

Mikrobiogazownia rolnicza

Materiał informacyjny dla beneficjenta interwencji „Inwestycje w gospodarstwach w rolnych w zakresie OZE i poprawy efektywności energetycznej”

Rozdz. 1-4, 6-7

Prof. dr hab. inż. Wacław Romaniuk

dr inż. Kamila Mazur

dr inż. Kinga Borek

mgr inż. Bogdan Łochowski

Rozdz. 5

dr hab. inż. Grzegorz Wałowski, prof. ITP-PIB

dr inż. Barbara Dybek

dr Dorota Anders

2022 r.

Spis treści

STRESZCZENIE.....	4
1. WPROWADZENIE	5
1.1. Wsparcie rynku OZE w Polsce, korzyści dla gospodarstw	5
1.2. Określenie liczby mikrobiogazowni w Polsce na podstawie dostępnych analiz oraz określenie potencjału rozwoju.....	7
Rys. 1.2. Rozmieszczenie terytorialne mikrobiogazowni rolniczych [KOWR 2021]	7
1.3. Dostępne w kraju wsparcie dotyczące rozwoju mikrobiogazowni w Polsce.	8
2. WPR: Inwestycje w gospodarstwach rolnych w zakresie OZE i poprawy efektywności energetycznej, EFRROW - Europejski Fundusz Rolny na rzecz Rozwoju Obszarów Wiejskich.	8
3. Środki finansowe dla wsparcia biogazowni, w tym mikrobiogazowni będą mogły pochodzić także z:...	9
• Funduszy Europejskich w ramach Programu Inteligentny Rozwój- w przypadku grantów badawczo-rozwojowych;.....	9
• Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej,.....	9
• Krajowego Planu Strategicznego dla WPR, PROW (okres przejściowy będzie trwał jeszcze 2 lata). ..	9
• opłat za emisję CO ₂	9
2. BIOGAZOWNIA.....	10
2.1. Podstawowa charakterystyka biogazowni rolniczych, w tym mikrobiogazowni.....	10
2.2. Dobór elementów mikrobiogazowni - zasada działania i charakterystyka procesu	11
2.2.1. Podstawowe zasady przebiegu procesu fermentacji.....	12
2.2.2. Rozwiązanie instalacji biogazowych ze zbiornikiem biogazu nad komorą fermentacyjną.....	19
2.2.3. Zastosowanie w praktyce instalacji biogazowych z wydzielonym zbiornikiem biogazu	21
2.2.4. Instalacje biogazowe na substrat o zawartości suchej masy powyżej 18%	24
2.2.5. Oczyszczanie biogazu ze szczególnym uwzględnieniem odsiarczania	28
2.2.6. Wykorzystanie biogazu	30
2.3. Mieszanki substratów i zasady ich komponowania.....	35
2.4. Dostępne technologie biogazowe	40
2.5. Sposoby magazynowania, przygotowania i podawania do komory fermentacyjnej substratów i mieszaniny substratów.....	41
3. KOGENERACJA.....	44
3.1. Informacje ogólne.....	44
3.2. Możliwości wykorzystania ciepła pochodzącego z kogeneracji	44
4. REALIZACJA BUDOWY MIKROBIOGAZOWNI.....	53
4.1. Opis etapów realizacji budowy od koncepcji do realizacji	53
4.2. Uwarunkowania prawne dotyczące budowy mikrobiogazowni	53
5. BUDOWA I UŻYTKOWANIE	56
6. POFERMENT	78
6.1. Czym jest poferment – definicja.....	78
6.2. Zagospodarowanie substratu pofermentacyjnego.....	78
6.2.1. Ogólne informacje o zagospodarowaniu substratu pofermentacyjnego	78
6.2.2. Granulacja substratu pofermentacyjnego	79
6.3. Magazynowanie pofermentu.....	92
6.4. Pozostałe możliwości zagospodarowania pofermentu.....	93
6.5. Metody aplikacji pofermentu	94
6.6. Właściwości fizyko-chemiczne pofermentu	96
6.7. Wymagania dotyczące zagospodarowania masy pofermentacyjnej i aktualny stan prawny	102
7. PRZYKŁADY MIKROBIOGAZOWNI W POLSCE. DOBRE PRAKTYKI	108
7.1 Mikrobiogazownia w Ciemnoszyjach	108
7.2 Dobre praktyki.....	109
7.2.1 Wykorzystanie nawozu naturalnego na potrzeby produkcji biogazu	109
7.2.2 Wykorzystanie pofermentu z nawozu naturalnego na potrzeby kompostowania	109

7.2.3 Wykorzystanie pofermentu z nawozu naturalnego na ściółkowanie lub na ekologiczny nawóz.	109
PODSUMOWANIE	110
BIBLIOGRAFIA	112
https://www.kowr.gov.pl/odnawialne-zrodla-energii/biogaz-rolniczy/mikroinstalacje [Dostęp 04.01.2023 r.]	116
https://bip.kowr.gov.pl/uploads/pliki/oze/biogaz/l%20p%C3%B3%C5%82roczne%202022%20r.%20-%20Zbiorczy%20raport%20wytw%C3%B3rc%C3%B3w%20e.e%20w%20mikroinstalacji.pdf Dostęp 04.01.2023 r.]	116

STRESZCZENIE

Według GUS w 2020 r. udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto wyniósł w 16,1%, natomiast celem jest osiągnięcie do 2030 r. 23% udziału. Intensyfikacja produkcji rolnej i zwiększająca się ilość substratów dostępnych do fermentacji beztlenowej sprzyjają powstawaniu mikrobiogazowni rolniczych, które zaliczane są do OZE (odnawialne źródła energii). Aktualnie w Polsce jest 35 mikrobiogazowni. Ich powstanie może być wspomagane przez programy takie jak: Energia dla Wsi, Agroenergia, działanie „Inwestycje w gospodarstwach rolnych w zakresie OZE i poprawy efektywności energetycznej” w ramach PS WPR umożliwiającą uzyskanie dofinansowania do kosztów budowy mikrobiogazowni.

Biogazownia rolnicza, a także mikrobiogazownia, to zespół urządzeń służących do prowadzenia fermentacji metanowej substratów organicznych, wytworzonych w gospodarstwie rolnym, jak również umożliwiających ich wykorzystanie w postaci pofermentu i biogazu, po zakończonym procesie fermentacji.

Głównym celem zastosowania fermentacji metanowej nawozów naturalnych w warunkach rolniczych jest ich utylizacja, a także pozyskanie paliwa w postaci biogazu. Rozpatrując zagadnienie fermentacji metanowej w pracy uwzględniono wszystkie korzystne aspekty nawozowe, energetyczne, a przede wszystkim ekologiczne.

Przeprowadzone analizy dostępnych badań wykazują, że masa pofermentacyjna ma większą wartość nawozową niż nawóz naturalny, np. obornik lub gnojowica. Poferment pozyskany z fermentacji metanowej nie wydziela nieprzyjemnych zapachów podczas magazynowania w zbiornikach czy podczas rozdeszczowywania na polu. Nie przyciąga on też much, ani nie jest siedliskiem chwastów. Poprzez nawożenie gleby pofermentem można uzyskać takie same efekty, jak przy stosowaniu kompostu do nawożenia. Nie bez znaczenia jest też dodatkowy aspekt higienizacyjny fermentacji metanowej, która dodatkowo likwiduje mikroorganizmy chorobotwórcze.

Na zapewnienie prawidłowego procesu fermentacji na potrzeby produkcji biogazu rolniczego składa się: zapewnienie odpowiednich substratów do fermentacji, zgodnie z wymaganiami procesu technologicznego dostosowanego do wielkości instalacji (wydajności biogazu), zagospodarowanie substratu pofermentacyjnego oraz wykorzystanie biogazu. Proces technologiczny, jakim jest fermentacja metanowa, uzależniony jest od wielkości gospodarstwa, zastosowanego substratu oraz temperatury fermentacji. Pozyskany biogaz po oczyszczeniu (odwodnieniu i odsiarczeniu), zgodnie z wymaganiami agregatu kogeneracyjnego, może być wykorzystywany na potrzeby energii elektrycznej i ciepłej. Na podstawie doświadczeń ITP-PIB, biogaz, po oczyszczeniu, może być również sprężany i wykorzystywany do dystrybucji na potrzeby gospodarstw wiejskich.

Poferment, po zakończeniu fermentacji metanowej, jest przechowywany i schładzany. Na tym etapie, można rozdzielić frakcję płynną od stałej. Frakcja płynna może być wykorzystywana i rozlewana na pole jako płynny nawóz, a frakcja stała może być składowana przed wykorzystaniem jako kompost. Tak przetworzony poferment może być również zagospodarowywany jako podściółka dla zwierząt oraz do produkcji granulatu na potrzeby nawozu ekologicznego.

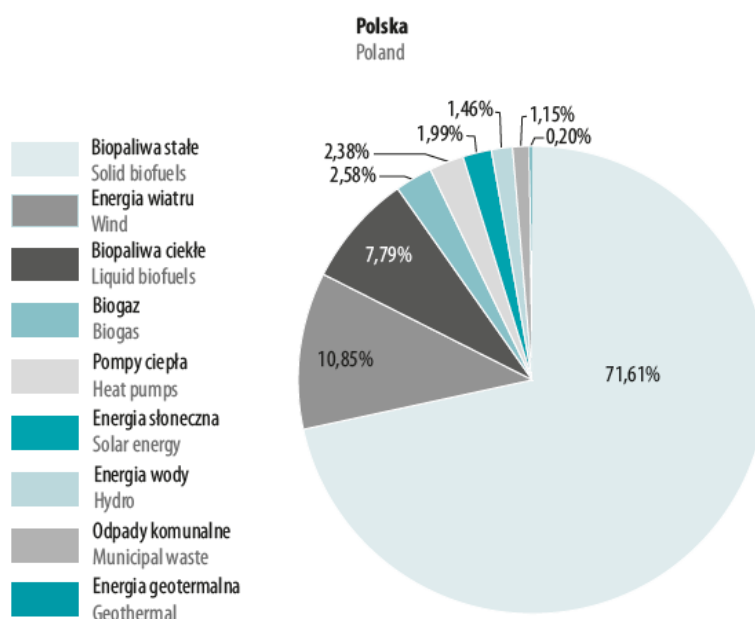
1. WPROWADZENIE

1.1. Wsparcie rynku OZE w Polsce, korzyści dla gospodarstw

Potrzeba rozwoju Odnawialnych Źródeł Energii (OZE) w tym pozyskanie biogazu jest wynikiem ograniczeń spowodowanych ochroną środowiska a także realizacją zobowiązań nałożonych przez UE na Polskę. Zgodnie z Polityką energetyczną Polski do 2040 r. (PEP40), Polska deklaruje osiągnięcie co najmniej 23% udziału OZE w końcowym zużyciu energii brutto w 2030 r. Osiągnięcie tego celu wymagać będzie systematycznego rozwoju między innymi instalacji biogazowych w gospodarstwach farmerskich i rodzinnych.

Jednym z elementów umożliwiających realizację zobowiązań pakietu klimatycznego jest rozwój procesu inwestycyjnego związanego z produkcją biogazu rolniczego w oparciu o substraty z produkcji roślinnej, a także odpadów poprodukcyjnych z przetwórstwa rolno-spożywczego, w tym przemysłu mięsnego.

Dla rolnictwa i ochrony środowiska istotne znaczenie ma potrzeba utylizacji odpadów z produkcji rolniczej i przetwórstwa. Według danych GUS, przedstawionych na rysunku 1.1, w 2020 roku udział energii ze źródeł odnawialnych w końcowym zużyciu energii brutto wyniósł 16,1%, natomiast udział biogazu spośród wszystkich źródeł energii odnawialnej wyniósł w 2,58%. W związku z powyższym powinno się szczególnie zwrócić uwagę na zakres prac w odniesieniu do zwiększenia działań w tym obszarze i wykorzystania potencjału badawczego.



