcję inokulum i zaszczepia wsad bakteriami. Wsad komory nie jest mieszany mechanicznie, jednak perkolat i woda powstająca w procesie fermentacji jest zbierana



na dnie komory i podlega recyrkulacji. Powstający biogaz zbiera się w elastycznym zbiorniku i najczęściej przeznaczony jest do produkcji energii elektrycznej i ciepła w układzie CHP lub może być uzdatniony do jakości gazu ziemnego celem zatłaczania do sieci gazowej.



Rysunek 22. System suchej fermentacji w technologii BioFerm

Opis: 1. Magazynowanie biomasy 2. Platforma mieszania substratów 3. Komora fermentacji 4. Elastyczne systemy gromadzenia biogazu 5. Spalanie biogazu 6. CHP 7. Przyłącze sieci elektroenergetycznej 8. Przyłącze lokalnej sieci ciepłowniczej

Źródło: [5]

## 9. Jak wybrać właściwą opcję technologiczną?

Aby wykonać ocenę technicznych możliwości przetwarzania bioodpadów w instalacji biogazowej oraz wybrać właściwą opcję technologiczną, przedsiębiorca zainteresowany realizacją inwestycji powinien rozważyć kluczowe kryteria podane w tabeli poniżej.

Tabela 15. Kluczowe kryteria wykorzystania bioodpadów pochodzenia komunalnego w instalacji biogazowej

|  |   |
|--|---|
| <b>Stać dostawa jednorodnych odpadów</b>       | Wymagana segregacja u źródła, odrębne gromadzenie i dowóz bioodpadów  |
| <b>Zawartość suchej masy</b>                   | Typowo zawartość s.m. kształtuje się na poziomie 30-35% s.m. dla bioodpadów kuchennych oraz ok. 48% s.m. dla ulegającej biodegradacji frakcji wydzielonej ze zmieszanych odpadów komunalnych.               |
| <b>Dodatkowy wsad do fermentacji</b>           | W przypadku odpadów zielonych o dużej zawartości lignocelulozy (np. trawy łąkowe) konieczne jest dodanie odpadów o wyższym stopniu biodegradacji, jak np. odpady kuchenne, gnojowica zwierzęca.             |
| <b>Hydrauliczny czas retencji</b>              | Zależny od rodzaju bioodpadów i zawartości substancji organicznej we wsadzie, a także temperatury prowadzenia fermentacji.  |
| <b>Zagospodarowanie przefermentowanej masy</b> | Preferowana jest forma odwodniona pofermentu. Jeśli ma być stosowany do celów nawozowych, musi pochodzić wyłącznie z selektywnie zbieranych bioodpadów. Muszą być spełnione warunki dotyczące higienizacji. |
| <b>Wykorzystanie biogazu</b>                   | Najbardziej powszechne rozwiązanie to układy skojarzone do produkcji energii elektrycznej i ciepła.   |

Źródło: opracowanie własne

Najważniejsze kwestie techniczne do rozważania na wstępnym etapie projektu, to ocena możliwości pozyskania relatywnie „czystej” masy bioodpadów selektywnie zbieranych, możliwość ich rozdrobnienia, a także zapewnienie odpowiedniej ilości wody lub innego płynu rozcieńczającego do wstępnego przygotowania masy przed procesem fermentacji – jeżeli inwestycja będzie realizowana w systemie fermentacji mokrej.

Selektywnie zbierane bioodpady kuchenne charakteryzują się zawartością s.m. na poziomie 30-35%, a wartość ta zmienia się w zależności od np. od pory roku czy składu posiłków – im większy udział świeżych owoców i warzyw, tym niższa zawartość suchej masy [36].

Mając na uwadze stosunkowo dużą zawartość suchej masy w bioodpadach pochodzenia komunalnego oraz ich dużą podatność na proces rozkładu mikrobiologicznego, **uzasadnionym rozwiązaniem jest stosowanie fermentacji suchej**. Przemawiają za tym zalety systemów fermentacji suchej (patrz rozdział 6.1)). W Europie od 10 lat wyraźna jest tendencja do realizacji nowych inwestycji biogazowych właśnie w oparciu o system fermentacji suchej, choć wcześniejsze instalacje były budowane zazwyczaj w systemie mokrym.

Większość instalacji zaprojektowanych do przetwarzania bioodpadów komunalnych w systemie fermentacji suchej pracuje z wysokim obciążeniem komory fermentacyjnej ładunkiem zanieczyszczeń organicznych, tj. na poziomie  $10 \text{ kg s.m.o. m}^{-3}\text{d}^{-1}$  i wyższym. Przekłada się to na mniejsze jednostkowe nakłady inwestycyjne związane z mniejszymi wymiarami komory fermentacyjnej w porównaniu do systemów fermentacji mokrej. Wyrażna jest więc preferencja dla technologii suchych, jednostopniowych.

Jeśli chodzi o tryb prowadzenia procesu dominują systemy ciągłe. Jednak warto zaznaczyć, że w ostatnich latach rośnie zainteresowanie systemami wsadowymi (okresowymi). Związane jest to głównie z faktem, że systemy wsadowe są łatwiejsze w kontroli procesu i bardziej odporne na załamanie procesu fermentacji. Natomiast systemy fermentacji ciągłej są bardzo trudne do odbudowania w przypadku załamania się procesów biologicznych w komorze fermentacyjnej. Patrz rozdział **Fermentacja ciągła a fermentacja okresowa**.

Niezależnie od zastosowania fermentacji suchej bądź mokrej, wielkość komory fermentacyjnej będzie zależna w każdym przypadku od temperatury w jakiej prowadzony będzie proces. Warunki termofilowe sprzyjają skróceniu hydraulicznego czasu retencji, pozwalają uzyskać lepszej jakości poferment oraz zwiększają uzysk biogazu (w przeliczeniu na Mg bioodpadów). Dla procesu fermentacji w warunkach termofilowych ( $55^{\circ}\text{C}$ ) z wysokim obciążeniem komory ładunkiem substancji organicznych, aktywność flory bakteryjnej jest zwiększona i rozkład materii organicznej jest pełniejszy niż w warunkach mezofilowych ( $35^{\circ}\text{C}$ ). Ma to dwie główne konsekwencje: szczytowa produkcja biogazu osiągana jest w krótszym czasie, a produkt fermentacji (poferment) podlega higienizacji. Należy jednak zaznaczyć, że utrzymanie temperatury  $55^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$  wymaga zapewnienia dopływu większej ilości ciepła do komory fermentacyjnej w porównaniu do technologii mezofilowych. Najczęściej wykorzystuje się ciepło wytworzone przez układ kogeneracyjny produkujący energię elektryczną i ciepło z biogazu. Częściowa utrata ciepła (przeznaczenie na potrzeby własne instalacji), jest w tym przypadku kompensowana przez korzyści związane z większym uzyskiem biogazu oraz możliwością zastosowania zmniejszonej objętości komory fermentacyjnej.

**Koszty instalacji i prowadzenia fermentacji metanowej odpadów są w największym stopniu uzależnione od jakości i ilości wsadu.** Poza jakością wsadu (chodzi głównie o obecność innych frakcji w bioodpadach), ważne składowe kosztów to: selektywna zbiórka bioodpadów, transport, obróbka wstępna. W odniesieniu do kosztów systemy fermentacji suchej wydają się mieć przewagę nad fermentacją mokrą ze względu na: mniejszą objętość komory fermentacyjnej, w większości przypadków brak ruchomych elementów mieszających w komorze, możliwość przetwarzania wsadu o zróżnicowanej jakości, wysoki uzysk metanu. Systemy z rozdziałem faz są znacznie droższe w budowie i eksploatacji [68; 72].

**Prezentowane powyżej wytyczne mają charakter bardzo ogólny i w każdym przypadku przedsiębiorca przystępując do planowania inwestycji powinien zlecić przeprowadzenie rzetelnego studium możliwości technicznych i ekonomicznych dla danych warunków lokalnych.**

## 10. Fermentacja odpadów zielonych

Dotychczas odpady zielone po rozdrobnieniu były często kierowane bezpośrednio do wykorzystania rolniczego (bez wcześniejszego ich kierowania do instalacji recyklingu organicznego). Od 2013 roku prawodawstwo w Polsce zabrania stosowania takich praktyk, choć nie do końca istnieje możliwość kontroli tego zjawiska.

Odbudowa materiału organicznego w glebie następuje **3-krotnie bardziej efektywnie** w przypadku stosowania materiału poddanemu recyklingowi organicznemu niż w przypadku rozprowadzania na powierzchni gleby odpadów zielonych trafiających bezpośrednio na pola [68].

Odpady zielone powinny być przetwarzane w instalacjach recyklingu organicznego (instalacja fermentacji lub kompostownia), a otrzymany materiał może, po spełnieniu określonych kryteriów jakościowych, być wprowadzany do obrotu jako nawóz organiczny lub środek wspomagający uprawę.

### Charakterystyka odpadów zielonych miękkich

Odpady zielone są szczególnym rodzajem bioodpadów. Jest to materiał bardzo niejednorodny, głównie ze względu na zmieszanie frakcji miękkiej i frakcji zdrewniałej. Część miękka, czyli głównie trawy i części innych roślin mogą być przetwarzane w procesach fermentacji metanowej, choć najbardziej powszechne jest ich kompostowanie.

W porównaniu do innych bioodpadów pochodzenia komunalnego, trawy z pielęgnacji terenów zieleni są stosunkowo trudnym materiałem do fermentacji metanowej. Mogą zawierać podwyższoną ilość lignocelulozy i ligniny oraz zanieczyszczenia mineralne (piasek, ziemia). Trawy charakteryzują się także niską wartością stosunku węgla do azotu (C:N), co może prowadzić do zahamowania procesów biologicznych, np. poprzez zakwaszenie, wysoką koncentrację amoniaku czy źle zachodzący proces hydrolizy. Trawy charakteryzują się również deficytem mikroelementów [71]. Przy wykorzystaniu traw jako podstawowego wsadu do fermentacji, niezbędne może być uzupełnienie niedoborów kobaltu, niklu, selenu, molibdenu [72]. Dlatego odpady zielone z całorocznej pielęgnacji powinny być stosowane jedynie jako domieszka do strumienia kierowanego do fermentacji. Najbardziej korzystnym rozwiązaniem jest fermentacja traw mokrych z wiosennego lub jesienno-koszenia (trawy z pielęgnacji zieleni miejskiej) lub odpady ogrodowe (trawy podlegające nawadnianiu).

### Przygotowanie odpadów zielonych

Odpady zielone przeznaczone do fermentacji (mokre trawy) powinny być zbierane bezpośrednio po koszeniu. Zaleca się zakiszanie traw, np. w rękawach foliowych [72]. Niekiedy stosuje się substancje (płynne lub granulat) wspomagające proces zakiszania [67]. Możliwe jest także belowanie świeżej trawy przeznaczonej do zakiszania, choć rozwiązanie to jest rzadkie ze względu na wysokie koszty.

Odpady zielone mogą także być zbierane i przewożone w czasie do 1-2 dni od skoszenia do silosów przejazdowych znajdujących się przy instalacji biogazowej [71]. Należy jednak zaznaczyć, że silosy należy wypełnić materiałem przeznaczonym do zakiszania do 5 dni od skoszenia [68]. Odpady zielone

nie powinny być gromadzone w kontenerach i oczekiwać tam kilka dni aż do ich zapełnienia. Wiąże się z tym rozwój pleśni i grzybów w zielonej masie.

### Obróbka wstępna odpadów zielonych

Trawy często zanieczyszczone są ziemią lub piaskiem, który będzie osadzał się na dnie komory fermentacyjnej [49]. Dlatego w Niemczech w niektórych instalacjach biogazowych stosuje się przemywanie odpadów zielonych wodą. Ciecz po przemywaniu traw, jak również odcieki z ich przechowywania, mogą zostać wykorzystane do uzyskania odpowiedniego upłynnienia wsadu przed jego zadaniem do komory fermentacyjnej [48].

Konieczne jest zastosowanie obróbki wstępnej tuż przed podaniem wsadu do komory fermentacyjnej. Rozdrabnianie traw znacząco pozwala na zwiększenie uzysku biogazu, nawet o 26%. Innym zalecanym zabiegiem jest proces ekstruzji lub dodawanie substancji wspomagających rozkład [72].

Ciekawe rozwiązanie w tym zakresie oferuje firma LEHMAN. Jest to metoda hybrydowa oparta na zastosowaniu podwyższonej temperatury, ciśnienia oraz procesu ekstruzji. Technologię ta można stosować do traw, a także odpadów kuchennych. Efektem jej zastosowania jest zwiększenie podatności odpadów na biodegradację, co skraca czas (HRT) przebywania wsadu w komorze fermentacyjnej. Jest to szczególnie istotne w przypadku rozkładu celulozy i hemicelulozy, które występują w odpadach zielonych. Produktywność metanu wzrasta nawet o 22%. Odcieki po ekstruzji przeznaczone mogą być do zraszania materiału wsadowego znajdującego się w komorze fermentacji [49].

### Uzysk biogazu

Produktywność biogazu z odpadów zielonych jest o wiele mniej przewidywalna niż dla kiszonki kukurydzy stosowanej powszechnie w biogazowniach rolniczych[41].

**Tabela 16.** Uzysk metanu dla odpadów zielonych

| Rodzaj wsadu                              | W przeliczeniu na suchą masę organiczną<br>$\text{dm}^3 \text{CH}_4 \text{kg}^{-1} \text{s.m.o.}$ | W przeliczeniu na masę świeżych substratów<br>$\text{dm}^3 \text{CH}_4 \text{kg}^{-1}$ |
|---|---|--|
| Świeża trawa (odpady zielone)             | 310-408   | 36-53  |
| Trawa łąkowa (konserwacja traw i łąk)     | 150   | 64   |
| Kiszonka trawy (rośliny energetyczne)     | 318-330   | 100  |
| Kiszonka kukurydzy (rośliny energetyczne) | 297-341   | 85-112   |

Źródło: [35, 45]

Poziom uzysku biogazu będzie zróżnicowany w zależności od: gatunku traw występujących lokalnie, czasu i częstotliwości koszenia, długości źdźbła, poddaniu ich lub nie procesom zakiszania przed skierowaniem do fermentacji [90].

Dla określenia uzysku biogazu dla odpadów zielonych miękkich znaczenie ma okres, w którym koszona jest trawa. W okresie wiosennym, gdy koszenie ma miejsce w maju, biogazodochodowość



traw jest wysoka. Tymczasem trawy koszone w okresach suchych, letnich i jesiennych są podsuszone i mają wyższą zawartość ligniny. Stąd charakteryzują się znacznie niższym uzyskiem metanu, na poziomie ok.  $30 \text{ dm}^3 \text{CH}_4 \text{kg}^{-1}$ . Z powodów ekonomicznych nie zaleca się zadawania podsuszonej trawy jako materiału wsadowego do komory fermentacyjnej w biogazowni. Dobrym rozwiązaniem jest stosowanie traw przygotowanych w formie kiszonki [41].

**Tabela 17.** Zestawienie wybranych parametrów dla kiszonki traw oraz kiszonki kukurydzy

| Charakterystyka                                     | Odpady zielone | Kiszonka kukurydzy | Komentarz  |
|---|----------------|--------------------|--|
| Sucha masa, %                                       | 22-55          | 24-37              | Większa zawartość s.m. świadczy o występowaniu większej ilości materiału strukturotwórczego w trawach, jak lignina i celuloza.   |
| Sucha masa organiczna, %                            | 85-94          | 95-99              | W kiszonce traw występuje większa zawartość piasku i ziemi w porównaniu z kiszonką kukurydzy.  |
| Lignoceluloza, $\text{g kg}^{-1}$ s.m.              | 177-435        | 126-269            | Podwyższona zawartość lignocelulozy i ligniny powoduje, że kiszonka trawy jest materiałem o mniejszym uzysku biogazu.  |
| Lignina, $\text{g kg}^{-1}$ s.m.                    | 11-78          | 9-24               |  |
| Stosunek C:N  | 13,3-40,5      | 26,5-55            | Obniżona wartość C:N powoduje zwiększenie poziomu amoniaku, który może być inhibitorem procesu fermentacji.  |
| $\text{CH}_4$ , $\text{dm}^3 \text{kg}^{-1}$ s.m.o. | 310-408        | 297-341            | Szerszy zakres wartości dla odpadów zielonych, co wskazuje na niejednorodność tego materiału i zmniejsza przewidywalność produkcji.  |
| pH  | 7,7-8,3        | 7,2-7,7            | <p>Optymalne warunki dla procesu hydrolizy to pH w zakresie 4,5-6,3. Podwyższone pH może zakłócać hydrolizę. Należy wówczas aplikować enzymy wspomagające proces hydrolizy, rozdrabniać trawę.</p> <p>W przypadku procesów jednostopniowych pH ustawia się dla fazy metanogennej, na poziomie około 7.</p> |
| Przewodność elektryczna, $\text{mS cm}^{-1}$        | >25            | <25                | Informuje o stopniu mineralizacji (zasolenia) kiszonki traw.   |

Źródło: [90, 45]

## Dodatek traw do fermentacji metanowej

Zaleca się, by odpady zielone w postaci traw stosowane były jedynie jako domieszka do strumienia substratów kierowanego do komory fermentacyjnej w proporcji maksymalnie 40%.

Zastosowanie odpadów zielonych miękkich nie wymaga żadnych dodatkowych interwencji technologicznych jeżeli nie przekraczają 10% wsadu objętościowego do instalacji [72]. Inne opracowania rekomendują dawkę świeżo skoszonej trawy na poziomie nie większym niż 25 % masowo [41]. W przypadku traw z uprawy intensywnej (tereny podlewane i koszone z częstotliwością raz na tydzień), jak np. pola golfowe, stosuje się ich domieszkę do poziomu 40% wsadu w instalacji biogazowej [26]. Jednak w istniejącej biogazowni w miejscowości Regen stosunek odpadów zielonych do kiszonki kukurydzianej to już 3:1, odpady zielone stanowią ponad 70% wsadu.

Trawy nie są łatwym substratem do fermentacji metanowej. Komponenty włókniste i białkowe trudno ulegają rozpuszczeniu, powodując powstawanie kożucha i spienianie w czasie fermentacji [62]. Duża zawartość ligniny powoduje kłopoty z mieszaniem, co zwiększa nakłady energetyczne na obsługę biogazowni przy niższych uzyskach biogazu [75]. Z tego względu konieczna jest optymalizacja procesu hydrolizy traw i ich fermentacji pod kątem uzyskania optymalnej ilości metanu przy niskich kosztach operacyjnych. Zalecana jest w tym przypadku fermentacja z rozdziałem faz – odrębna komora do hydrolizy [63].

Źródło [63] w swoich badaniach określili optymalne warunki prowadzenia fermentacji metanowej dla kiszonki traw w warunkach termofilowych (55°C). Badania prowadzono w odniesieniu do kiszonki uzyskanej z wieloletniej trawy życicy (trawa niska, pastwiskowa). Najwyższy uzysk metanu dla fermentacji mezofilowej – na poziomie  $368 \text{ dm}^3 \text{ CH}_4 \text{ kg}^{-1} \text{ s.m.o.}$ , osiągnięto przy obciążeniu komory fermentacyjnej na poziomie  $1 \text{ kg s.m.o. m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  dla hydraulicznego czasu retencji 4 dni. Hydroliza termofilowa pozwoliła na zwiększenie uzysku metanu o 30% w stosunku do kiszonki traw, która nie była poddana hydrolizie.


## 11. Kierunki wykorzystania biogazu

### Skojarzone wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła

Wytwarzanie energii elektrycznej i ciepła w skojarzeniu jest najbardziej powszechnym sposobem wykorzystania biogazu. Układ kogeneracyjny, w skrócie CHP (*combined heat and power*), jest zainstalowany najczęściej bezpośrednio w biogazowni, czasem biogaz transportowany jest po podczyszczeniu (usuwanie wilgoci i związków siarki) rurociągiem bezpośrednio np. do lokalnej elektrociepłowni. Układ CHP bazujący na silnikach gazowych, charakteryzuje się wysoką sprawnością. Wytworzona energia elektryczna, poza wykorzystaniem na potrzeby procesowe biogazowni, w większości przeznaczona jest na sprzedaż do sieci elektroenergetycznej, co stanowi główne źródło przychodów operatora instalacji. Nadwyżka wytworzonego ciepła, poza zużyciem na potrzeby ogrzania komór fermentacyjnych, może być sprzedawana lokalnym odbiorcom lub zagospodarowana na miejscu, np. do procesów suszenia.



Surowy biogaz przed skierowaniem do układu CHP jest zwykle osuszany oraz odsiarczany.

Inwestorzy zainteresowani produkcją energii elektrycznej i ciepła w skojarzeniu mogą wstępnie obliczyć ilość energii elektrycznej oraz ciepła, którą można wytworzyć z danej ilości biogazu w ciągu roku pracy instalacji przy wykorzystaniu  **Modelu biznesowego 1: Istniejące lub planowane biogazownie przyjmujące zmieszany strumień substratów.**

### Wytwarzanie ciepła

Produkcja wyłącznie ciepła z biogazu (tj. w kotle z pominięciem wytwarzania energii elektrycznej) jest najmniej atrakcyjną z ekonomicznego punktu widzenia opcją zagospodarowania wytworzonego paliwa (przynajmniej w warunkach europejskich, gdzie wsparcie kierowano raczej na produkcję en. elektrycznej). Biogaz może być kierowany do kotła gazowego. Wytworzone ciepło wykorzystywane jest na miejscu bądź sprzedawane lokalnym odbiorcom. Takie rozwiązania mogą mieć jednak uzasadnienie w sytuacji, gdy na miejscu występuje bardzo duże zapotrzebowanie na ciepło, np. do ogrzewania suszarni, szklarni, basenów, itp.