Rys. 1.1. Struktura pozyskania energii pierwotnej ze źródeł odnawialnych w 2020 r. [GUS 2022]

Przedstawione w niniejszym opracowaniu propozycje rozwiązań zwłaszcza pozyskania biogazu z obornika i substratów o dużej zawartości suchej masy (powyżej 20% suchej masy) mogą umożliwić intensyfikację działań w tym zakresie, w tym także badań. Wiąże się to ze współpracą placówek naukowo-badawczych o różnym profilu specjalizacji zarówno w kraju jak i za granicą. Zaobserwować można wzrost innowacyjnych rozwiązań technologii w produkcji zwierzęcej, które powinny być skojarzone z ograniczeniami gospodarki niskoemisyjnej, a także racjonalnym zagospodarowaniem nawozów naturalnych i odpadów poprodukcyjnych.

Z wielu problemów, związanych ze znaczną koncentracją pogłównia, na czołowe miejsce wysuwa się problem zagospodarowania nawozu naturalnego wykraczający poza ramy samego procesu produkcyjnego. Duża ilość odchodów zwierzęcych jest wystarczającym sygnałem do szukania racjonalnych metod ich przerobu i wykorzystania, zwłaszcza gnojowicy. Jeżeli produkcja gnojowicy znacznie przekracza potrzeby nawozowe upraw, jej nadmiar może być poddany skutecznej utylizacji.

Jedną z metod utylizacji gnojowicy jest poddanie jej fermentacji metanowej. Fermentacja metanowa jest złożonym procesem biochemicznym zachodzącym w warunkach beztlenowych. Wielocząsteczkowe substancje organiczne są rozkładane przez bakterie na proste związki chemiczne ustabilizowane – głównie metan (CH_4) i dwutlenek węgla (CO_2). Organiczną masę gnojowicy tworzą głównie tłuszcze, białka i węglowodany. W procesach beztlenowego rozkładu część z nich, w wyniku przemian biochemicznych, mineralizuje się do prostych związków chemicznych. Pozostałe części, np. trudno rozkładalna celuloza i ligniny, nie zmieniają się i w swej pierwotnej postaci są usuwane z komory fermentacyjnej.

Podczas fermentacji metanowej odpady podlegają stabilizacji w wyniku usunięcia dużej ilości węgla. Jedynymi usuwanymi z systemu składnikami są wydzielające się gazy: CH_4 , CO_2 i H_2S . W trakcie omawianego procesu cały azot konserwowany jest w formie organicznej lub amoniakalnej.

Mikrobiogazownie są szansą na zwiększenie dochodów rolniczych oraz bezpieczeństwa energetycznego wsi, a także poprawa ochrony środowiska na terenach rolniczych. Dla rolnika (producenta rolnego) produkty uboczne z podstawowe działalności są potencjalnymi surowcami do produkcji energii elektrycznej i ciepłej na własne potrzeby w instalacjach biogazowych o niewielkiej mocy, a jej nadmiar może być sprzedawany.

Opracowanie technologii a następnie konstrukcji i budowa mikrobiogazowni oraz urządzeń towarzyszących, jak również ich wykorzystanie w postaci biogazu czy też energii elektrycznej oraz ciepła umożliwi zaoszczędzenie na kosztach eksploatacyjnych. Kolejną korzyścią jest efektywniejsze rolnicze wykorzystanie przefermentowanego nawozu naturalnego oraz innych substratów przefermentowanych. Ekologiczny przefermentowany nawóz z różnego rodzaju dodatkami roślinnymi jak kukurydza, kiszonka czy też masa zielona (również zakiszona) jest zaliczany do grupy bardziej aktywnych biologicznie nawozów syntetycznych wzrost i rozwój roślin uprawnych zarówno zbożowych, jak i okopowych, nie mówiąc o użytkach zielonych, które bardzo efektywnie reagują na nawożenie tym substratem biologicznym, szczególnie na lżejszych glebach. Trzecią korzyścią jest ochrona wody, gleby i powietrza przed ewentualnym skażeniem bakteriami i grzybami, znajdującymi się w świeżym, nieprzefermentowanym np. pomocie od brojlerów. Są to na ogół bakterie wywołujące różnego rodzaju schorzenia przewodu pokarmowego u ludzi i zwierząt (gronkowce, bakterie zaliczane do bakterii czerwonej, salmonella bakterie Coli itp.).

Fermentacja metanowa polega na biochemicznym rozkładzie substancji organicznych w warunkach beztlenowych, w wyniku reakcji zachodzących z udziałem bakterii metanowych powstaje biogaz składający się głównie z metanu w ilości ok. 60% oraz dwutlenku węgla. W celu zapewnienia prawidłowego przebiegu procesu konieczne jest, oprócz zachowania warunków beztlenowych, mieszanie całej zawartości reaktora.

Przeprowadzane badania wykazują, że masa przefermentowana ma większą wartość nawozową niż nawóz naturalny np. obornik czy gnojowica. Nie wydzielają się ponadto nieprzyjemne zapachy ani podczas magazynowania w zbiornikach ani podczas rozdeszczowywania na polu. Omawiane pozostałości nie przyciągają też much, ani nie są

siedliskiem chwastów. Wynik nawożenia przefermentowaną masą jest taki sam, jak nawożenie kompostem. Nie bez znaczenia jest dodatkowy aspekt higieniczny fermentacji metanowej, radykalnie likwidujący mikroelementy chorobotwórcze.

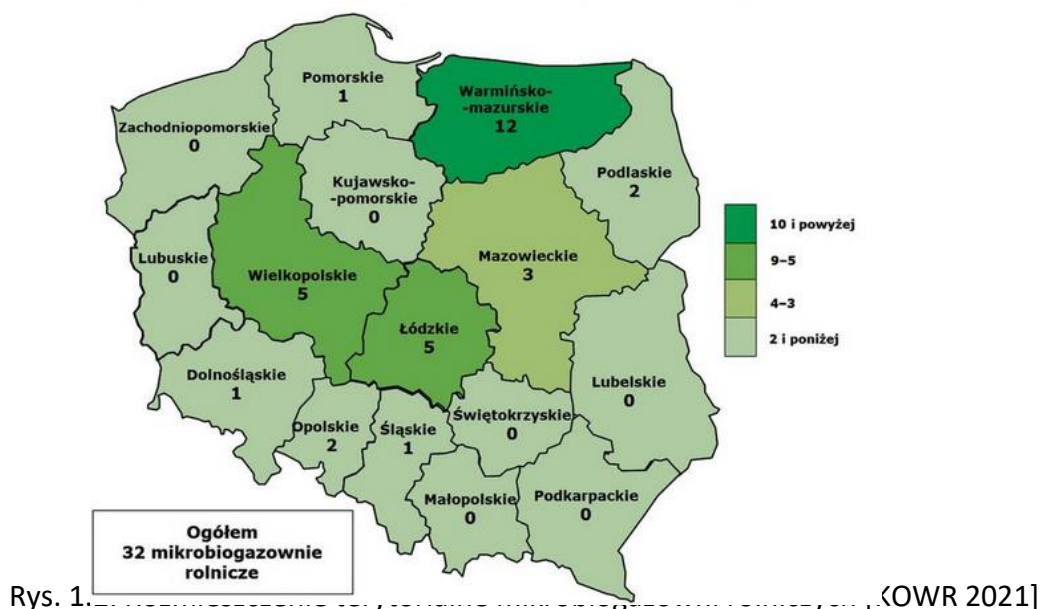
1.2. Określenie liczby mikrobiogazowni w Polsce na podstawie dostępnych analiz oraz określenie potencjału rozwoju

Aktualnie Polsce istnieje 119 biogazowni rolniczych [KOWR 2023], natomiast mikroinstalacji biogazu rolniczego jest 35. Poniższa tabela 1.1 przedstawia liczbę instalacji według stanów za I półrocze 2022, z podziałem na poszczególnych odbiorców energii.

Tabela.1.1 Liczba mikrobiogazowni oraz ilość energii elektrycznej wprowadzonej do sieci dystrybucyjnej (kWh) [KOWR 2022]

Lp.	Nazwa operatora systemu dystrybucyjnego elektroenergetycznego, do którego sieci została przyłączona instalacja	Liczba mikroinstalacji wg stanu na dzień 30.06.2022	Ilość energii elektrycznej wprowadzonej do sieci dystrybucyjnej elektroenergetycznej [kWh]
1	ENERGA- OPERATOR S.A.	13	273 521,000
2.	PGE Dystrybucja S.A.	11	327 374,936
3.	ENEA Operator sp. z o.o.	7	293 086,000
4.	Tauron Dystrybucja S.A.	4	70 578,000
	Razem	35	964 559,936

Rozmieszczenie terytorialne biogazowni w Polsce (stan na rok 2021) przedstawia rysunek 1.2.



1.3. Dostępne w kraju wsparcie dotyczące rozwoju mikrobiogazowni w Polsce.

Wskazanie dostępnych środków dla budowy mikrobiogazowni (określenie beneficjenta, poziomu wsparcia, wymagań, instytucji wdrażającej).

1. PROGRAM AGROENERGIA NARODOWEGO FUNDUSZU OCHRONY ŚRODOWISKA

Program realizowany **będzie do 2027 r.**, przy czym zobowiązania (podpisywanie umów) podejmowane będą do 31.12.2025 r.

Celem programu jest zwiększenie produkcji energii ze źródeł odnawialnych w sektorze rolniczym.

Agroenergia w 2023 r. Najważniejsze założenia na rok 2023.

Nabór rozpocznie się **16 stycznia 2023 r.**

Beneficjenci: rolnicy, spółdzielnie energetyczne

Alokacja:

200 mln zł na rok 2023.

Aktualnie brak ogłoszenia na naborze, w związku z tym nie są znane szczegóły, które będą obowiązywały. Niemniej jednak spodziewane jest zachowanie bazowych zasad, które obowiązywały w poprzednich naborach, które zostały poniżej:

Poziom wsparcia (według zasad obowiązujących w 2022 r.)

Dotacja do 50% kosztów kwalifikowanych.

Pozostała część inwestycji mogła być sfinansowana przy użyciu niskoprocentowanej pożyczki przygotowanej przez NFOŚiGW:

- do 100 % kosztów kwalifikowanych,
- do 25 mln zł,
- okres spłaty do 15 lat,
- karencja 12 miesięcy,
- oprocentowanie: WIBOR 3M + 0,5%.

Maksymalna moc biogazowni to:

- 1 MW dla rolnika - zatem mikrobiogazownia mieści się w tym wymogu.

2. PS WPR: Inwestycje w gospodarstwach rolnych w zakresie OZE i poprawy efektywności energetycznej, EFRROW - Europejski Fundusz Rolny na rzecz Rozwoju Obszarów Wiejskich.

Pomoc będzie dostępna w momencie uruchomienia procedury składania wniosków przez **ARiMR.**

Planowane rozpoczęcie naboru na przełomie 2023/2024 roku. .

Według Programu WPR celem interwencji jest zmniejszenie presji działalności rolniczej na środowisko, poprzez wykorzystanie energii ze źródeł odnawialnych, utylizację odpadów i produktów ubocznych z rolnictwa oraz poprawę efektywności energetycznej.

Kryteria wyboru do finansowania biogazowni rolniczych mogą w szczególności dotyczyć:

1. wielkości pogłównia w gospodarstwie w DJP;
2. stopnia wykorzystania nawozów naturalnych pochodzących z gospodarstwa;

Pomoc może zostać przyznana po skorzystaniu z usługi doradczej w zakresie OZE oraz poprawy efektywności energetycznej. Pomoc może być przyznana wyłącznie w przypadku, gdy realizacja inwestycji jest uzasadniona ekonomicznie w danym gospodarstwie, w tym pod względem kosztów oraz wytworzona energia (elektryczna, ciepła lub paliwa gazowe) zostanie wykorzystana na potrzeby własne gospodarstwa rolnego.

Interwencja wspiera inwestycje materialne lub niematerialne wykorzystywane w działalności rolniczej w szczególności dotyczące budowy lub zakupu:

- urządzeń do produkcji energii z biogazu rolniczego (elektryczną lub ciepło lub paliwo gazowe) do 50 kW lub instalacji produkujących energię z promieniowania słonecznego do 50 kW wraz z magazynami energii i systemami zarządzania energią lub z pompą ciepła - o ile będzie stanowiła integralną część instalacji produkującej energię z promieniowania słonecznego, koszty montażu instalacji ww. urządzeń do produkcji energii (obszar a) lub;
- systemów poprawiających efektywność energetyczną budynków gospodarskich służących produkcji rolnej takich jak budowa, przebudowa lub zakup kotłów na biomasę, systemów odzyskiwania ciepła (np.: z mleka, z budynków inwentarskich, ściółki, gnojowicy), przeszkleń dachowych, oświetlenie LED, a także termomodernizacja budynków gospodarskich służących do produkcji rolnej (obszar b).