## Uzdatnianie biogazu do jakości gazu ziemnego

Surowy biogaz można uzdatniać do gazu o składzie i parametrach zbliżonych do gazu ziemnego (tzw. biometan). Uzdatnianie jest procesem polegającym głównie na usuwaniu dwutlenku węgla z mieszaniny wyjściowej<sup>2</sup> (co powoduje zwiększenie zawartości metanu w uzyskanym gazie) oraz oczyszczaniu z siarkowodoru, wilgoci oraz innych składników śladowych. Uzdatnianie pozwala dostosować parametry jakościowe biogazu do parametrów wysokometanowego gazu ziemnego.

Należy zaznaczyć, że uzdatnianie biogazu jest procesem stosunkowo kosztownym. Koszty porównywalne z kosztami układu CHP uzyskuje się dla instalacji ok. 2 MW<sub>e</sub> (odpowiednik) i większej. Z tego powodu układy uzdatniania biogazu zazwyczaj stosowane są przy instalacjach biogazowych w dużej skali (> 1 MW<sub>e</sub>) lub jeden układ obsługuje kilka sąsiadujących biogazowni.

Wybrane technologie uzdatniania biogazu to:

- skrubler wodny,
- płuczka aminowa,
- adsorpcja zmiennociśnieniowa (PSA),
- separacja kriogeniczna.

Zawartość metanu w uzyskiwanym gazie waha się w zależności od metody od 97 do 99 %.



**Rysunek 24.** Instalacja uzdatniania biogazu do jakości biometanu na zasadzie płuczki wodnej

Źródło: [63]

---

<sup>2</sup>biogaz to w ok. 60% CH<sub>4</sub> i 40% CO<sub>2</sub> oraz inne substancje śladowe

## Ścieżki wykorzystania biometanu

Biometan (uzdatniony biogaz) może być wtłaczany do lokalnej sieci gazowej lub wykorzystany jako paliwo napędowe do zasilania tzw. pojazdów NGV (ang. *natural gas vehicles* – pojazdy zasilane gazem ziemnym lub biometanem). W celu wykorzystania biometanu jako biopaliwa niezbędne jest jego sprężenie do wysokich ciśnień (rzędu 200-250 bar) – otrzymuje się wtedy zamiennik CNG (sprężonego gazu ziemnego) bądź skroplenie – otrzymuje się wtedy zamiennik LNG (skroplonego gazu ziemnego).

W Niemczech wprowadzanie biometanu do sieci gazowej jest coraz bardziej popularnym kierunkiem wykorzystania biogazu, co związane jest z polityką krajową (ustanowione cele ilościowe dotyczące wprowadzania biometanu do sieci). W Polsce, ze względu na zupełnie inną strukturę sieci gazowych dystrybucyjnych, możliwość wprowadzania do sieci jedynie biogazu rolniczego oraz koszty tego rozwiązania, wydaje się, że ten kierunek nie będzie się rozwijał zbyt dynamicznie.

Wykorzystanie biometanu jako paliwa do zasilania pojazdów jest szczególnie rozpowszechnione w Szwecji. Związane jest to przede wszystkim z niską opłacalnością produkcji energii elektrycznej i ciepła z biogazu oraz z brakiem sieci gazowej na przeważającym obszarze kraju. Ponadto polityka krajowa i regionalna promuje wykorzystanie paliw alternatywnych i biopaliw, zwłaszcza w transporcie publicznym.

W celu wykorzystania biometanu jako paliwa należy go sprężyć do wysokich ciśnień (200-250 bar) bądź schłodzić do temp. w której metan występuje w formie ciekłej (-162°C). Biometan można stosować jako paliwo w każdym pojeździe NGV. Najbardziej popularne zastosowania to autobusy komunikacji miejskiej oraz pojazdy osobowe. Obecnie najczęściej stosuje się postać sprężoną (CBM – *compressed biomethane*), co łączy się z mniejszym zasięgiem pojazdu na jednym tankowaniu (ok. 300-400km) w porównaniu z paliwami konwencjonalnymi. Dla pojazdów ciężkich odpowiedni jest biometan w postaci skroplonej (tzw. LBM – *liquified biomethane*), w której znacząco zwiększa się gęstość energetyczna paliwa, co pozwala na przejechanie podobnej ilości kilometrów na jednym baku jak w przypadku oleju napędowego.

W Polsce rozwój tego kierunku wykorzystania biogazu będzie zależny głównie od polityki krajowej i rozwoju rynku komplementarnego – pojazdów zasilanych CNG lub LNG. Pojazdy CNG mają ciągle marginalny udział w rynku samochodowym, a działania w kierunku rozwoju rynku pojazdów NGV są nieustrukturyzowane i wybiórcze. Najbardziej realnym scenariuszem wydaje się wdrożenie schematu, według którego biometan uzyskiwany z biogazowni na odpady komunalne będą tankować floty pojazdów komunalnych (związanych z gospodarką odpadami) oraz komunikacji publicznej. Takie zagospodarowanie biogazu z biodegradowalnej frakcji odpadów komunalnych może się już wkrótce okazać opłacalną alternatywą dla wytwarzania energii elektrycznej z OZE przy niepewnym poziomie wsparcia.



## 12. Zagospodarowanie masy pofermentacyjnej

### Kompostowanie pofermentu

W Niemczech w przypadku biogazowni działających w oparciu o bioodpady pochodzenia komunalnego stosuje się systemy kaskadowe. Masa pofermentacyjna (po separacji frakcji) z biogazowni poddawana jest kompostowaniu, czyli następuje recykling organiczny pofermentu. Może on być mieszany z odpadami zielonymi nienadającymi się ani do biogazowni ani do procesów spalania [41].

Poferment bezpośrednio po opuszczeniu komory fermentacyjnej charakteryzuje się zawartością suchej masy na poziomie 5-30%. Poddawany jest separacji na frakcję płynną 0,5-5% s.m. oraz stałą 20-35% s.m. (jeżeli poferment stanowi większą część wsadu do kompostowania musi być podsuszony do zawartości s.m. na poziomie około 50%, co stanowi optymalne warunki dla procesu kompostowania). Do odwadniania pofermentu stosuje się prasy lub wirówki czy dekantery, można go również podsuszać w suszarkach wykorzystujących ciepło odpadowe z biogazowni[41].

Frakcja o wyższej zawartości suchej masy kierowana jest do kompostowania. Stosuje się najczęściej kompostowanie pryzmowe. Proces tlenowego rozkładu masy organicznej przebiega w okresie 2-3 tygodni, w temperaturze 55-65°C. W trakcie kompostowania materiał pofermentacyjny ulega stabilizacji, dochodzi do rozkładu substancji, które nie uległy biodegradacji w czasie fermentacji metanowej. Poza tym, kompost można łatwiej magazynować i przechowywać w porównaniu do nieprzetworzonej masy pofermentacyjnej.

W przewodniku „*Otoczenie formalno prawne*” Przedsiębiorca znajdzie informacje dotyczące możliwości zagospodarowania masy pofermentacyjnej zgodnie z obecnymi przepisami prawa krajowego oraz planowanymi regulacjami na poziomie Unii Europejskiej.

Należy zwrócić uwagę, że poferment z odpadów kuchennych często generuje odory. W tym przypadku aktywne napowietrzanie kompostowanego materiału z mieszaniem przez 7 dni znacznie ogranicza ten problem [41].

W trakcie kompostowania dochodzi do higienizacji (aktywność mikroorganizmów podnosi temp. do ponad 60°C), co poprawia bezpieczeństwo stosowania produktu końcowego w celach nawozowych w rolnictwie.

Po procesie kompostowania w instalacjach kaskadowych następuje przesiewanie kompostu, najczęściej na sitach o boku oczka 10-20 mm. Wydzielona frakcja drobna może zostać przygotowana jako ziemia ogrodnicza. Frakcja grubsza może być wykorzystywana do celów rolniczych lub do rekultywacji. Frakcja nadsitowa kierowana jest do termicznego przekształcania [41].

Zastosowanie w celach nawozowych jest możliwe jedynie dla kompostów powstałych po procesie recyklingu organicznego odpadów selektywnie zbieranych. W Niemczech nawóz wyprodukowany z bioodpadów pochodzenia komunalnego z selektywnej zbiórki ma wartość rynkową rzędu 8 EUR Mg<sup>-1</sup>;

dla porównania materiał wytworzony z instalacji fermentacji opartej na odpadach zmieszanych (technologia MBP beztlenowa) nie ma wartości rynkowej.

W Unii Europejskiej dotychczas nie wdrożono kryteriów „*end of waste*” dla kompostu czy pofermentu. W 2012 roku przygotowany został w tym zakresie projekt regulacji. Oczekiwane jest europejskie prawodawstwo pod koniec 2014 roku [55].

## Pelety

Poferment po separacji frakcji można dalej przetwarzać. Dla frakcji stałej stosuje się dosuszanie oraz peletyzację. Uzyskane pelety stanowią materiał sypki, który łatwo można magazynować i transportować. Pelety mogą być stosowane jako polepszacz glebowy bądź jako paliwo. Znane są także jego zastosowania jako materiału ściółkowego w hodowli zwierząt.

Do suszenia pofermentu wykorzystuje się zazwyczaj trzy podstawowe typy suszarni: bębnową, fluidyzacyjną i taśmową [3]. Konieczna jest także inwestycja w linię do peletowania (granulacji), np. pelecniarkę tłokową.

W przypadku zastosowania peletów jako nawozu, dostępne są technologie wzbogacania o składniki mineralne, aby podnieść wartość nawozową. Są to jednak metody wymagające dalszych badań.

Według danych niemieckich wartość energetyczna peletów waha się w zakresie 12,6-14,4 MJ kg<sup>-1</sup> [68]. Badania przeprowadzone w Polsce na zlecenie BioAllians na Wydziale Inżynierii Produkcji i Energetyki Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, wykazały, że pelety uzyskane z pofermentu z biogazowni rolniczej miały wartość energetyczną w zakresie 14,8-17,6 przy wilgotności 3,6-12% [3]. W procesach spalania pelety z pofermentu wykazały podobne właściwości jak pelety ze słomy zbożowej.

## Hydrokarbonizacja

Poferment może być także wykorzystany do wytwarzania biowęgla w procesie hydrotermalnej karbonizacji. [W źródle 57] opisano badania na masie pofermentacyjnej z biogazowni rolniczych działającej w oparciu o kiszonkę kukurydzy. Ustalono, że osad pofermentacyjny o wysokim stopniu uwodnienia może być poddany hydrotermalnej karbonizacji z zachowaniem wysokiej efektywności energetycznej procesu. W temperaturze 190°C z uwodnionego pofermentu uzyskano biowęgiel o koncentracji węgla na poziomie 59-62%. Stosunek C:H wyniósł 1,29-1,35, a ciepło spalania wahało się w zakresie 25,2-27 MJ kg<sup>-1</sup>. Wydajność procesu kształtowała się na poziomie 73-83% w zależności od warunków pH. Dla wyższych temp. 230 i 270°C znacząco spadała wydajność procesu (46-60% dla 230°C oraz 35-41% dla 270°C), natomiast otrzymywany biowęgiel miał wyższą wartość opałową (30-35 MJ kg<sup>-1</sup>).