Ze wsparcia wyłączone są inwestycje, które mogą być realizowane w ramach innych interwencji albo innego Programu.

Beneficjenci:

1) Rolnik w rozumieniu art. 3 pkt 1 rozporządzenia o Planach Strategicznych WPR.

W okresie programowania maksymalna wysokość pomocy udzielonej jednemu beneficjentowi nie może przekroczyć: 1 500 000 zł – obszar a- biogazownie.

Intensywność pomocy: do 65% kosztów kwalifikowalnych operacji.

3. Środki finansowe dla wsparcia biogazowni, w tym mikrobiogazowni będą mogły pochodzić także z:

- Funduszy Europejskich w ramach Programu Inteligentny Rozwój- w przypadku grantów badawczo-rozwojowych;
- Wojewódzkiego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej,
- Krajowego Planu Strategicznego dla WPR, PROW (okres przejściowy będzie trwał jeszcze 2 lata).
- opłat za emisję CO₂.

2. BIOGAZOWNIA

2.1. Podstawowa charakterystyka biogazowni rolniczych, w tym mikrobiogazowni

Biogazownia rolnicza, to zespół urządzeń, służących do prowadzenia fermentacji metanowej substratów organicznych, wytworzonych w gospodarstwie rolnym, jak również umożliwiających ich wykorzystanie po zakończonym procesie fermentacji w postaci pofermentu oraz biogazu. Zgodnie z regulacją prawną biogaz rolniczy to „gaz otrzymywany w procesie fermentacji metanowej surowców rolniczych, produktów ubocznych rolnictwa, płynnych lub stałych odchodów zwierzęcych, produktów ubocznych, odpadów lub pozostałości z przetwórstwa produktów pochodzenia rolniczego lub biomasy leśnej, lub biomasy roślinnej zebranej z terenów innych niż zaewidencjonowane jako rolne lub leśne, z wyłączeniem biogazu pozyskanego z surowców pochodzących z oczyszczalni ścieków oraz składowisk odpadów”.

Biogazownia rolnicza, a także mikrobiogazownia zazwyczaj składa się z podstawowych elementów:

- zbiornika wstępnego do magazynowania substratu (np. gnojowicy),
- silosu na substrat roślinny (np. kiszonkę z kukurydzy),
- komory (lub komór) fermentacyjnej (bioreaktor),
- zbiornika gazu,
- generatora prądotwórczego w układzie kogeneracyjnym,
- zbiornika na substrat przefermentowany z biogazowni (poferment).

Pojemność zbiornika wstępnego do magazynowania substratu powinna być dostosowana do 0,5 – 2-krotnej objętości produkowanego substratu w ciągu doby. Zbiornik w zależności od składowanego materiału może być wykonany z betonu, stali lub tworzyw sztucznych i może występować w formie zbiornika zagłębionego lub naziemnego.

Wielkość **silosu na substrat** roślinny zależy od ilości gromadzonych substratów. Silos powinien być wyposażony w instalację odbioru odcieków, która zapobiega przedostawaniu się odcieków do gleby. Aby zapobiec wysychaniu substratu lub dostaniu się wody deszczowej, silos powinien być szczelnie zakryty. Niektóre substraty roślinne o małym uwodnieniu, jak np. kiszonka z kukurydzy, składowane są w przyrmach pod przykryciem foliowym.

Komora fermentacyjna to najważniejszy element biogazowni, w której przebiega proces fermentacji metanowej. Od poprawności jej konstrukcji i właściwego wykonania uzależniona jest skuteczność całej inwestycji. Przede wszystkim jej ściany muszą być szczelne, aby uniemożliwić przeciek cieczy i gazów. Niezbędna jest również dobra izolacja, zapewniająca możliwie minimalne straty ciepła. Im lepsza izolacja, tym mniejsze uzależnienie od temperatury zewnętrznej. Komora powinna mieć włącz umożliwiający kontrolę wnętrza i ewentualne naprawy. W zależności od zastosowanej technologii biogazownia może być wyposażona w jedną lub więcej komór. Komory fermentacyjne mogą być poziome lub pionowe, wykonane z blachy stalowej, betonu lub tworzywa sztucznego. Komora powinna być wyposażona w urządzenie do mieszania jej zawartości (mieszadło lub inny system mieszający) oraz w system grzewczy pozwalający na osiągnięcie wymaganej temperatury fermentacji i utrzymanie jej. Przefermentowaną masę z bioreaktora odprowadza się najczęściej przez rurę przelewową.

Zbiornik gazu (biogazu) to obecnie najczęściej wydzielony zbiornik magazynujący, pracujący przy ciśnieniu wymaganym w sieci gazowej. Zgromadzony w nim biogaz przechowywany jest do czasu zapotrzebowania na energię, który jest wykorzystywany do wytwarzania prądu elektrycznego i ciepła.

Przefermentowaną i częściowo odwodnioną **masę** można użyć jako cenny nawóz (w formie płynnej) lub składować w zbiorniku na substrat przefermentowany, który może być wykorzystany do produkcji kompostu (bionawozu) na potrzeby rynku.

Płynne nawozy naturalne charakteryzują się ogromnym bogactwem mikroorganizmów, które w pewnych warunkach mogą być czynnikami chorobotwórczymi dla ludzi i zwierząt.

Negatywny wpływ nawozów naturalnych na degradację środowiska naturalnego może być zminimalizowany pod warunkiem przestrzegania podstawowych praw ekologicznych, na których powinny być oparte wszystkie metody utylizacji gnojowicy, uzdatniające ją do bezpiecznego rolniczego wykorzystania.

Duże znaczenie ma właściwe przygotowanie nawozu naturalnego (gnojowicy) do fermentacji. Przede wszystkim okres wstępnego ich przygotowania przed załadowaniem do komory fermentacyjnej powinien być jak najkrótszy. Zbiorniki wstępnie magazynujące gnojowicę powinny mieć izolację cieplną, aby utrzymać substrat w odpowiedniej temperaturze zarówno zimą, jak i w lecie. Zbytne wychłodzenie jak też utrzymywanie odchodów zwierzęcych w wysokiej temperaturze obniża ich wartość jako fermentowanego substratu.

Głównym celem zastosowania fermentacji metanowej nawozu naturalnego w warunkach rolnictwa jest ich utylizacja, jak również uzyskanie paliwa. Rozpatrując zagadnienie fermentacji metanowej, należy uwzględnić wszystkie korzystne aspekty nawozowe, energetyczne, a przede wszystkim ekologiczne.

Przeprowadzone badania wykazują, że masa przefermentowana ma większą wartość nawozową niż nawóz naturalny np. obornik czy gnojowica. Nie wydzielają się ponadto nieprzyjemne zapachy ani podczas magazynowania w zbiornikach ani podczas rozdeszczowywania na polu. Omawiane pozostałości nie przyciągają też much, ani nie są siedliskiem chwastów. Wynik nawożenia przefermentowaną masą jest taki sam, jak nawożenie kompostem. Nie bez znaczenia jest dodatkowy aspekt higienizacyjny fermentacji metanowej, radykalnie likwidujący mikroorganizmy chorobotwórcze.

2.2. Dobór elementów mikrobiogazowni - zasada działania i charakterystyka procesu

Według Ministerstwa Rolnictwa i Rozwoju Wsi, rozważając możliwość wykorzystania na cele energetyczne biomasy pochodzenia rolniczego należy mieć na uwadze długoterminowe perspektywy i zadania stawiane przed rolnictwem. Zakłada się, że do 2050 r. w skali świata produkcja żywności powinna zostać dwukrotnie zwiększona. Zamierzenia te wymagają nie tylko wzrostu produkcji jednostkowej, ale również utrzymywania dostępnego rolniczego potencjału produkcyjnego we właściwej kulturze do czasu, kiedy zostanie on w całości przeznaczony do produkcji żywności. Wykorzystanie biomasy rolniczej na cele energetyczne zapobiegać będzie trwałemu wyłączeniu użytków rolnych z produkcji, a w konsekwencji ułatwi realizację zadania, przed którym stoi światowe rolnictwo. Jednocześnie należy wdrażać już dostępne i rozwijać nowe technologie przetwarzające na energię biomasę pochodzenia rolniczego niekonkurującą z rynkiem żywności.

Rolnik może i powinien być nie tylko dostawcą surowca, ale również producentem energii elektrycznej i cieplnej, czy też dostawcą do gazowych sieci dystrybucyjnych biogazu oczyszczonego do jakości gazu ziemnego.

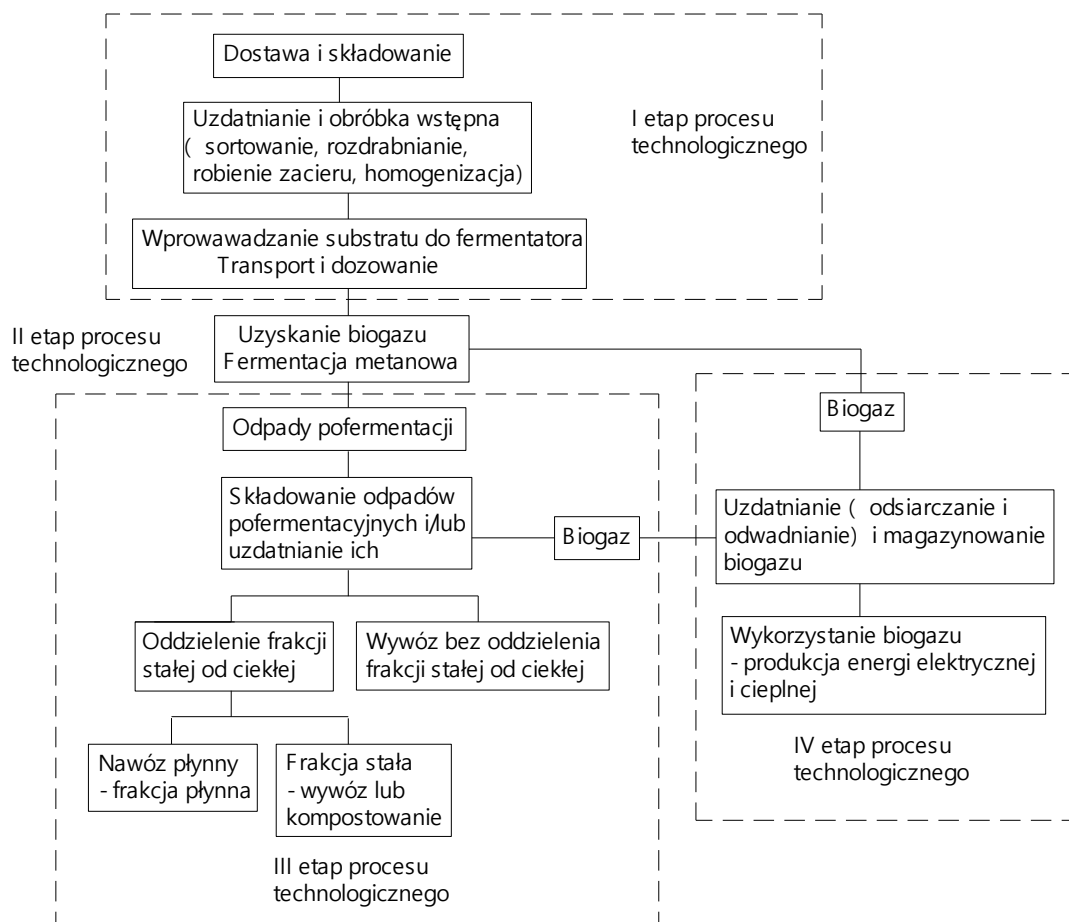
W Polsce jest miejsce zarówno dla mikrobiogazowni rolniczych poniżej 50 kW zainstalowanej mocy, jak i dla obiektów wielokrotnie większych. Ostateczna decyzja inwestycyjna powinna wynikać z wszechstronnego rachunku możliwości i potrzeb.