## Literatura

1. Bernstad A., Malmquist C., Truedsson J., la Cour Jansen (2012) Need for improvements in physical pretreatment of source-separated household food waste. Waste Management <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2012.06.012>
2. Billund Water <http://ing.dk/artikel/billund-vand-har-lavet-biogas-af-madaffald-i-15-ar-127927> (sierpień 2013)
3. BioAlians (2013), Zagospodarowanie substancji pofermentacyjnej z biogazowni rolniczych.
4. BIOEXELL Training Manual: Biogas from AD. Raport z projektu BIOEXCELL – European Biogas Centre of Excellence. [http://www.eac-quality.net/fileadmin/eac\\_quality/user\\_documents/3\\_pdf/Biogas\\_from\\_AD\\_-\\_Training\\_manual.pdf](http://www.eac-quality.net/fileadmin/eac_quality/user_documents/3_pdf/Biogas_from_AD_-_Training_manual.pdf) (sierpień 2013).
5. BIOFerm, <http://www.biofermenergy.com/bioferm-system/> (sierpień 2013)
6. Biogas from AD - BIOEXELL Training Manual. Wydane w ramach projektu BIOEXELL. [http://web.sdu.dk/bio/Bioexcell/Down/Bioexcell\\_manual.pdf](http://web.sdu.dk/bio/Bioexcell/Down/Bioexcell_manual.pdf)
7. Biogas- und Kompostwerk Bützberg (BKW Bützberg) – brochure. URL: <http://www.stadtreinigung-hh.de/srhh/export/sites/srhh/download/PDF/BroschuereBuetzberg11-11.pdf>
8. BiomasseV 2012. Niemieckie Rozporządzenie o biomasie z dn. 21 lipca 2001 r. Dz.U. cz. Is. 1234(BGBl. I S. 1234) (2012), ostatnia zmiana z dn. 24. lutego 2012 Dz.U. cz. Is. 212 (BGBl. I S. 212). URL: <http://www.gesetze-im-internet.de/>
9. Bouallagui H., Lahdheb H., Romdan E., Rachdi B., Hamdi, M. (2009). Improvement of fruit and vegetable waste anaerobic digestion performance and stability with co-substrates addition. J. Environ. Manage. 90:1844–1849.
10. Brummeler, E.,(2000) Full scale experience with the BIOCEL process. Water Science and Technology 41 (3): 299-304.
11. BuschG., Großmann J., Sieber M. and M. Burkhardt (2008) A New and Sound Technology for Biogas from Solid Waste and Biomass. Water, Air, & Soil Pollution: Focus© Springer Science+Business Media B.V. 200810.1007/s11267-008-9195-5.
12. Carlsson M., Lagerkvist A., Morgan-Sagastume F. (2012) The effects of substrate pretreatment on anaerobic digestion systems: A review. Waste Management 32 (2012) 1634–1650.
13. Cecchi, F., Mata- Alvarez, J., Pavan, P., Sans, C., and Merli, C. (1992) Semidry anaerobic digestion of MSW – influence of process parameters on the substrate utilization model. Water Science And Technology 25 (7), 83-92.
14. Chavez-Vazquez M., Bagley D. Evaluation of the performance of different anaerobic digestion technologies for solid waste treatment,

[http://gis.lrs.uoguelph.ca/agrienvarchives/bioenergy/download/an\\_dig\\_u\\_toronto\\_2000.pdf](http://gis.lrs.uoguelph.ca/agrienvarchives/bioenergy/download/an_dig_u_toronto_2000.pdf)  
(sierpień 2013)

15. Curkowski A., Oniszk-Popławska A., Mroczkowski P., Zowsik M., Wiśniewski G. (2011) Poradnik dla inwestorów zainteresowanych budową biogazowni rolniczych. Instytut Energii Odnawialnej. Pracę wykonano na zamówienie Ministerstwa Gospodarki.
16. de Baere, L. and Mattheeuws, B. (2008) State-of-the-art2008. Anaerobic digestion of solid waste. Waste Management World 9 (4).
17. De Baere L. and Mattheeuws L. (2010) Anaerobic digestion of MSW in Europe. BioCycle Energy, February 2010.
18. den Boer E., den Boer J., Szpadt R. (2011) Solid Waste Management. Environmental Engineering, Environmental Quality Management. Wrocław University of Technology.
19. Dong L., Zhenhong Y., Yongming S., Xiaoying K., Yu Z. (2009) Hydrogen production characteristics of organic fraction of municipal solid wastes by anaerobic mixed culture Poferemention. Int. J. Hydr. Energy 34: 812–820.
20. Dunkelberg E., Aretz A., Böther T., DieterichM., Heintschel S. &Ruppert-Winkel C. (2011). Working Paper 05 – 2011 Leitfadenfür die Nutzungkommunaler, halmgutartiger Reststoffe in Mikrobiogasanlagen und Bestandsanlagen.
21. Edelmann, W. and Engeli, H., 2005. Key note lecture on congress: Anaerobic digestion of solid waste (ADSW2005). Copenhagen: Aug. 31\_Sept.3, 2005. Available online at: <http://www.arbi.ch/ADsw.pdf>
22. Fantozzi F., Buratti C. (2011) Anaerobic digestion of mechanically treated OFMSW: Experimental data on biogas/methane production and residues characterization Bioresource Technology 102 (2011) 8885–8892.
23. Forster-CarneiroT.,PérezM.,RomeroL.I. , SalesD.(2007)Dry-thermophilic anaerobic digestion of organic fraction of the municipal solid waste: Focusing on the inoculum sources. Bioresource Technology 98(17):3195-3203.
24. Forster-Carneiro T., Pérez M., Romero L. I. (2008)Anaerobic digestion of municipal solid wastes: Dry thermophilic performance. Bioresource Technology 99(17): 8180-8184.
25. Fruteau de Laclos, H., Desbois, S. and Saint\_Joly, C., 1997. Anaerobic digestion of municipal solid organic waste: Valorga full\_scale plant in Tilburg, the Netherlands. Water Science and Technology, Vol. 36 (6–7): 457–462.
26. Geveke J. (2011). Gras in Biogasanlagen – Erfahrungen aus der Praxis.Materiały konferencyjne: Energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial 1-2marca 2011, Berlin.
27. Głodek E. (2010) Biogazownie utylizacyjne. Przewodnik. Instytut Ceramiki i Materiałów Budowlanych. Opole.



28. Hamzawi N., Kennedy K. J., McLean D.D. (1999) Review of applications of high-solids anaerobic digestion to solid waste management. *Journal of solid waste technology and management* 26 (3), 119-132.
29. Hanc A., Novak P., Dvorak M., Habart J., Svehla P. (2011) Comparison and parameters of household bio-waste in four seasons. *Waste Management* 31:1450-1460.
30. Hansen TL., Jansesn J., Davidsson A., Christensen T.H. (2007) Effects of pre-treatment technologies on quantity and quality of source-sorted municipal organic waste for biogas recovery. *Waste Management* 27:398-405.
31. Hartmann H. (2002) Anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste with recirculation of process water. PhD Thesis. Environmental Microbiology & Biotechnology Research Group. BioCentrum-DTU. Technical University of Denmark.
32. Hartmann H., Angelidaki I., Ahring B.K. (2003) Co-digestion of the organic fraction of municipal waste with other waste types. In: *Biomethanization of the organic fraction of municipal solid wastes* (ed. Mata- Alvarez, J.), pp. 181-200. IWA Publishing.
33. Hartmann H., Ahring B. K. (2005) A novel process configuration for anaerobic digestion of source-sorted household waste using hyper-thermophilic post-treatment. *Biotechnology and Bioengineering* 90(7): 830-837.
34. Hartmann H., Ahring B.K. (2007) Strategies for the anaerobic digestion of the organic fraction of municipal solid waste: an overview. *Water Science and Technology* 53(8):7-22.
35. Hofmann H. Kern M. (2011). Weiterentwicklung der stofflichen und energetischen Verwertung von Biomasse beim Zweckverband regionale Abfallwirtschaft. Praca Witzenhausen-Institut.
36. IOC 2013: Indian Ocean Commission. <http://environment.ioconline.org/solid-waste-management/anaerobic-treatment-of-organic-waste.html> (10.08.2013)
37. Karagiannidis G., Perkoulidis (2009) A multi-criteria ranking of different technologies for the anaerobic digestion for energy recovery of the organic fraction of municipal solid wastes. *Bioresource Technology* 100 (8) 2355-2360.
38. Karthikeyan O.P., Visvanathan C. (2012) *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* © Springer Science+Business Media Dordrecht 2012 10.1007/s11157-012-9304-9 Reviews Bio-energy recovery from high-solid organic substrates by dry anaerobic bio-conversion processes: a review.
39. Kayhanian M. (1999) Ammonia Inhibition in High-Solids Biogasification: An Overview and Practical Solutions. *Environmental Technology* 20 (4), 355-366.
40. Kehres B. (2011). Optimierung der Verwertung von Grünabfällen – Fehlsteuerungen korrigieren. *Materiale konferencyjne: Energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial 1-2marca 2011*, Berlin.
41. Kern M., Raussen T., Funda K., Lootsma A., Hofmann H. (2010). Aufwand und Nutzeneiner optimierten Bioabfallverwertung hinsichtlich Energieeffizienz, Klima- und



Ressourcenschutz. Witzenhausen-Institut für Abfall, Umwelt und Energie GmbH na zlecenie Umweltbundesamt. UBA: Dessau-Roßla. ISSN 1862-4804 URL: <http://www.uba.de/uba-info-medien/4010.html>

42. Khalid A., Arshad M., Anjum M., Mahmood T., Dawson L. (2011) Review: The anaerobic digestion of solid organic waste. *Waste Management* 31: 1737–1744.
43. Kompogas, <http://www.axpo.com/axpo/bg/en/group/axpo-gesellschaften/axpo-kompogas-ag.html> (sierpień 2013)
44. Koppa, A. and Pullammanappallil, P. (2008) Single-stage, batch, leach-bed, thermophilic anaerobic digestion of spent sugar beet pulp. *Bioresource Technology* 99 (8): 2831-2839.
45. KTBL Biogasrechner.  
URL:<http://daten.ktbl.de/biogas/showSubstrate.do?zustandReq=18#anwendung>
46. Kübler, H., Hoppenheidt, K., Hirsch, P., Kottmair, A., Nimmrichter, R., Nordsieck, H., Mücke, W. and Swerev, M., 2000. Full scale co-digestion of organic waste. *Water Science and Technology*. Vol. 41 (3): 195\_202.
47. Kuglarz M., Karakashev D., Angelidaki I. (2013) Microwave and thermal pretreatment as methods for increasing the biogas potential of secondary sludge from municipal wastewater treatment plants, *Bioresource Technology* (2013), doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2013.02.001>
48. Lakner S., Stegner J., Kleinknecht U., Fleischer K. (2011). Wirtschaftlichkeit der energetischen Nutzung von Landschaftspflegematerial in Sachsen. *Materiały konferencyjne: Energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial 1-2 marca 2011*, Berlin.
49. Lehmann T. (2011). Maximale Erträge durch hydrothermalen Aufschluß – Bioextrusion®. *Materiały konferencyjne: Energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial 1-2. marca 2011*, Berlin.
50. Lesteur i in., 2010). Dodatkowo wsad musi zostać scharakteryzowany pod względem możliwości uzyskania biometanu. W przypadku bioodpadów z gospodarstw domowych, najważniejszym składnikiem z punktu widzenia procesu fermentacji są węglowodory (Dong i in., 2009).
51. Lim J., Wang J., Enhanced hydrolysis and methane yield by applying microaeration pretreatment to the anaerobic co-digestion of brown water and food waste, *Waste management*, ISSN 0956-053X, №. 4, 2013 , pp. 813-819
52. Lissens G., Vandevivere P., De Baere L., Biey E.M., Verstraete W. (2001) Solid waste digestors: process performance and practice for municipal solid waste digestion. *Water Science and Technology* Vol 44 No 8 pp 91–102 © IWA Publishing 2001.
53. Liu X., Wang W., Gao X., Zhou Y., Renjie S. (2012) Effect of thermal pretreatment on the physical and chemical properties of municipal biomass waste. *Waste Management* 32 (2012) 249-255.

54. Luning, L., van Zundert, E.H.M., and Brinkmann, A.J.F. (2003) Comparison of dry and wet digestion for solid waste. *Water Science and Technology* 48 (4): 15-20.
55. European Environment Agency (2013). *Managing municipal solid waste — a review of achievements in 32 European countries*. Wydawca: EEA Kopenhaga. ISBN 978-92-9213-355-9.
56. Mostostal <http://www.mostostal.waw.pl/page/56/320/Realizacje/Budowa-Zakladu-Zagospodarowania-Odpadow-w-Bialej-Podlaskiej/> (październik 2013)
57. Mumme J., Eckervogt L., Pielert J., Diakité M., Rupp F., Kern J. (2011) Hydrothermal carbonization of anaerobically digested maize silage. *Bioresource Technology* 102:9255-9260.
58. Nichols, C.E. (2004) Overview of anaerobic digestion technologies in Europe. *BioCycle* 45 (1): 47.
59. Nordberg, A. and M. Edström (2005) Co-digestion of energy crops and the source-sorted organic fraction of municipal solid waste. *Water Science Tech* 52 (1-2): 217-222.
60. Novarino D., Zanetti M.C. (2012) Anaerobic digestion of extruded OFMSW. *Bioresource Technology* 104 (2012) 44–50.
61. Nayono S.E. (2010) *Anaerobic digestion of organic solid waste for energy production* *Karlsruher Berichte zur Ingenieurbiologie*. *Karlsruher Berichte zur Ingenieurbiologie Band 46* Institut für Ingenieurbiologie und Biotechnologie\_ des Abwassers Karlsruher Institut für Technologie (KIT). KIT Publishing. ISSN: 0172-8709, ISBN: 978-3-86644-464-5
62. Nizami, A., Murphy, J.D. (2011) Optimizing the operation of a two-phase anaerobic digestion system digesting grass silage. *Environ. Sci. Technol.* 45:7561–7569.
63. Oekobit, <http://www.oekobit-biogas.com/pl> (październik 2013)
64. Orozco A.M., Nizami A.S., Murphy J.D., Groom E. (2013) Optimizing the thermophilic hydrolysis of grass silage in a two-phase anaerobic digestion system. *Bioresource Technology* 143:117–125.
65. OWS. <http://www.ows.be/biogas-plants/references/> (sierpień 2013)
66. Pavan, P., Battistoni, P., Cecchi, F., Mata-Alvarez, J. (1999a) Two-phase anaerobic digestion of source-sorted OFMSW: performance and kinetic study. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste*, held in Barcelona, June 15-17, 1999 (eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. 1, pp. 91-98, *Int. Assoc. Wat. Qual.*
67. Pavan, P., Battistoni, P., Mata-Alvarez, J. (1999b) Performance of thermophilic semi-dry anaerobic digestion process changing the feed biodegradability. In *II Int. Symp. Anaerobic Dig. Solid Waste*, held in Barcelona, June 15-17, 1999 (eds. J. Mata-Alvarez, A. Tilche and F. Cecchi), vol. 1, pp. 57-64, *Int. Assoc. Wat. Qual.*

68. Projects energy (2009). Studie zum Biomassepotential in der Freien und Hansestadt Hamburg Landwirtschaftskammer Hamburg. Praca na zlecenie Lanwirtschaftskammer Hamburg.
69. Rapport J., Zhang R., Jenkins B.M., Williams R.B. (2008) Current Anaerobic Digestion Technologies Used for Treatment of Municipal Organic Solid Waste. Report for the Integrated Waste Management Board. Californian Environmental Protection Agency.
70. Sawayama S., Tada C., Tsukahara K., Yagishita T. (2004) Effect of ammonium addition on methanogenic community in a fluidized bed anaerobic digestion. J.Biosci. Bioen. 97: 65–70.
71. Shahriari H., Warith M., Hamoda M., Kennedy KJ. (2011) Anaerobic digestion of organic fraction of municipal solid waste combining two pretreatment modalities, high temperature microwave and hydrogen peroxide. Waste Management 32:41-52.
72. Schmidt F. (2011). Optimierung der nachhaltigen Biomassebereitstellung von repräsentativen Dauergrünlandtypen für die Biogasproduktion. Materiały konferencyjne: Energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial 1-2. marca 2011, Berlin.
73. Sysav Biotec AB (2009). From food waste to new resources Sysav's pre-treatment plant for food waste. November 2009.
74. Szpadt R., Jędrzak A. (2008) Wytyczne dotyczące wymagań dla procesów kompostowania, fermentacji i mechaniczno-biologicznego przetwarzania odpadów (według stanu prawnego na dzień 15 grudnia 2008 r.) Ministerstwo Środowiska, Departament Gospodarki Odpadami.
75. Tonn B., Messner J. (2011). Qualitative Eignung von Extensivgrünland-Aufwüchsen für Verbrennung und Vergärung in Abhängigkeit von botanischer Zusammensetzung und Schnittzeitpunkt. Materiały konferencyjne: Energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial 1-2 marca 2011, Berlin.
76. Trzciński, A.P. (2009) Technology Research and Innovation Fund Project Report. The use of membrane bioreactors in the anaerobic digestion of the biodegradable fraction of municipal solid waste (PhD Thesis). Imperial College London.
77. Valorga International. <http://www.valorgainternational.fr/en/> (sierpień 2013)
78. Vandevivere P., De Baere L., Verstraete W. (2002) Types of anaerobic digesters for solid wastes. In: Biomethanization of the Organic Fraction of Municipal Solid Wastes (e.d. Mata-Alvarez J.). IWA Publishing.
79. Velis C.A., Longhurst P.J., Drew G.H., Smith R., Pollard S.J.T. (2009) Biodrying for mechanical–biological treatment of wastes: A review of process science and engineering Bioresource Technology 100: 2747–2761.
80. Verma, S. (2002). Anaerobic digestion of biodegradable organics in municipal solid wastes. Earth Resources Engineering. New York, Columbia University: 56.
81. Walny M. (2012) Kalkulacja kosztów odbioru, transportu i unieszkodliwiania odpadów komunalnych w warunkach rozwiązań ustawowych zgodnych z treścią nowelizacji ustawy o

utrzymaniu czystości z dnia 01.07.2011 Zjazd Krajowego Forum Dyrektorów Zakładów Oczyszczania Miast.

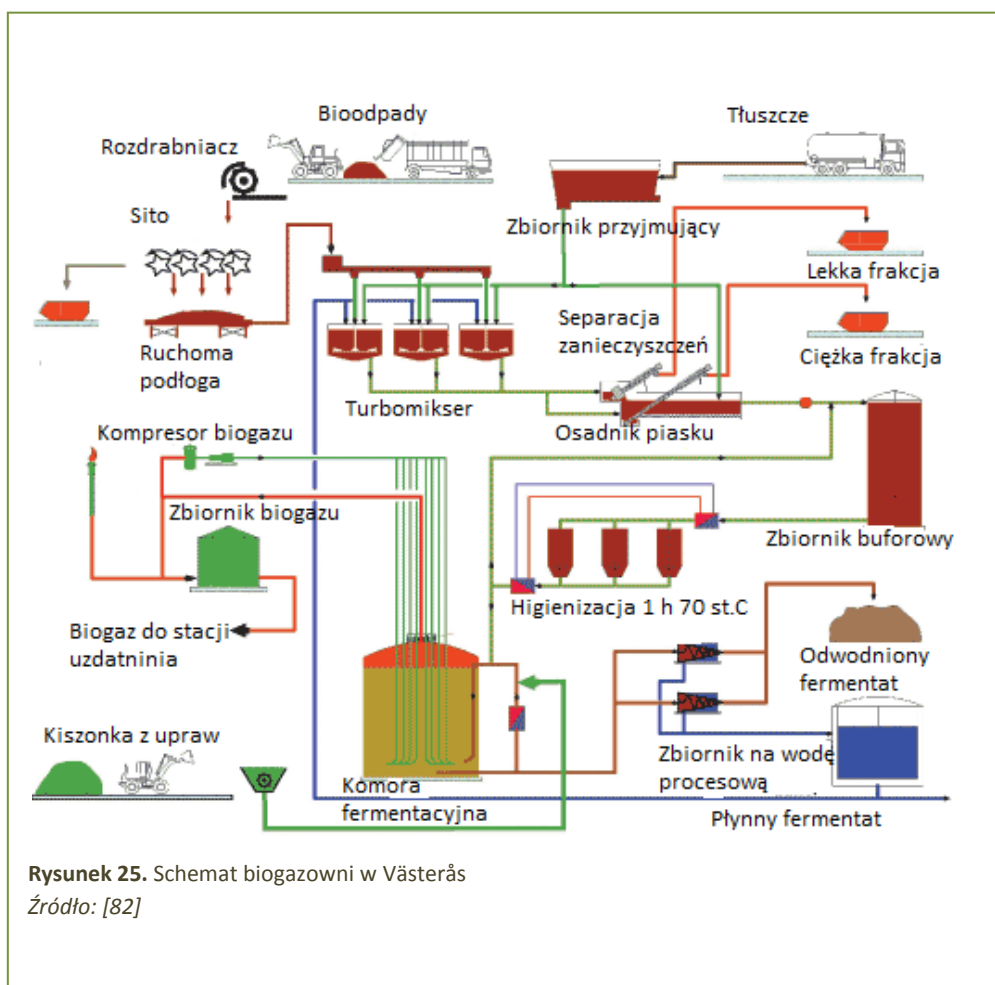
82. Waste Management World. [http://www.waste-management-world.com/topics/biogas-plant.htm?start=10&mc\\_article=112&mc\\_Text=21&mc\\_print+article=15](http://www.waste-management-world.com/topics/biogas-plant.htm?start=10&mc_article=112&mc_Text=21&mc_print+article=15) (sierpień 2013)
83. Weiland, P. (1992) One- and two-step anaerobic digestion of solid agroindustrial residues. In Proc. Int. Symp. on Anaerobic Digestion of Solid Waste, held in Venice, 14-17 April, 1992, (eds. F. Cecchi, J. Mata-Alvarez and F.G. Pohland), pp. 193-199, Int. Assoc. on Wat. Poll. Res. and Control.
84. Weiland P. (2006) State of the art of solid-state digestion—recent developments. W: Rohstoffe, F.N. (Ed.), Solid-State Digestion—State of the Art and Further R&D Requirements 24: 22–38.
85. Williams R. B., Jenkins B. M., D. Nguyen (2003) Solid Waste Conversion: A review and database of current and emerging technologies. FINAL REPORT. University of California Davis.
86. Wimmer W., Huber M., Pamminer R. (2009). 62/2009. Erstellung eines Logistikkonzepts zur effizienten Sammlung von biogenen Abfällen als Input für eine energetische Nutzung in Biogasanlagen. Raport w ramach programu: Energiesysteme der Zukunft.
87. WRAP (2012). A survey of the UK organics recycling industry in 2010. A report on the structure of the UK organics processing/recycling sector and the markets for its outputs. URL: <http://www.wrap.org.uk/sites/files/wrap/ASORI%20Final%20Report%202010%20v2.pdf>
88. Zaher, U., Li R., Jeppsson U., Steyer J., Chen S. GISCOD: General Integrated Solid Waste Co-Digestion model, Water Research 01/2009.
89. Zeshan (2012) Dry anaerobic digestion of municipal solid waste and digestate management strategies. Asian Institute of Technology School of Environment, Resources and Development. Thailand. December 2012.
90. Zigl drum P. (2011). Langfassung Konferenzbeitrag. Gas aus Gras – Biologie der Grasvergärung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Materiały konferencyjne: Energetische Nutzung von Landschaftspflegematerial 1-2 marca 2011, Berlin.