Możliwych rozwiązań jest wiele – od uruchomienia produkcji na podstawie dostępnych rozwiązań krajowych poprzez zakup licencji - w tym przypadku korzyści odniosą wszyscy. Promowanie stosowania odnawialnych źródeł energii przyniesie efekt w postaci zwiększenia lokalnego, a w efekcie krajowego bezpieczeństwa energetycznego i znaczącego rozwoju obszarów wiejskich oraz aktywizacji zawodowej rolników, zwiększenia ich dochodów. Zlikwidowany zostanie problem odpadów, których możliwość składowania, zgodnie z obowiązującym prawem unijnym w zakresie odpadów, będzie ograniczana w kolejnych latach. Prawo energetyczne stwarza możliwości wytwarzania w biogazowni rolniczej nie tylko energii elektrycznej i ciepłej, ale również wprowadzenia biogazu rolniczego do gazowych sieci dystrybucyjnych po oczyszczeniu go do jakości gazu ziemnego. Prawo energetyczne likwiduje także wymóg posiadania koncesji dla wytwórców biogazu, zastępując ją rejestrem prowadzonym przez Krajowy Ośrodek Wsparcia Rolnictwa (KOWR).

2.2.1. Podstawowe zasady przebiegu procesu fermentacji

Ogólny przebieg procesu technologicznego w pozyskaniu biogazu przedstawiono na rysunku nr 2.1.

Zapewnienie prawidłowego procesu fermentacji na potrzeby produkcji biogazu rolniczego opiera się na spełnieniu wymagań wynikających z potrzeb i możliwości rolnictwa, a mianowicie: zapewnienia odpowiednich substratów do fermentacji, zgodnie z wymaganiami procesu technologicznego dostosowanego do wielkości instalacji (wydajności biogazu), zagospodarowania substratu pofermentacyjnego oraz wykorzystania biogazu. Poniżej przedstawiony proces technologiczny jest uzależniony od wielkości gospodarstwa, zastosowanego substratu oraz temperatury fermentacji. Ważną sprawą jest też umożliwienie w sposób racjonalny wykorzystania substratu pofermentacyjnego na potrzeby własne (produkcję roślinną) oraz potrzeby rynku. Pozyskany biogaz po oczyszczeniu zgodnie z wymaganiami agregatu kogeneracyjnego może być wykorzystany na potrzeby energii elektrycznej i ciepłej. Również według ostatnich doświadczeń ITP- PIB biogaz może być oczyszczony (odwodniony i odsiarczony), sprężany i wykorzystywany do dystrybuowania na potrzeby gospodarstw wiejskich.



Rys. 2.1. Ogólny przebieg procesu technologicznego w uzyskiwaniu biogazu [opracowanie własne]

Charakterystykę parametrów biogazowni rolniczej przedstawiono w tabeli 2.1.

Tabela 2.1. Charakterystyka parametrów biogazowni rolniczej i procesu fermentacji metanowej [opracowanie własne na podstawie Myczko i in. 2011 oraz danych z Instytutu Energetyki Odnawialnej]

Wyszczególnienie	Symbol	Jednostka	Objaśnienie
Jednostkowa produkcja biogazu	JPB	dm ³ ·kg ⁻¹ s.m.o.	Objętość suchego biogazu lub metanu wytwarzanego w jednostce czasu na jednostkę masy wprowadzonego substratu
Komora fermentacyjna	KF	-	urządzenie, w którym w warunkach beztlenowych przeprowadza się fermentację odpadów organicznych
Obciążenie komory fermentacyjnej	OKF	-	stosunek ilości suchej pozostałości organicznej doprowadzonej do komory w ciągu doby do pojemności czynnej komory lub masy zawartości komory właściwej

Pojemność czynna komory fermentacyjnej	PCKF	m ³	objętość substratu znajdującego się wewnątrz komory z wyłączeniem substratu znajdującego się w części martwej
Pojemność komory fermentacyjnej	PKF	m ³	całkowita objętość komory fermentacyjnej wynikająca z jej wymiarów geometrycznych
Pojemność martwa komory fermentacyjnej	PMKF	m ³	objętość części komory nie wykorzystywanej do bezpośredniej produkcji gazu
Sucha pozostałość	SP	%, g	sucha pozostałość obliczona wg PN-78/C-045541
Sucha pozostałość organiczna	SPO	%, g	sucha pozostałość organiczna obliczana wg PN-78/C-045541
Czas fermentacji	TF	d	czas przetrzymywania substratu w KF. Dla KF przeznaczonych do fermentacji ciągłej TF oblicza się dzieląc pojemność czynną komory przez objętość wsadu dostarczonego w ciągu doby
Temperatura komory	TK	°K, °C	temperatura wewnątrz KF

Proces fermentacji metanowej polega na biochemicznym rozkładzie substancji organicznych w warunkach beztlenowych. W wyniku reakcji zachodzących z udziałem bakterii metanowych powstaje biogaz składający się głównie z metanu w ilości ok. 60% oraz dwutlenku węgla. W celu zapewnienia prawidłowego przebiegu procesu konieczne jest także mieszanie całej zawartości reaktora.

Aby uzyskać wysoki poziom produkcji biogazu a nie zużywać nadmiernie pojemności komory fermentacyjnej, czas przetrzymywania surowca powinien wynosić ok. trzech tygodni w temperaturze 35–38°C. Powołując się na przeprowadzone badania laboratoryjne oraz dostępną literaturę światową, można określić, że produkcja biogazu z 1 kg suchej pozostałości organicznej powinna oscylować w granicach 0,6 m³. Natomiast produkcja z 1 m³ objętości czynnej komory powinna wynosić ok. 1,2 m³ biogazu na dobę.

Uzyskany w trakcie fermentacji biogaz jest odprowadzany z reaktora rurociągiem wyposażonym w odwadniacz i odsiarczalnik do zbiornika gazu.

Ze zbiornika gaz kierowany jest do odbiorników kotła centralnego ogrzewania instalacji grzewczej reaktora oraz innych odbiorników w zależności od potrzeb. Przefermentowany i częściowo odwodniony substrat będzie wykorzystywany jako cenny nawóz. Można go rozprowadzać w formie płynnej lub po dalszej obróbce w wyniku jego separacji jako nawóz stały.

Do podstawowych parametrów rzutujących na bilans energetyczny należy zaliczyć: rodzaj materiału poddanego fermentacji i zawartość w nim suchej masy, proporcje ilościowe składników (w przypadku tzw. kofermentacji), temperaturę i jej wahania w czasie, staranność wykonania izolacji termicznej komory, czas retencji hydraulicznej, ilość i częstotliwość podawania wsadu, obciążenie komory fermentacyjnej, częstotliwość i dokładność mieszania. Łączny potencjał roczny gospodarstw rolnych sięga ok. 38 mln m³ gnojowicy i 51 mln t obornika. Jak wykazały badania doświadczalnych biogazowni eksploatowanych w rolnictwie, z 1 m³ płynnych nawozów mineralnych potencjalnie można uzyskać średnio 20 m³ biogazu, a z 1 t obornika 45 m³ biogazu o wartości energetycznej ok. 23 MJ/m³. W ostatnich latach w celu poprawy efektywności produkcji energii z biogazowni rolniczych podawane są substraty roślinne wymienione poniżej. Charakterystykę energetyczną substratu stanowiącego element

wsadu do badanej instalacji podano w tabeli 2.2, zaś uzysk biogazu z różnych substratów w tabeli 2.3.

Tabela 2.2. Parametry substratu i produkcja biogazu z wybranych roślin [Wałowski i in. 2019, Romaniuk i in. 2012]

Substrat roślinny		Plon świeżej masy	Biogaz	Energia
		[t·ha ⁻¹]	[m ³ ·ha ⁻¹]	[GJ·ha ⁻¹]
Kukurydza		30-50	6050-6750	87-45
Lucerna		25-35	3960-4360	85-94
Żyto		30-40	1620-2025	35-43
Pszenżyto		30	2430	52
Burak	cukrowy korzeń	40-70	10260	220
	cukrowy liście	30-50	3375	72
Słonecznik		30-50	2430-3240	52-70
Rzepak		20-35	1010-1620	22-37

Tabela 2.3. Uzysk biogazu i potencjalna zawartość metanu w nawozach naturalnych [Wałowski i in. 2019, Sadecka, Suchowska-Kisielewicz 2016]

Podłoże	Uzysk biogazu		Zawartość CH ₄ [% obj.]
	[m ³ /t świeżej masy]	[m ³ /t s.m.o.]	
Gnojowica bydła	20-30	200-500	50-60
Gnojowica świń	20-35	300-700	50-70
Obornik bydła	40-50	210-300	55-60
Obornik świń	55-65	270-450	55-60
Obornik kurzy	70-90	250-450	60-70

Właściwości obornika i gnojowicy ulegają zmianom podczas procesu fermentacji. Następuje rozpad materii organicznej, zaś organiczny azot przetwarzany jest na amoniak itd. Efekty tych przemian mogą być korzystne z punktu widzenia pobierania składników nawozowych przez rośliny. Jednakże z procesem tym wiąże się także ryzyko nadmiernych strat składników nawozowych (drogą np. parowania amoniaku) w przypadku nieostrożnego obchodzenia się z przefermentowaną gnojowicą.

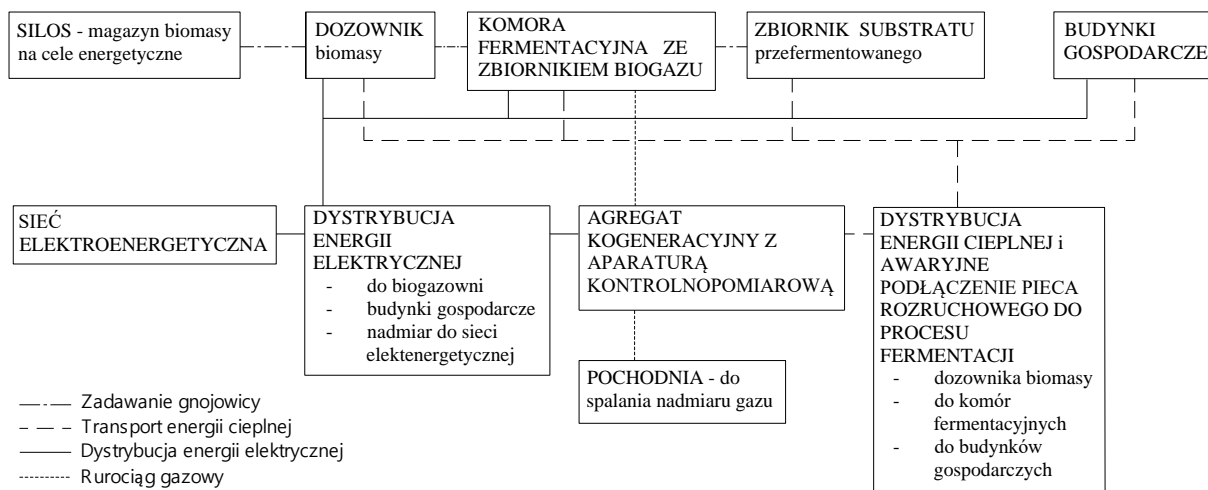
Czynniki wpływające na przebieg procesu fermentacji

Aby proces fermentacji był wydajny i przebiegał bez zakłóceń, trzeba zapewnić sprzyjające warunki do rozwoju mikroorganizmom biorącym udział w tym procesie. Podstawowymi składnikami pokarmowymi dla mikroorganizmów są białko, tłuszcz i węglowodany zawarte w biomacie. Jednak do prawidłowego funkcjonowania mikroorganizmów konieczne jest również dostarczenie im odpowiednich mikroelementów i pierwiastków śladowych. Ważny też jest stosunek węgla do azotu (C:N), ponieważ węgiel jest składnikiem metanu, a azot jest niezbędny do syntezy białka powstających, nowych komórek bakterii. Jednak przy nadmiarze azotu tworzy się amoniak, który już w niewielkich stężeniach hamuje rozwój bakterii. Z tego

względu stosunek C:N nie powinien być większy niż 100:3. Ze względu na preferowaną do rozwoju temperaturę rozróżniamy trzy grupy mikroorganizmów: psychrofilne – najlepiej rozwijają się w temperaturze 10-25°C, mezofilne – w temperaturze 32-38°C oraz termofilne w temperaturze 52-55°C. Im wyższa temperatura tym czas przemiany biomasy na metan jest krótszy.

W procesie fermentacji biorą udział różne mikroorganizmy, które mają różne wymagania wobec zawartości tlenu oraz kwasowości środowiska w którym żyją. Część bakterii fazy hydrolitycznej i kwasowej może przeżyć w obecności tlenu, ale bakterie fazy octanowej i metanowej wymagają środowiska beztlenowego. Bakterie fazy hydrolitycznej i kwasowej wymagają środowiska o wartości pH od 4,5 do 6,3, natomiast bakterie fazy octanowej i metanowej najlepiej rozwijają się w środowisku obojętnym w zakresie pH 6,8-7,5. Należy również pamiętać, że niektóre substancje zwane inhibitorami działają hamująco na rozwój bakterii, a tym samym na prawidłowy przebieg procesu. Szczególnie należy pamiętać, aby nie stosować substratów z zawartością preparatów bakteriobójczych, herbicydów, insektycydów oraz środków powierzchniowo czynnych. Kolejnym czynnikiem mającym wpływ na proces fermentacji jest mieszanie biomasy. Zabieg ten ma na celu: zapewnić przebieg procesów w sposób jednorodny w całej komorze, stabilizować temperaturę, utrzymać jednorodną konsystencję biomasy, ułatwić odgazowanie i zmniejszyć zawartość rozpuszczonego dwutlenku węgla, umożliwić wydzielanie wody nadosadowej, a tym samym zagęścić biomasę. Ważnym czynnikiem jest rozdrobnienie substratu. Rozdrobniony substrat ogranicza powstawanie kożucha, ułatwia mieszanie, zwiększa powierzchnię dostępu dla bakterii, dzięki czemu rozkład jest szybszy. Ziarna zbóż powinny być zgniecione lub rozdrobnione. W przypadku substratów będących wodnym roztworem substancji organicznych np. serwatki, niezbędne jest dodanie wypełniaczy takich jak węglan wapnia, na których bakterie będą mogły się zasiedlić. Światło w komorze fermentacyjnej spowolnia produkcję biogazu. Tlen jest toksyczny dla bakterii metanowych i dlatego instalacja musi być szczelna, a wsad możliwie maksymalnie odpowietrzony.

Z praktycznego punktu widzenia mogą posłużyć doświadczenia Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego Państwowego Instytutu Badawczego. Koncepcje tworzenia wielkości „mikro” biogazowni pokazano na rysunku 2.2, na którym uwzględniono podstawowe zespoły instalacji biogazowej.



Rys. 2.2. Schemat blokowy układu technologicznego nowoczesnej instalacji do pozyskania i zagospodarowania biogazu [opracowanie własne]

W przypadku stosowania materiałów wymagających higienizacji niezbędne jest uwzględnienie w planach biogazowni etapu higienizacyjnego. Po przejściu etapu obróbki wstępnej substrat przedostaje się do fermentatora, gdzie jest poddawany fermentacji.

W fermentacji ciągłej (mokrej) najczęstsze zastosowanie znajdują instalacje jednoetapowe, które pracują według metody przepływowej. W procesach dwuetapowych do fermentatora właściwego jest podłączony fermentator wstępny, który otwiera proces. W tymże fermentatorze wstępnym zostają optymalnie ustawione warunki dla pierwszych dwóch etapów procesu rozkładu (hydrolizy i tworzenia kwasów). Z fermentatora wstępnego substrat przedostaje się do fermentatora głównego. Osady pofermentacyjne są składowane w zamkniętych fermentatorach do dofermentowania z wykorzystaniem biogazu lub w otwartych zbiornikach na osady pofermentacyjne i z reguły, jako nawóz płynny, zostają wywiezione na grunty rolne.

Na rysunku 2.3 przedstawiono przykładowy dobór wielkości (m^3 , t) potrzebnych substratów i nawozów naturalnych oraz wielkości powierzchni upraw pod rośliny energetyczne (np. kiszonkę czy zielonkę), pojemności silosów, wielkości komory fermentacyjnej w zależności od mocy elektrycznej agregatu. Są to biogazownie głównie powyżej $400 m^3$ pojemności reaktora. Dobór wielkości komory fermentacyjnej w mikrobiogazowni oraz wielkości i rodzaju substratu niezbędnego do określonej projektowanej mocy agregatu, przedstawiono w tabeli 2.4, natomiast tabela 2.5 przedstawia obsadę zwierząt (DJP) i powierzchnię gruntów ornych (ha) w odniesieniu do typów instalacji przyjętych mikrobiogazowni od 10 kW do 50 kW.

Typ instalacji	Moc agregatu	Komora fermentacyjna	Gnojowica/obornik	Powierzchnia upraw	Powierzchnia silosu
G	40 kW	400 m ³	17 m ³ na dzień	0 ha	0 m ³
S	75 kW	800 m ³	1800 m ³ gnojowicy 1150 t obornika	20 ha	1100 m ³
M	110 kW	900 m ³	1800 m ³ gnojowicy 1150 t obornika	30 ha	1700 m ³
L	150 kW	1100 m ³	1800 m ³ gnojowicy 1150 t obornika	50 ha	2700 m ³
XL	180 kW	1200 m ³	1800 m ³ gnojowicy 1150 t obornika	60 ha	3300 m ³
XXL	250 kW	1700 m ³	1800 m ³ gnojowicy 1150 t obornika	90 ha	5000 m ³

Rys. 2.3. Charakterystyka danych wejściowych w zależności od potrzeb mocy agregatu według katalogu firmy AgriKomp France [2011]z uwzględnieniem mikrobiogazowni (typ instalacji G)

Tabela. 2.4. Charakterystyka danych wyjściowych w zależności od potrzeb mocy agregatu według badań własnych dla mikrobiogazowni [opracowanie własne]

Typ instalacji	Moc agregaty [kW]	Komora fermentacyjna [m ³]	Gnojowica/obornik lub biomasa [m ³ /dzień]
1	10	100	5
2	20	200	10
3	30	300	15
4	40	400	20
5	50	500	25

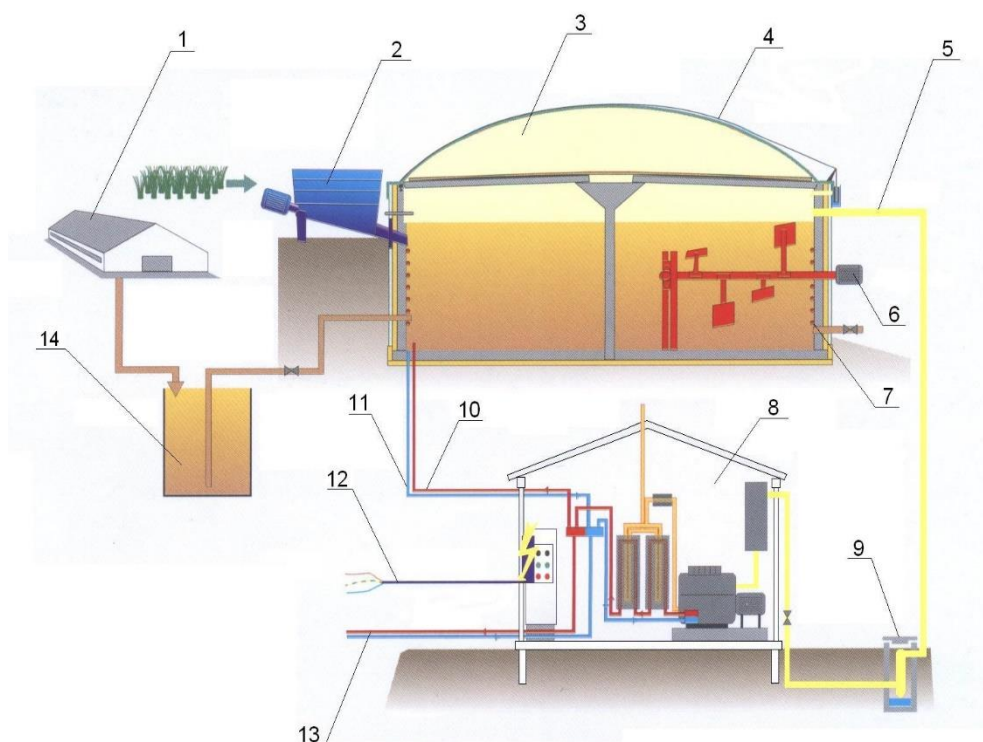
Tabela 2.5. Obliczeniowa obsada zwierząt (DJP) i powierzchnia gruntów ornych (ha) w odniesieniu do typów mikrobiogazowni [opracowanie własne]

Typ instalacji	Obsada [DJP]	Powierzchnia gruntów ornych [ha]	Powierzchnia upraw energetycznych [ha]
1	100	0	0
2	50	55-80	5,0
3	50	55-80	7,0
4	50	58-85	50
5	50	65-90	60

Poszczególnym wartościom instalacji biogazowych, począwszy od typu instalacji -1 o mocy agregatu kogeneracyjnego 10 kW do mocy 50 kW - typu instalacji -5, przypisane są wielkości: komór fermentacyjnych, ilości niezbędnej gnojowicy, powierzchni upraw, pojemność silosu do magazynowania kiszonki. Podane parametry poszczególnych węzłów (modułów) technologicznych są określone orientacyjnie, pozwalają jednak na wykonanie założeń do konkretnych projektów.

2.2.2. Rozwiązanie instalacji biogazowych ze zbiornikiem biogazu nad komorą fermentacyjną.

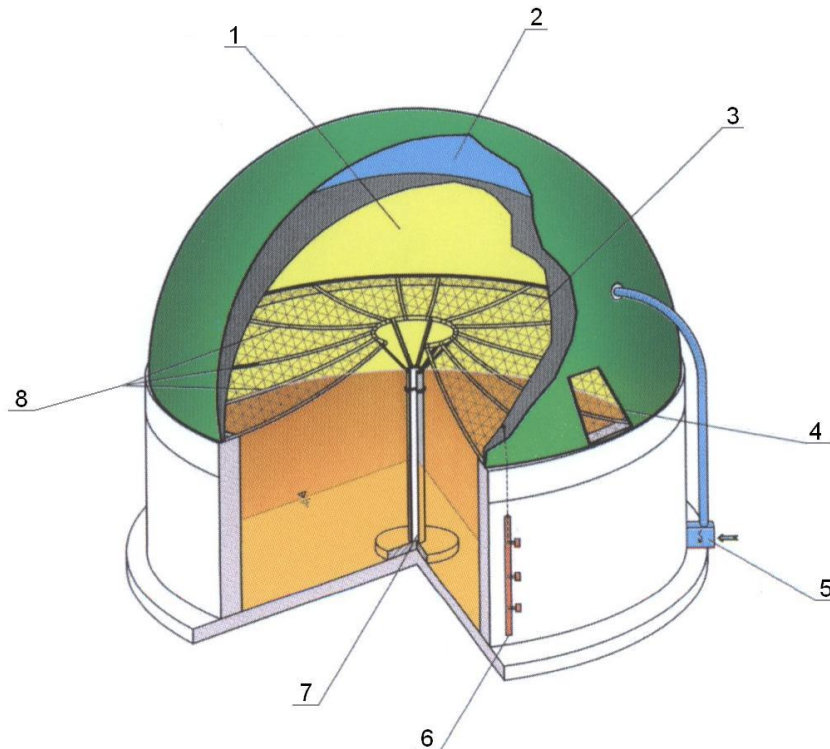
Nawiązując do rozwiązania pokazanego na rysunku 2.3 przedstawiono rozwiązanie komory fermentacyjnej z podstawowymi elementami urządzeń do zasilania substratem oraz sposób magazynowania biogazu a także dystrybucji energii elektrycznej i ciepłej (rysunek 2.4)



Rys. 2.4. Schemat instalacji komory fermentacyjnej z elementami urządzeń do zasilania substratem (gnojowica + biomasa roślinna): 1 – obora; 2 – system dozowania biomasy; 3 – zbiornik fermentacyjny; 4 – membrana zbiornika biogazu; 5 – przewód biogazowy; 6 – mieszadło; 7 – instalacja grzewcza; 8 – maszynownia z agregatem; 9 – odwadniacz; 10, 11 –

energia cieplna zasilająca; 12 –energia elektryczna do wykorzystania w gospodarstwie lub sprzedaży; 13 –energia cieplna do wykorzystania w gospodarstwie, 14 – zbiornik wstępny na substrat [opracowanie własne]

Szczegółowe rozwiązanie komory fermentacyjnej a także zbiornika na biogaz przedstawiono na rysunku 2.5.