## Załącznik 1: Przykłady instalacji fermentacji na bioodpady pochodzenia komunalnego

### Biogazowania w Västerås, Szwecja

Instalacja pracuje na potrzeby miasta Västerås, została uruchomiona w 2005 r. Przetwarza 14.000 Mg odpadów kuchennych z gospodarstw domowych i gastronomicznych z punktów zbiorowego żywienia oraz dodatek innych bioodpadów: 4.000 Mg tłuszczów z osadników 5.000 Mg specjalnie uprawianych roślin motylkowych (300 ha). Ok. 90% mieszkańców segreguje bioodpady kuchenne i zielone na potrzeby biogazowni w papierowe worki. Odpady z restauracji i punktów zbiorowego żywienia są zbierane w postaci ciekłej do zbiorników i cysternami przewożone do biogazowni. Rośliny uprawiane na potrzeby biogazowni są koszone sieczkarką samobieźną, a zebrana biomasa w formie kiszonki przechowywana jest w foliowych tunelach.

W biogazowni zastosowano technologię przygotowania odpadów ulegających biodegradacji oraz technologię fermentacji dostarczoną przez firmę ROSROCA.



Selektywnie zbierane bioodpady są wyładowywane z pojazdów w hali dostaw. Następuje hydro-mechaniczna obróbka wstępna. Dostarczony materiał jest upłynniony wodą procesową i mieszany w trzech turbomikserach do postaci pulpy (10% suchej masy). Następnie pulpa hydraulicznie przechodzi przez układ zgarniaczy (usuwających pływające na powierzchni kawałki tworzyw sztucznych, drewna i



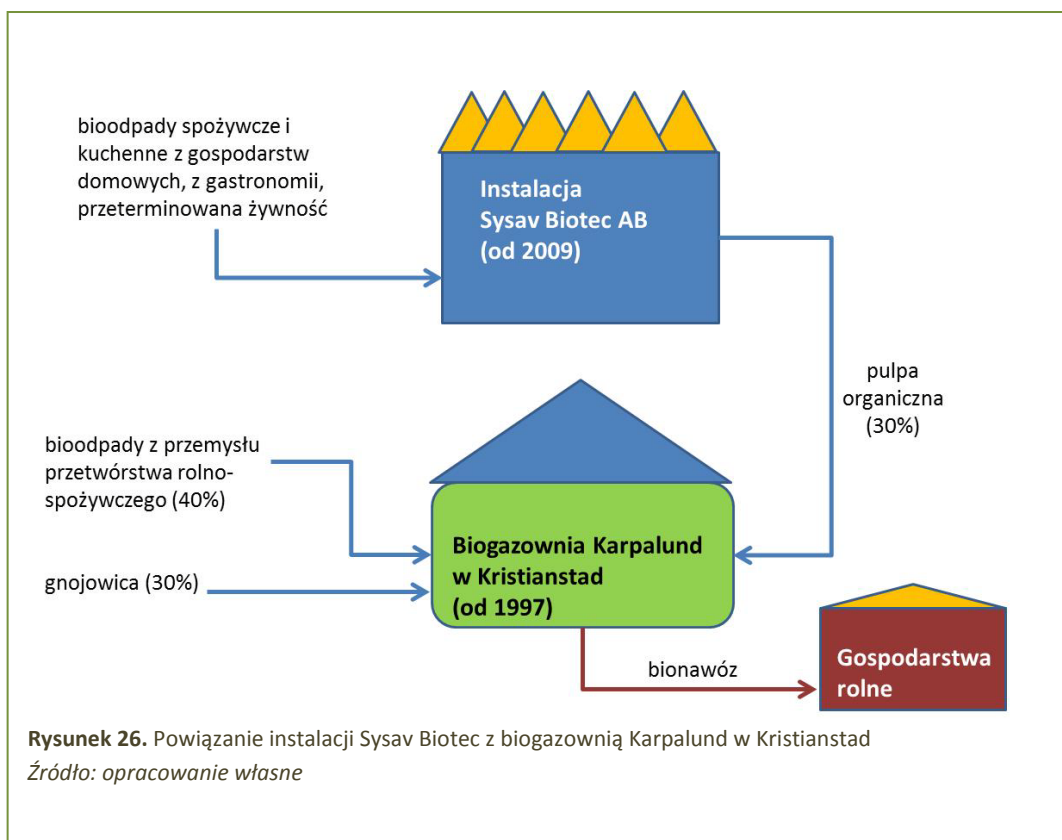
innych lekkich materiałów) oraz przez separatory piasku, gdzie oddzielone zostają cięższe zanieczyszczenia, takie jak piasek, szkło, kamienie, kości. Kolejnym etapem jest przejście zawiesiny przez układ maceracji, dzięki czemu wielkość cząstek nie jest większa niż 12 mm. Po przejściu przez zbiornik buforujący pulpa poddawana jest higienizacji w jednym z trzech zbiorników higienizacyjnych, gdzie przetrzymywana jest w temp. 70°C przez godzinę (zwykle jeden ze zbiorników jest napełniany, podczas gdy w drugim trwa higienizacja, a trzeci jest opróżniany). Do higienizacji wykorzystywane jest odpadowe ciepło z układu kogeneracyjnego zasilanego biogazem. Bezpośrednio po higienizacji pulpa jest przepompowywana do komory fermentacyjnej o objętości 4.000 m<sup>3</sup>, gdzie zachodzi fermentacja mezofilowa (temp. 37°C). Czas retencji wynosi 20 dni. Komora fermentacyjna nie jest wyposażona w mieszadła – mieszanie odbywa się pod wpływem wprowadzania do komory sprężonego biogazu.

Biogaz produkowany jest z wydajnością 250-350 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> a następnie jest sprężany. Część gazu jest zawracana do komory fermentacyjnej w celu mieszania. Biogaz jest poddany procesom uzdatniania do jakości gazu ziemnego i wykorzystywany jako paliwo dla transportu, nadwyżka wykorzystywana jest na miejscu w biogazowni w układzie kogeneracyjnym. Produkcja biogazu to równoważnik 150.000 MWh rocznie.

Poferement jest odwadniany za pomocą wirówki. Frakcja stała stosowana jest jako nawóz, który może być wykorzystany na potrzeby rolnictwa. Otrzymuje się 6500 Mg nawozu w formie stałej (25-30% s.m.) oraz 15.000 Mg nawozu płynnego (2-5% s.m.)

#### **Instalacja Sysav do wstępnej obróbki odpadów oraz biogazownia w Kristianstad, Szwecja**

Instalacja wstępnego przetwarzania odpadów spożywczych i kuchennych należy do Sysav Biotec AB. Została uruchomiona w 2009 r. w regionie Skania w południowej Szwecji. Zakład przetwarza odpady spożywcze i kuchenne do postaci pompowalnej pulpy. Otrzymany produkt jest cysternami przewożony do biogazowni w Kristianstad.



Do zakładu wstępnego przetwarzania bioodpadów dostarczane są trzy typy odpadów:

- odpady spożywcze i kuchenne, takie jak np. z separatorów tłuszczu z restauracji, w formie półpłynnej,
- pakowane odpady spożywcze, takie jak np. soki i mleko w kartonach, dostarczane na paletach,
- sortowane selektywnie resztki żywności z gospodarstw domowych, restauracji i punktów zbiorowego żywienia.

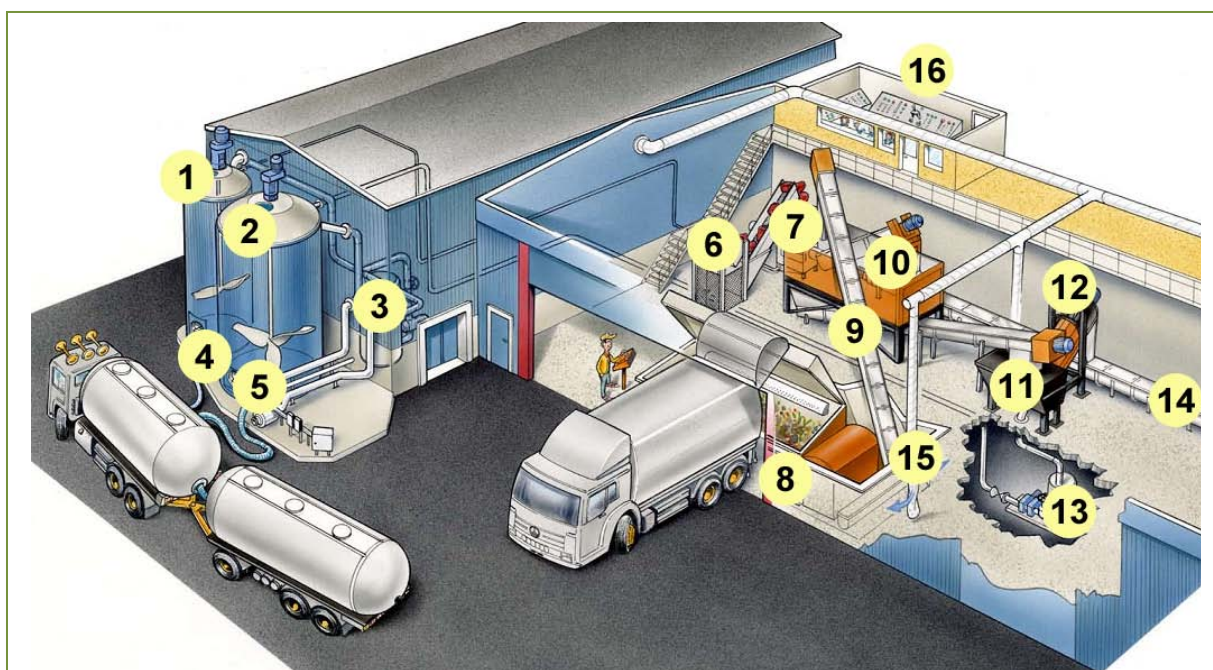
Zastosowano technologię przygotowania bioodpadów dostarczoną przez firmę PURAC. W zakładzie są trzy linie technologiczne – dwie do obróbki ciekłych bioodpadów, jedna do obróbki odpadów stałych.