Rys. 2.5. Schemat technologiczny komory fermentacyjnej z podwójną membraną na biogaz
1 – zbiornik biogazu; 2 – zbiornik (pojemnik) powietrza regulowany ciśnieniem; 3 – osłona z siatki nylonowej; 4 – otwór kontrolny; 5 – sprężarka (dmuchawa) do powietrza; 6 – wskaźnik poziomu masy w fermentatorze; 7 – słup podporowy ze stali kwasoodpornej lub betonu; 8 – przęsła podtrzymujące zbiornik biogazu [opracowanie własne]

Pompa układu mieszania np. typu UM 200-125 zasysa za pomocą rurociągu gnojowicę z dolnej części komory i tłoczy do jej górnej części. W celu niedopuszczenia do gromadzenia się osadów na dnie komory istnieje możliwość przetłaczania jej do górnej części komory, powodując w ten sposób intensywne wymieszanie. Rurociąg spustowy umożliwia opróżnianie komory fermentacyjnej przez odprowadzenie jej zawartości do zbiornika magazynującego gnojowicę przefermentowaną. Na fotografii 2.1 pokazano mieszadło łopatkowe wolnoobrotowe w komorze o pojemności około 500 m³ z motoreduktorem zainstalowanym na zewnątrz komory fermentacyjnej. Po wewnętrznej stronie komory zamocowane są przewody do instalacji CO wykonanych z poliuretanu.

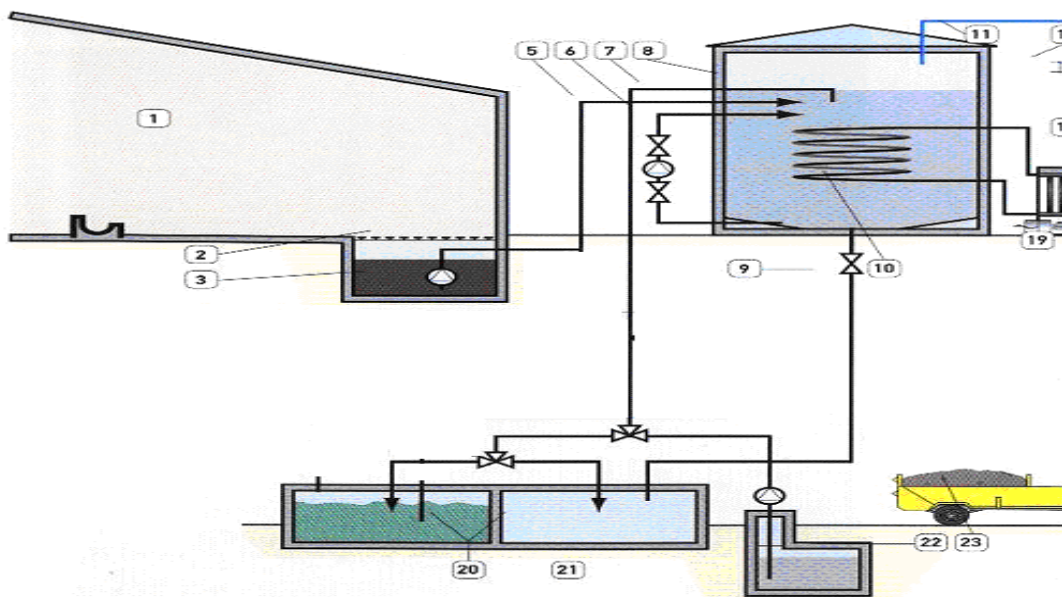


Fot. 2.1. Widok usytuowania mieszadła poziomego (łopatkowego) w komorze fermentacyjnej z instalacją grzewczą [katalog firmy AgriKomp France 2011]

2.2.3. Zastosowanie w praktyce instalacji biogazowych z wydzielonym zbiornikiem biogazu

Przykładową mikrobiogazownię z komorą fermentacyjną o pojemności 100-500 m³ (10-50 kW) przedstawiono poniżej (rys. 2.6, 2.7 i 2.8). Zrealizowane biogazownie były przedmiotem badań w trakcie których określono charakterystykę procesu technologicznego łącznie z zagospodarowaniem substratu pofermentacyjnego.

Według schematu koncepcyjnego technologii przedstawionego na rysunku 2.6. gnojowica z budynku inwentarskiego spływa grawitacyjnie kanałem do zbiornika wstępnego. W zbiorniku tym gnojowica jest mieszana za pomocą pompy wirowej, a następnie transportowana przewodem do komory fermentacyjnej.

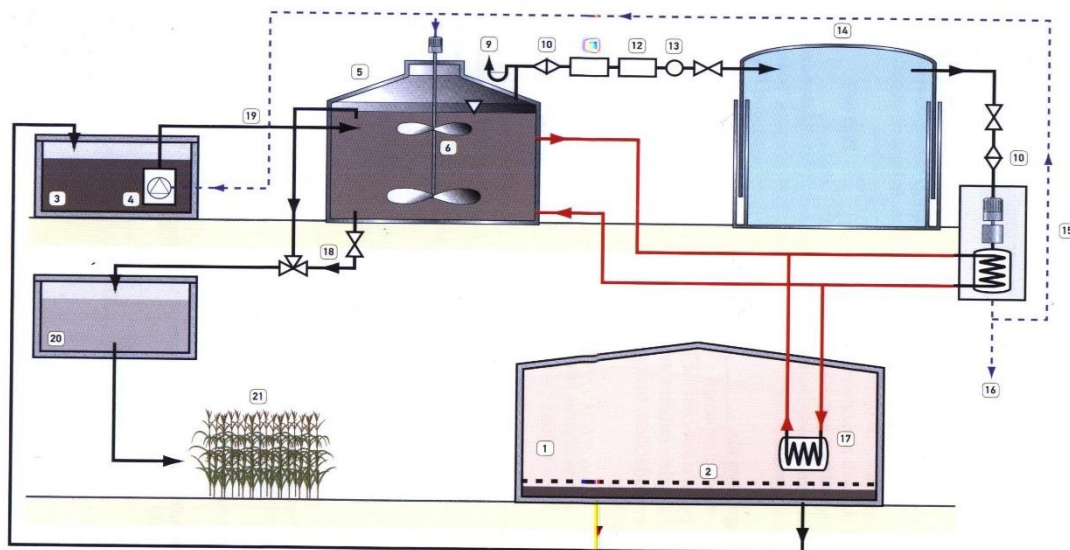


Rys. 2.6. Technologia produkcji biogazu i bionawozu z komorą fermentacyjną 500 m³:

1 – budynek inwentarski, 2 – ruszt, 3 – kanał gnojowicowy (zbiornik wstępny), 4 – zbiornik do wykorzystania na potrzeby kompostowania, 4a – zbiornik wstępny na substraty, 5 – rurociąg zasilający, 6 – rurociąg mieszający, 7 – przelew, 8 – komora fermentacyjna, 9 – rurociąg spustowy, 10 – nagrzewnica, 11 – rurociąg gazowy, 12 – bezpiecznik, 13 – przerywacz płomienia, 14 – odwadniacz, 15 – odsiarczalniki, 16 – gazomierz, 17 – zbiornik gazu, 18 – przerywacz płomienia, 19 – piec c.o. lub ciepła woda zasilana z agregatu prądotwórczego, 20 – komory spustowe masy pofermentacyjnej na potrzeby kompostowania, 21 – drenaż, 22 – zbiornik na odciek, 23 – rozrzutnik z ciągnikiem, 24 – płyta kompostowa, 25 – wentylator [opracowanie własne]

Komora fermentacyjna zasilana jest raz lub dwa razy dziennie dobową produkcją gnojowicy. Wyposażenie komory w rurociąg przelewowy zapewnia odprowadzenie do zbiornika magazynującego komory kompostowej takiej samej ilości gnojowicy przefermentowanej, jaką została zasilona komora fermentacyjna. Przewiduje się trzykrotne mieszanie zawartości komory fermentacyjnej w ciągu doby, układem mieszania typu hydraulicznego. Każdorazowo czas mieszania będzie wynosić ok. 10 minut.

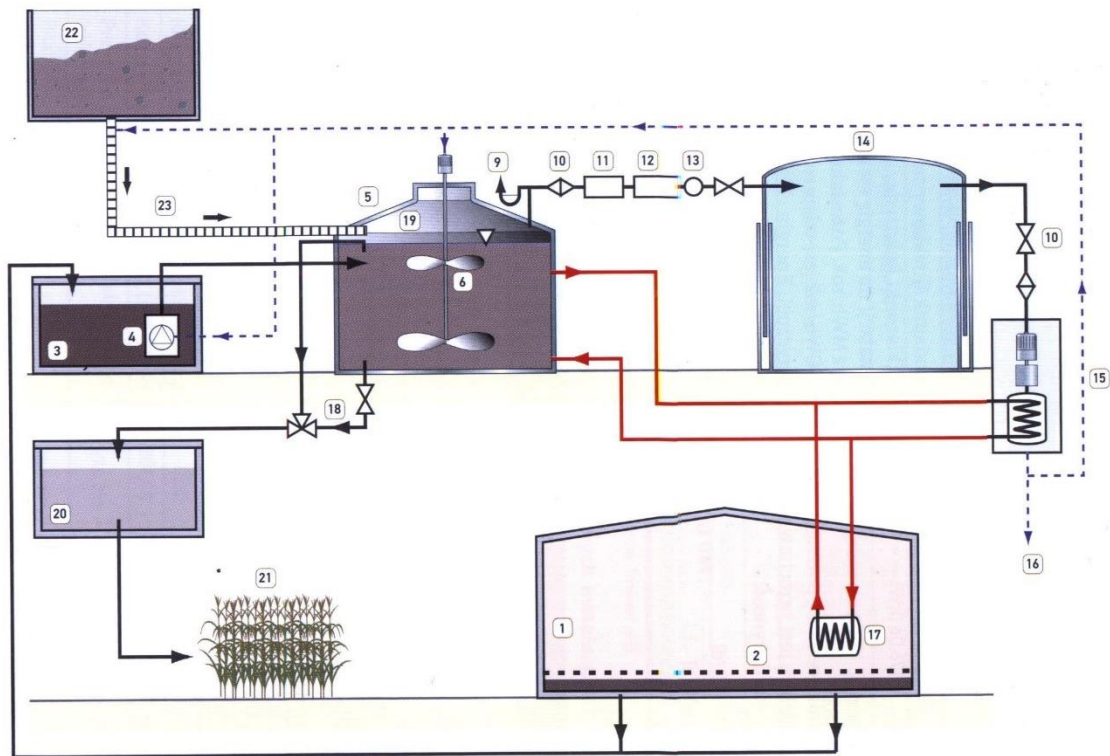
Uzupełnieniem powyższej koncepcji jest przedstawiony na rysunku 2.7 schemat instalacji komory fermentacyjnej z centralnym mieszadłem substratu poddanego fermentacji mezofilnej.



Rys. 2.7. Schemat technologiczny instalacji biogazowej (koncepcja) przystosowanej dla gospodarstw o koncentracji około 200 DJP z możliwością przystosowania dla mikrobiogazowni (substrat do fermentacji pochodzi z nawozu naturalnego):

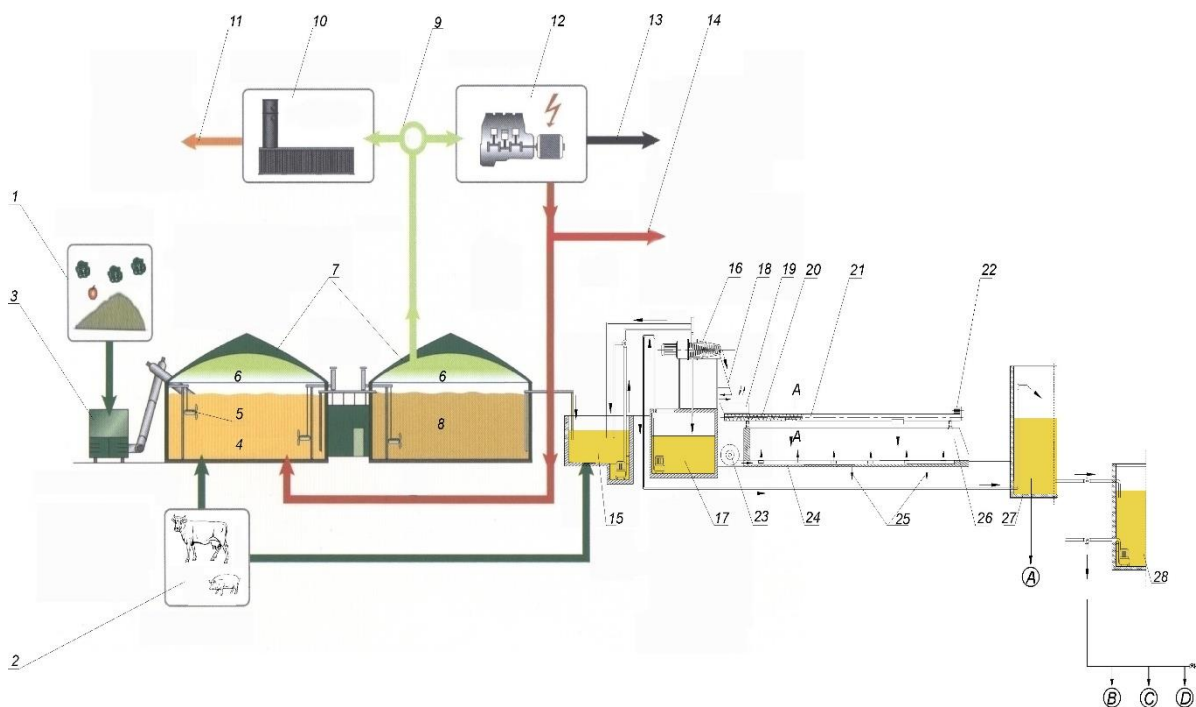
1 - budynek inwentarski, 2 - ruszt, 3 - zbiornik wstępny gnojowicy, 4 - pompa substratu, 5 - komora fermentacyjna z izolacją cieplną, 6 - mieszalniki łopatkowe, 7 - ogrzewnica komory fermentacyjnej, 8 - rurociąg biogazu, 9 - bezpiecznik biogazu, 10 - przerywacz płomienia, 11 - odwadniacze, 12 - odsiarczalniki, 13 - licznik gazu, 14 - zbiornik gazu, 15 - generator prądotwórczy w układzie kogeneracyjnym, 16 - przyłączenie do sieci energetycznej, 17 - ogrzewanie budynków inwentarskich, 18 - rurociąg spustowy gnojowicy przefermentowanej, 19 - przelew gnojowicy przefermentowanej, 20 - zbiornik gnojowicy przefermentowanej, 21 - zagospodarowanie rolnicze gnojowicy przefermentowanej [opracowanie własne]

Na rysunku 2.8 pokazano układ instalacji biogazowej z elementami urządzenia do zasilania substratu z nawozu naturalnego i biomasą roślinną.



Rys. 2.8. Schemat technologiczny instalacji biogazowej (koncepcja) przystosowanej dla gospodarstw o koncentracji około 200 DJP z możliwością przystosowania dla mikrobiogazowni (substrat do fermentacji pochodzi z nawozu naturalnego i produkcji roślinnej): 1 - budynek inwentarski, 2 - ruszt, 3 - zbiornik wstępny gnojowicy, 4 - pompa substratu, 5 - komora fermentacyjna z izolacją cieplną, 6 - mieszalniki łopatkowe, 7 - ogrzewnica komory fermentacyjnej, 8 - rurociąg biogazu, 9 - bezpiecznik biogazu, 10 - przerywacz płomienia, 11 - odwadniacze, 12 - odsiarczalniki, 13 - licznik gazu, 14 - zbiornik gazu, 15 - generator prądotwórczy w układzie kogeneracyjnym, 16 - przyłączenie do sieci energetycznej, 17 - ogrzewanie budynków inwentarskich, 18 - rurociąg spustowy gnojowicy przefermentowanej, 19 - przelew gnojowicy przefermentowanej, 20 - zbiornik gnojowicy przefermentowanej, 21 - zagospodarowanie rolnicze gnojowicy przefermentowanej, 22 - zbiornik substratu (kiszonki z kukurydzy), 23 - podajnik ślimakowy substratu (kiszonki z kukurydzy) [opracowanie własne]

Kompleksowe zagospodarowanie substratu pofermentacyjnego odseparowanego z elementami magazynowania substratu o zawartości ok. 32% suchej masy przygotowanego do dalszego wykorzystania na potrzeby np. granulacji przedstawiono na rysunku 2.9.



Rys. 2.9. Schemat zagospodarowania ciekłych nawozów naturalnych oraz rolniczej biomasy odpadowej poprzez wytwarzanie biometanu oraz odseparowanie frakcji stałej z gnojowicy: 1 - rolnicza biomasa odpadowa, 2 - gnojowica zwierząt inwentarskich, 3 - magazynowanie biomasy i podawanie biomasy, 4 - fermentor, 5 - mieszadło, 6 - zbiornik biogazu, 7 - przykrycie membranowe (dwuwarstwowe), 8 - zbiornik (komora) na masę pofermentacyjną (II etap), 9 - instalacja transportu biogazu, 10 - przetwarzanie biogazu w biometan, 11 - wprowadzenie gazu do sieci, 12 - kogenerator (CHP), 13 - prąd elektryczny, 14 - instalacja transportu ciepła, 15 - zbiornik na masę pofermentacyjną i gnojowicę, 16 - separator, 17 - zbiornik na frakcję ciekłą, 18 - mechanizm regulacyjny, 19 - kosz zasypowy, 20 - przenośnik ślimakowy, 21 - obudowa rurowa, 22 - motoreduktor, 23 - wentylator, 24 - ruszt, 25 - odciek, 26 - ściana silosu magazynującego, 27 - zbiornik na frakcję ciekłą po separacji, 28 - zbiornik do magazynowania deszczówki i odcieku z separacji. A - zagospodarowanie masy pofermentacyjnej jako nawozu naturalnego (aplikacja na pole), B - samospływ ciągły lub okresowy, C - kanał płytki, D - kanał do spławiania podciśnieniowego [opracowanie własne]

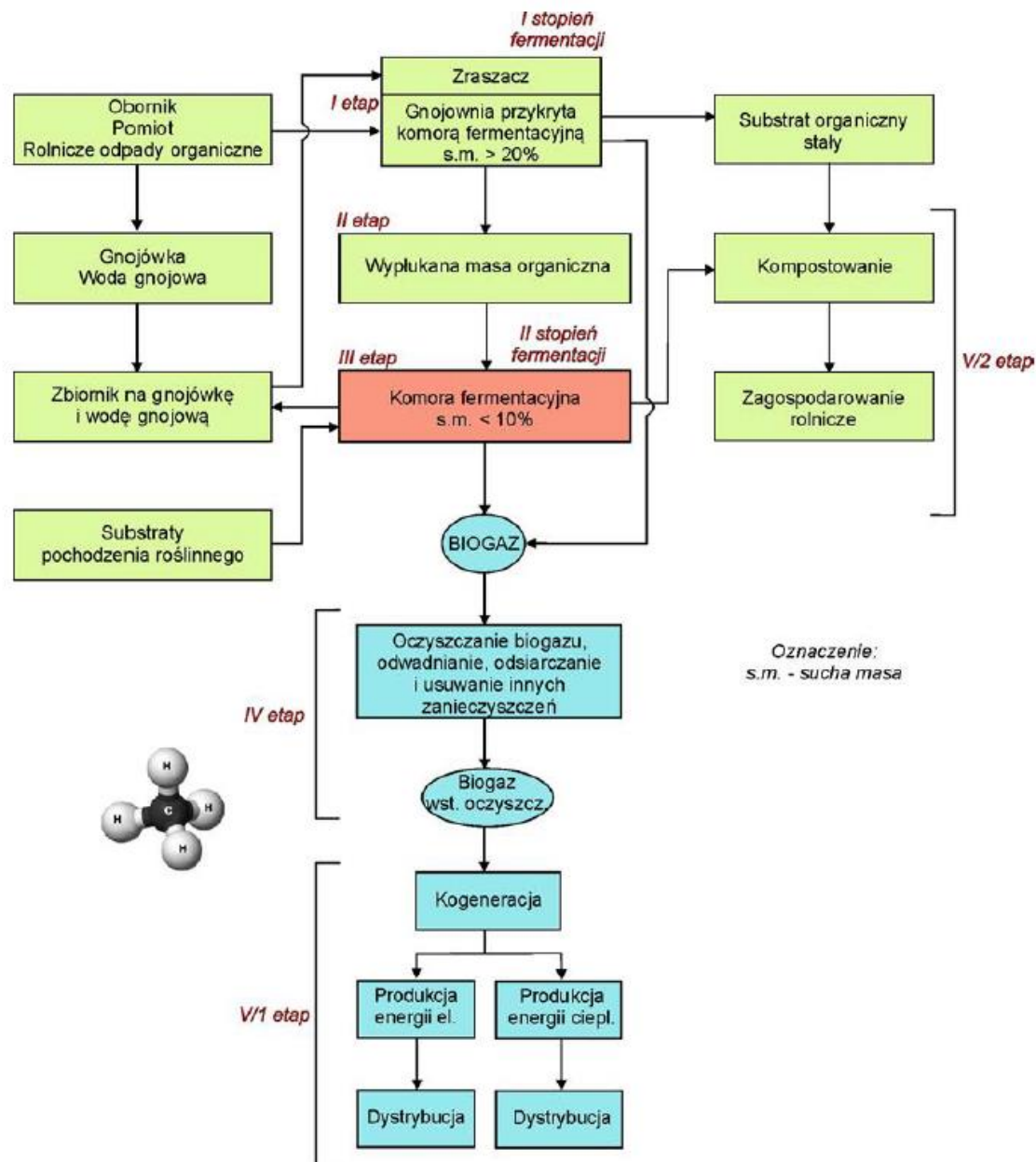
Na potrzeby zagospodarowania ekologicznego nawozów naturalnych w postaci płynnej magazynowanych w zbiorniku A według powyższego schematu. Dystrybucja substratu przefermentowanego odbywa się beczkowitzem wyposażonego w węże wlezione. natomiast odseparowany nawóz (zawierający ok. 30% suchej masy) jest do dyspozycji przerobu do granulacji.

2.2.4. Instalacje biogazowe na substrat o zawartości suchej masy powyżej 18%

Innowacyjnym rozwiązaniem dla instalacji biogazowych, który może być wykorzystany w mikrobiogazowniach jest instalacja substrat o zawartości suchej masy powyżej 18%. Rozwiązanie to polega na wytworzeniu biogazu ze stałych odchodów gromadzonych na płycie obornikowej, w „oborze głębokiej” i przepłukiwanie ich w komorze fermentacyjnej gnojowicą lub wodą gnojową podczas fermentacji metanowej.

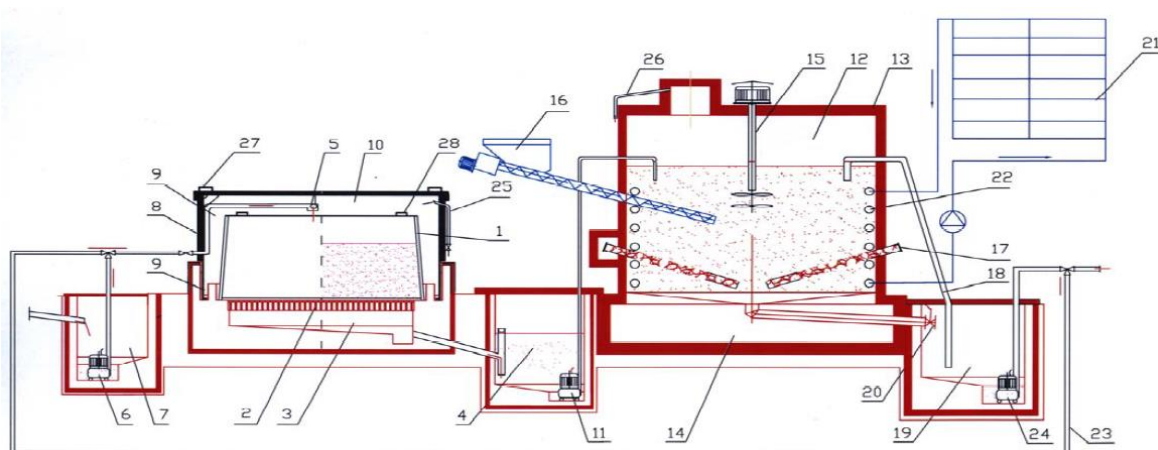
Algorytm procesu technologicznego pozyskania biogazu i obróbki masy pofermentacyjnej przedstawiono na rysunku 2.10. Poszczególne etapy procesu przedstawiono na tym

algorytmie od I etapu do etapu V/1 (produkcja i dystrybucja energii elektrycznej i ciepłej) oraz etap V/2 rozgospodarowanie rolniczego kompostu z substratu pofermentacyjnego.