Ciekle bioodpady przywożone są cysternami i są przepompowywane do zbiornika przyjmującego o pojemności 65 m<sup>3</sup>. Zbiornik jest izolowany i wyposażony w mieszadła, separator piasku zapobiega dostaniu się żwirów i piasków do zbiornika. Odpady w opakowaniach – papierowych lub tworzywowych – muszą mieć formę płynną. Przechodząc partiami przez ekstruder (prasę tłokową), opakowania są przebijane i zgniatane. Ciecz jest wyciskana i wypływa do zbiornika zbierającego, skąd przepompowywana jest do zbiornika przyjmującego. Zgniecione opakowania przeznaczone są do spalania w zakładzie termicznego przekształcania wraz z innymi odpadami.

Selektywnie zbierane odpady kuchenne (w papierowych torbach) są rozładowywane z pojazdów bezpośrednio do szczelnego zbiornika podziemnego. Za pomocą przenośnika ślimakowego odpady są transportowane do układu, gdzie są rozdrabniane przy użyciu młynów bębnowych. Następnie kolejnym przenośnikiem ślimakowym odpady są transportowane do układu mieszającego, gdzie ulegają homogenizacji w celu utworzenia jednolitej mieszaniny. Następnym etapem jest przejście masy organicznej przez ekstruder śrubowy. Gęsta pulpa jest wyciskana przez otwory cylindra na zewnątrz. Pozostała frakcja stała jest przeznaczona do termicznego przekształcania. Pulpa, która jest ostatecznym produktem powstającym w tym zakładzie, jest zbierana w buforowym zbiorniku o pojemności 200 m<sup>3</sup>. Zbiornik jest izolowany i wyposażony mieszadła, które mają zapobiegać sedymentacji.

W celu ograniczenia uciążliwości odorowej, zakład wyposażony jest w dozowniki jonizowanego powietrza. Dozowniki umieszczone są przy zbiornikach, do których rozładowywane są odpady i przy pozostałych urządzeniach.

Docelowym odbiorcą wstępnie przetworzonych bioodpadów będzie regionalna biogazownia, planowana w pobliżu Malmö. Ponieważ instalacja jeszcze nie powstała, od dwóch lat odpady te wykorzystuje instalacja Karpalund, zlokalizowana w Kristianstad (ok. 60 km od Malmö).



**Rysunek 27.** Ogólny schemat działania zakładu Sysav Biotec AB

Objaśnienia do schematu: 1- zbiornik przyjmujący, 2 - zbiornik buforujący, 3 - zbiornik pośredni, 4 - zasysanie powietrza w czasie opróżniania/napełniania cysterny, 5 - opróżniania/napełniania cysterny, 6 - opróżnianie palet, 7 - prasa tłokowa, 8 - kontener przyjmujący, 9 - przenośnik taśmowy, 10 - rozdrabniacz, 11 - układ mieszający, 12 - ekstruder śrubowy, 13 - zbiornik na pulpę organiczną, 14 - przenośnik frakcji przeznaczonej do spalania, 15 - dyfuzor powietrza zjonizowanego, 16 - pokój kontrolera.

Źródło: [73]

Instalacja biogazowa w Kristianstad działa od 1997 r. i jest zarówno jedną z pierwszych, jak i największych (po rozbudowie w 2006 r.) biogazowni w Szwecji. W 2011 r. wyprodukowano w niej biogaz w ekwiwalencji energetycznej 41.000 MWh. Instalacja przetwarza rocznie ok. 85.000 ton odpadów, z czego jedynie 30% to odpady kuchenne z gospodarstw domowych. Blisko 40% to odpady z przemysłu spożywczego (35% stanowią odpady z rzeźni). Pozostałe 30% wsadu to gnojowica pozyskiwana z okolicznych gospodarstw rolnych, która uzupełnia wsad mikroelementami, stabilizując go i zwiększając uzysk biogazu. Okoliczne gospodarstwa rolne są odbiorcami zasadniczego produktu ubocznego biogazowni – nawozu (osadu pofermentacyjnego).

Uzslachetniony biogaz (biometan), o parametrach jakościowych gazu ziemnego, wykorzystywany jest głównie jako paliwo transportowe zasilające stację tankowania autobusów komunikacji miejskiej (wszystkie autobusy, w sumie 28, w Kristianstad jeżdżą na biometanie) oraz dwie publiczne stacje tankowania (ok. 250 pojazdów). Nadmiar biogazu spalany jest w układzie CHP w lokalnej elektrociepłowni Allöverket, łącznie z biogazem pozyskiwanym z zamkniętego już składowiska odpadów. Elektrociepłownia bazuje głównie na biomase stałej (drewno odpadowe z lasów, przemysłu drzewnego i z odzysku), a energia wytwarzana z biogazu to ok. 5% produkcji.



### Biogazownia w Calais, Francja

Instalacja uruchomiona w 2007 r. przetwarza 27.000 Mg sortowanych u źródła bioodpadów oraz 1.000 Mg tłuszczu w ciągu roku. Instalacja obejmuje moduł do mechanicznego sortowania, komorę fermentacyjną działającą w oparciu o technologię VALORGA, układ do dojrzewania kompostu. Instalacja posiada jedną komorę fermentacyjną o objętości 3 100 m<sup>3</sup>. Proces przebiega w warunkach termofilowych, a hydrauliczny czas retencji wynosi 25 dni. Uzysk biogazu kształtuje się na poziomie 110-120 m<sup>3</sup> Mg<sup>-1</sup> wsadu. Instalacja wyposażona jest w układ CHP o mocy elektrycznej 944 kW<sub>e</sub>.

### Biogazownia w Bassano del Grappa, Włochy

Biogazownia została uruchomiona w 2003 r. i powstała jako jeden z elementów zintegrowanego systemu odzysku surowców i energii z odpadów komunalnych w regionie Bassano. Początkowo instalacja bazowała na zmieszanych odpadach komunalnych. Jednak wprowadzenie w kolejnych latach systemu regularnej selektywnej zbiórki odpadów kuchennych i zielonych z posesji umożliwiło zmianę w systemie działania biogazowni. W skład instalacji wchodzi trzy betonowe, cylindryczne komory fermentacyjne o objętości 4200 m<sup>3</sup> każda. Do jednej komory fermentacyjnej kierowane są biodegradowalne odpady wyodrębnione ze zmieszanych odpadów komunalnych, do dwóch pozostałych komór trafiają selektywnie zbierane odpady kuchenne i odpady zielone. Cała instalacja przetwarza około 44200 Mg odpadów zmieszanych oraz 8200 Mg bioodpadów selektywnie zbieranych plus ok. 3.000 Mg osadów ściekowych [77].

Odpady kuchenne zbierane są przez mieszkańców w specjalne ulegające biodegradacji worki. Przywożone do zakładu odpady przechodzą przez separator optyczny i separator magnetyczny, a następnie kierowane są do rozdrabniacza. Wydzielone zanieczyszczenia kierowane są do spalarni odpadów lub bezpośrednio na składowisko. Następnie masa organiczna podlega homogenizacji w mikserze i przed zadaniem do komór fermentacyjnych jest wstępnie podgrzewana do temperatury



Rysunek 28. Trzy komory fermentacyjne w zakładzie w Bassano del Grappa  
Źródło: [4]

40°C przy użyciu pary. Zawartość suchej masy wsadu wynosi 29-33%. Instalacja oparta jest na procesie VALORGA – fermentacji suchej w mezofilowym zakresie temperatur.

Każda komora posiada płaski dach i płaskie dno oraz pionową przegrodę, która umieszczona jest w 2/3 średnicy komory. Pionowe mieszanie w komorze jest wymuszane dzięki wtryskowi biogazu pod wysokim ciśnieniem co 15 minut poprzez sieć dysz ulokowanych u podstawy komory. Po 25-30 dniach przefermentowany wsad jest grawitacyjnie usuwany z komór fermentacyjnych [4].



Uzysk biogazu kształtuje się na poziomie 131 m<sup>3</sup> na Mg wsadu. Biogaz zasila trzy silniki kogeneracyjne o mocy 1,320 MW<sub>e</sub> [77].

### Biogazownia w Billund, Dania

Biogazownia w Billund w Danii została uruchomiona w 1997 r. Instalacja przetwarza w ciągu roku łącznie 48.000 Mg wsadu, z czego osad ściekowy stanowi 63%, bioodpady przemysłowe 33%, a bioodpady pochodzenia komunalnego 4%. Z upływem czasu wprowadzono zbiórkę selektywną „u źródła” bioodpadów w gospodarstwach domowych, co pozwoliło na zupełną rezygnację z mechanicznego sortowania zmieszanych odpadów komunalnych.



Rysunek 29. Widok na instalację fermentacji metanowej w Billund  
Źródło: [2]

Czynnikiem stymulującym wykorzystanie bioodpadów pochodzenia komunalnego w biogazowni były niedobory fosforu do nawożenia gleb. Przetwarzanie bioodpadów w procesie fermentacji metanowej, w przeciwieństwie do termicznego przekształcania odpadów, daje produkt końcowy będący źródłem fosforu, azotu oraz materii organicznej. Poferment jest wykorzystywany do nawożenia pól.

Mieszkańcy gminy mają do dyspozycji dwa rodzaje worków na odpady – jeden na odpady ulegające biodegradacji a drugi na pozostałe. Papierowe torby (specjalnie do tego celu wyprodukowane, zawierające długie włókna, co czyni je mocniejszymi) same stanowią wsad do procesu fermentacji w biogazowni.

Odpady trafiające do zakładu, przechodzą najpierw przez separator magnetyczny, w celu usunięcia elementów metalowych, które mogą ewentualnie zwierać. Następnie są rozdrabniane i mieszane z osadami ściekowymi i bioodpadami z przemysłu do postaci pulpy o zawartości suchej masy na poziomie 4,5%.

Masy organiczna podlega procesowi higienizacji przez 1 godz. w temp. 70°C, następnie jest schładzana do temp. 37°C i wpompowywana do komory fermentacyjnej. Fermentacja przebiega w warunkach mezofilowych; jest to proces mokry, ciągły. Poferment po opuszczeniu komory jest ponownie schładzany i przesiewany w celu wydzielenia zanieczyszczeń, takich jak tworzywa sztuczne. Następnie przechodzi przez prasę śrubową w celu odwodnienia. Po takim procesie obróbki poferment może być magazynowany lub rozprowadzany na polach.

Biogazownia w Billund wytwarza około 1,28 mln m<sup>3</sup> biogazu w ciągu roku, który wykorzystywany jest do produkcji energii elektrycznej i ciepła w skojarzeniu. Roczna produkcja energii elektrycznej jest na poziomie 3200 MWh a ciepła – 4,271 MWh.

Zdaniem operatora biogazowni w Billund powodzenie przedsięwzięcia uwarunkowane jest dwoma czynnikami: (i) doborem technologii oraz (ii) zmotywowaniem mieszkańców do selektywnej zbiórki bioodpadów. Uzyskanie czystych bioodpadów i dzięki temu efektywne działanie instalacji jest uzależnione od precyzyjnej i jasnej informacji oraz długoterminowych umów na odbiór odpadów od mieszkańców. By promować właściwy sposób sortowania odpadów szkoły na terenie gminy organizują uczniom wycieczki do biogazowni.

Operator biogazowni jest zainteresowany zwiększeniem udziału bioodpadów z gospodarstw domowych w całkowitym wsadzie do instalacji. Nie będzie to stanowiło problemu technicznego, a biogazodochodowość tych odpadów jest wyższa niż pozostałych. Sukces instalacji w gminie Billund, spowodował zainteresowanie biologicznym przetwarzaniem bioodpadów w sąsiadujących gminach Morsø, Vejen.

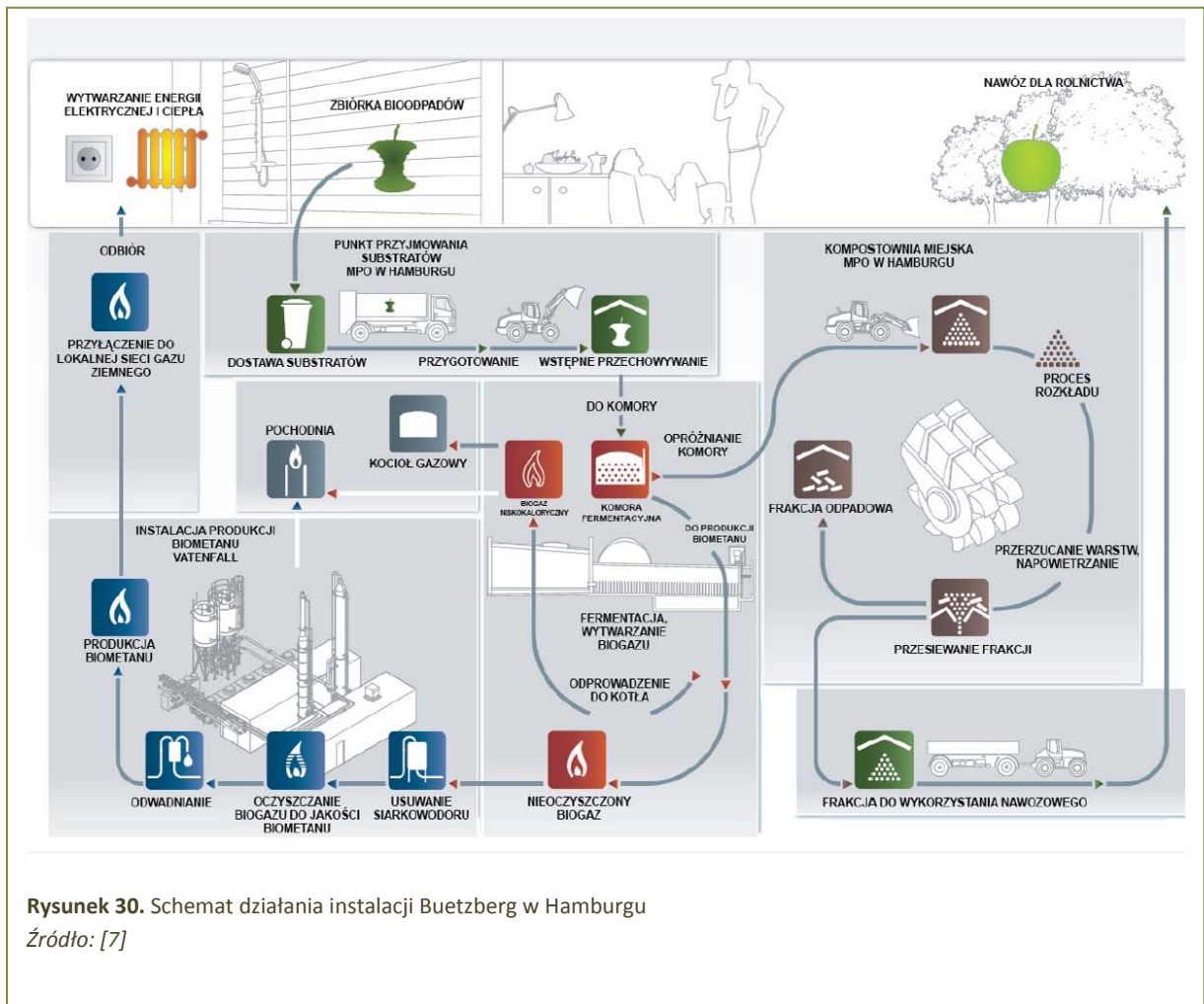
### **Instalacja Buetzberg w Hamburgu, Niemcy**

Instalacja biogazowa w Hamburgu przetwarza rocznie do 70.000 Mg odpadów kuchennych i ogrodowych, produkując około 2,5 mln m<sup>3</sup> biometanu (do 350 m<sup>3</sup> h<sup>-1</sup> biogazu) i 35.000 Mg wysokiej jakości kompostu. Odpady gromadzone w specjalnych pojemnikach trafiają najpierw do zamkniętej hali przyjęć z systemem wentylacyjnym. Odpady zielone i ogrodowe gromadzone są w centralnym magazynie. Surowce transportowane są ładowarką kołową, a następnie systemem przenośników taśmowych. Skomplikowany system siatek oddziela składniki organiczne od zanieczyszczeń, takich jak folie czy metale. Następnie surowiec rozdrabniany jest w młynie ślimakowym, na kawałki mniejsze niż 80 mm. Surowce są rozdzielane. W 21 komorach fermentacji okresowej (wsadowej), w warunkach mezofilowych (38°C), w ciągu trzech tygodni produkowany jest biogaz. Komory fermentacyjne mają łączną długość około 24 metrów, 5 metrów szerokości i 4,5 m wysokości. Biogaz gromadzony jest następnie w trzech zbiornikach o pojemności 950 m<sup>3</sup> każdy. Następnie kierowany jest do instalacji uzdatniania należącej do Vattenfall New Energy GmbH, gdzie metan oddzielany jest od innych gazów. Odpowiedniej jakości gaz wprowadzany jest do sieci gazowej Schleswig-Holstein Netz AG, a następnie przeznaczony do produkcji energii elektrycznej i ciepła w skojarzeniu na potrzeby miasta. Wielu mieszkańców może ogrzewać swoje domy używając biometanu.

Poferment kierowany jest do kompostowni, gdzie jest mieszany z innymi odpadami organicznymi w celu przyspieszenia procesów kompostowania. Pięć przenośników taśmowych przenosi bioodpady do zamkniętej hali kompostowni (22 m szerokości 125 m długości). W dziesięciu dobrze napowietrzanych obszarach przebiega właściwy proces kompostowania. Trwa on około 4-5 tygodni. Ze względu na temperaturę procesu (aktywność mikroorganizmów podnosi ją do ponad 60°C) następuje higienizacja kompostu oraz zniszczenie nasion chwastów. Kompost produkowany w BKW Buetzberg

spełnia najwyższe standardy jakości, nieprzerwanie od 1997 r. nosi znak jakości RAL<sup>3</sup>. Stosowany jest do ogrodów, zakładania i pielęgnacji trawników oraz jako podłoże do kwiatów.

Jest to największa tego typu instalacja wytwarzania biogazu i kompostu w północnych Niemczech. Dodatkowo wprowadzono w niej rozwiązania minimalizujące uciążliwość zapachową (biofiltry) oraz redukujące emisje metanu do powietrza. Powietrze ze zbiorników fermentacyjnych, które może zawierać śladowe ilości biogazu jest wprowadzane do pieca na odpady drewna i tam dopalane. Ciepło z pieca służy do ogrzewania komór fermentacyjnych.



Rysunek 30. Schemat działania instalacji Buetzberg w Hamburgu

Źródło: [7]

<sup>3</sup>RAL Deutsches Institut für Gütesicherung und Kennzeichnung





**Rysunek 31.** Widok na instalację Buetzberg w Hamburgu

Źródło: [7]

### Przykład biogazowni w Regen

Biogazownia w Regen została uruchomiona w 2007 r. jako element systemu gospodarki odpadami w regionie Donau-Wald. Jest to instalacja kaskadowa, która obejmuje biogazownię, kompostownię, oraz kocioł na biomasę. W instalacji przetwarzane są odpady zielone różnego pochodzenia (około 240.000 m<sup>3</sup> rocznie), jak np. z pielęgnacji dróg, z koszenia łąk oraz z sadów, pozyskiwane z terenu o promieniu 20-25 km od instalacji. Odpady są rozdrabniane i przesiewane – frakcja drobna (< 15 mm) kierowana jest bezpośrednio do kompostowania (31.000 Mg r<sup>-1</sup>), frakcja średnia -zielona, włóknista (14.000 Mg r<sup>-1</sup>) kierowana jest do biogazowni o mocy 600 kW<sub>el</sub>, natomiast frakcja gruba (>50 mm) (10.000 Mg r<sup>-1</sup>), z dużą zawartością drewna, przeznaczona jest do spalania w kotle o mocy 625 kW<sub>th</sub>. Dodatkowy wsad do biogazowni stanowi kiszonka kukurydziana (4.000-5.000 Mg r<sup>-1</sup>). Instalacja biogazowa działa w oparciu o technologię firmy KOMPOGAS. Pojemność komór fermentacyjnych to 1.600 m<sup>3</sup>, z czego około 1.350 m<sup>3</sup> służą do fermentacji, pozostałe 250 m<sup>3</sup> działa jako magazyn gazu. Frakcja stała pofermentu wraz z frakcją drobną służy do produkcji wysokiej jakości kompostu (18.000 Mg rocznie), odciek z prasy stosowany jest jako certyfikowany nawóz płynny (6.000 m<sup>3</sup> rocznie) dla rolnictwa.

Wytworzony biogaz jest podawany do silnika spalinowego o mocy 625 kW<sub>th</sub> i przekształcany w energię. Ciepło odpadowe jest stosowane w zimie na miejscu do ogrzewania istniejącego obiektu unieszkodliwiania odpadów i centrum recyklingu. Ponadto, ogrzewana jest też część wsi Poschetsried przy pomocy lokalnego ciepłociągu o długości 900 m. W lecie ciepło jest wykorzystywane przez hotel w Poschetsried do podgrzewania wody w basenie.