Rys. 2.10. Schemat (algorytm) procesu technologicznego pozyskania biogazu i obróbki masy pofermentacyjnej [opracowanie własne]

Biogazownia według powyższego algorytmu - schematu przedstawionego na rysunku 2.11 składa się z dwóch komór fermentacyjnych oraz zbiornika wstępnego i pofermentacyjnego, a także niezbędnych urządzeń towarzyszących.



Rys. 2.11. Instalacja biogazowa do substratów o zawartości powyżej 20% suchej masy (urządzenie do wytwarzania biogazu z nawozów naturalnych):

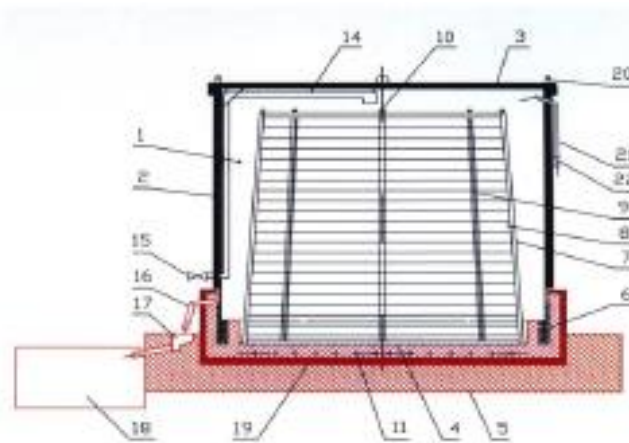
1 - pojemnik wewnętrzny w kształcie ostrosłupa ściętego; 2 - ruszt; 3 - kanał na odciek masy organicznej; 4 - zbiornik; 5 - zraszacz; 6 - pompa ciśnieniowa; 7 - zbiornik, do którego dopływa gnojówka; 8 - zewnętrzny pojemnik w kształcie prostopadłościanu z termiczną izolacją; 9 - pierścień cieczowy; 10 - hermetyczna komora; 11 - pompa; 12 - komora fermentacyjna; 13 - termiczny płaszcz; 14 - termicznie zaizolowana ława fundamentowa; 15 - mieszadło śmigłowe; 16 - ślimakowy przenośnik - dozownik; 17 - rurowe perforowane pojemniki z granulami keramzytowymi; 18 - syfon przelewowy masy pofermentacyjnej; 19 - zbiornik; 20 - zawór spustowy osadu; 21 - kolektor słoneczny; 22 - rurowy wymiennik ciepła; 23 - termicznie izolowany rurociąg; 24 - pompa; 25 - gazowy rurociąg; 26 - gazowy rurociąg; 27 - uchwyt rurociągu; 28 - uchwyt przykrycia [opracowanie własne]

Schemat urządzenia według patentu nr 218837 do wytwarzania biogazu może być jednym z rozwiązań modelowych biogazowni oraz mikrobiogazowni dostosowanych do warunków gospodarstwa rolnego i elementów infrastruktury w nim występujących. Głównym zespołem urządzenia (instalacji) do wytworzenia biogazu z nawozów naturalnych z dodatkiem roślin energetycznych lub odpadów organicznych jest komora (gnojownia) hermetyczna, stanowiąca przedmiot patentu nr 218837. Istotą tego wynalazku jest konstrukcja urządzenia (komory gnojowej) do wytwarzania biogazu ze stałych odpadów rolniczych, zwłaszcza obornika, mająca termiczną fermentacyjną komorę z podgrzewaczem, wyposażoną w zraszacz, odpływ nadmiaru gnojowej cieczy i odpływ biogazu, charakteryzująca się tym, że fermentacyjna komora utworzona jest ze ściadowego termicznego pierścienia z przytwierdzoną do niego górną pokrywą, natomiast spódnią część termicznego pierścienia jest hermetycznie osadzona w cieczowym pierścieniu ukształtowanym w dolnej pokrywie, na której jest osadzony pojemnik będący we wnętrzu fermentacyjnej komory, przy czym pojemnik ma postać ściętego ostrosłupa otwartego na spodzie i górze, mającego ażurowe boczne ścianki. Wymienione ścianki utworzone są z pochyłych nośnych słupów połączonych płytkami. W górnej części pojemnika i do komorowej górnej pokrywy przytwierdzone są nośne uchwyty. Urządzenie zapewnia sprawny załadunek fermentacyjnego wsadu, proces fermentacji i rozładunek wykorzystanego wsadu. Konstrukcja fermentacyjnej komory wyposażonej w uchwyty, osadzonej w hermetycznym kanale zapewnia szczelność i możliwość jej unoszenia oraz opuszczania w zależności od potrzeb załadunku i rozładunku fermentacyjnego wsadu do pojemnika. Pojemnik z ażurowymi ściankami usytuowany we wnętrzu komory fermentacyjnej

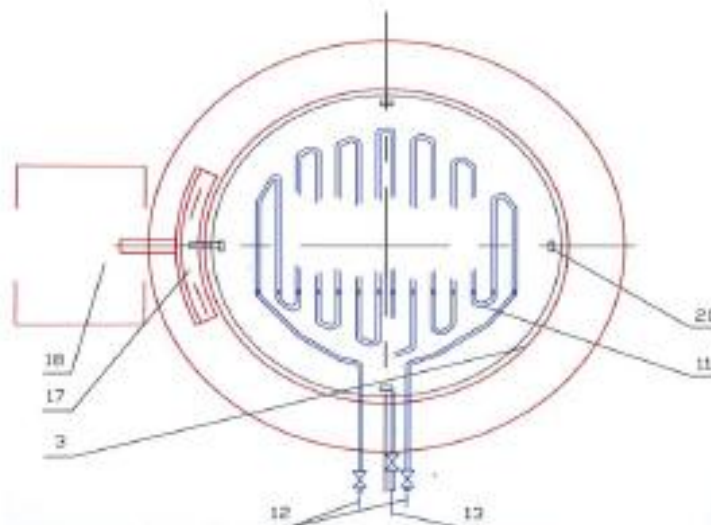
umożliwia skuteczne wykorzystanie umieszczonego w nim wsadu z wykorzystaniem zraszacza i grzałki w zależności od potrzeb fermentacji, a także umożliwia poprzez uchwyty unoszenie pojemnika i rozładunek wykorzystanego wsadu z dna fermentacyjnej komory. Skuteczne opróżnianie składającego się ze stałych cząsteczek wsadu z pojemnika zapewniają jego pochyłe ażurowe ścianki.

Przedmiot wynalazku jest przedstawiony na rysunku 2.12 a, na którym przedstawiono urządzenie w przekroju wzdłużnym, natomiast rysunek 2.12 b przedstawia urządzenie w widoku z góry.

a)



b)



Rys. 2.12.a i b. Schemat rozwiązania komory hermeticznej instalacji biogazowej do stałych substratów: 1 – komora fermentacyjna; 2 – termiczny ściankowy pierścień; 3 – górna pokrywa; 4 – spodnia pokrywa; 5 – fundamentowa ława; 6 – cieczowy pierścień; 7 – pojemnik; 8 – pochyłe nośne słupy; 9 – płytki; 10 – nośne uchwyty; 11 – rurkowa nagrzewnica; 12 – doprowadzające zawory; 13 – odpływowy zawór; 14 – zraszacz; 15 – zawór; 16 – odpływowy otwór; 17 – odpływowa rynna; 18 – zbiornik; 19 – termiczna izolacja; 20 – nośne uchwyty; 21 – odpływowy biogazowy przewód; 22 – zawór [opracowanie własne]

Urządzenie zbudowane jest z fermentacyjnej komory 1, utworzonej z termicznego ściankowego pierścienia 2 zespolonego z górną pokrywą 3. Na spodzie fermentacyjna komora ma spodnią pokrywą 4 osadzoną na fundamentowej ławie 5. W spodniej pokrywie 4 jest

ukształtowany cieczowy pierścień 6, w którym ciecz hermetycznie uszczelnia dolne ścianki termicznego ściankowego pierścienia 2 fermentacyjnej komory 1. Pojemnik 7 zbudowany jest w postaci ściętego ostrosłupa otwartego na spodzie i górze, mającego ażurowe boczne ścianki utworzone z pochyłych nośnych słupów 8 połączonych płytkami 9. W górnej części pojemnik 7 ma montażowe uchwyty 10 służące do usadawiania pojemnika 7 na spodniej pokrywie 4. W ścianie spodniej pokrywy 4 zainstalowana jest rurkowa nagrzewnica 11 zasilana czynnikiem grzewczym rurociągu, mającym doprowadzające zawory 12 i odpływowy zawór 13. W fermentacyjnej komorze 1 zainstalowany jest zraszacz 14 z doprowadzającym gnojową ciecz zaworem 15. W dolnej części ściankowego pierścienia 2 fermentacyjnej komory 1 jest odpływowy otwór 16 gnojowej cieczy zapewniający poziom cieczy do wysokości usytuowania tego otworu. Odpływowy otwór 16 zespolony jest z odpływową rynną 17 połączoną ze zbiornikiem 18. Między spodnią pokrywą 4 fermentacyjnej komory 1, a fundamentową ławą 5 jest zamocowana termiczna izolacja 19. Do górnej pokrywy 3 są przytwierdzone montażowe uchwyty 20. W górnej części ściankowego termicznego pierścienia 2 fermentacyjnej komory 1 jest zamocowany odpływowy biogazowy przewód 21 z zaworem 22.

Działanie urządzenia jest następujące: po uniesieniu poprzez uchwyty 20 górnej pokrywy 3 ze ściankowym termicznym pierścieniem 2 napełniany jest wsadem np. obornikiem pojemnik 7. Następnie na pojemnik 7 nakładana jest górna pokrywa 3 ze ściankowym termicznym pierścieniem 2, którego spodnia część osadzona jest w cieczowym pierścieniu 6 dolnej pokrywy 4, co powoduje hermetyczne uszczelnienie fermentacyjnej komory 1. W wyniku fermentacji wsadu z wykorzystaniem w zależności od potrzeb nagrzewnicy 11 i zraszacza 14, uzyskany biogaz jest odprowadzany przewodem 21 do wykorzystania w zależności od potrzeb. Nadmiar cieczy z fermentacyjnej komory 1 odprowadzany jest odpływową rynną 17 do zbiornika 18. Po zakończeniu procesu fermentacji i ustania wydzielania biogazu unoszona jest poprzez uchwyty 20 ruchoma część fermentacyjnej komory 1, a następnie poprzez uchwyty 10 unoszony jest pojemnik 7. Ze spodniej pokrywy 4 fundamentowej ławy 5 usuwany jest zużyty wsad.

2.2.5. Oczyszczanie biogazu ze szczególnym uwzględnieniem odsiarczania

Kluczowym zagadnieniem dotyczącym tematyki biogazowni oraz mikrobiogazowni jest oczyszczanie biogazu zwłaszcza z siarkowodoru (H_2S) w celu jego wykorzystania na potrzeby kogeneracji lub bezpośrednio dystrybucji. Przykładowy sposób rozwiązania odsiarczania biogazu przedstawiono w rozdziale 3. Jest to sprawdzona technologia w ramach badań własnych ITP-PIB w zrealizowanej mikrobiogazowni.

Zawartości składników biogazu podano w tabeli 2.6.

Tabela 2.6 Średnia zawartość składników biogazu [%] [Wałowski i in. 2019]

Składniki biogazu	Czerwiec	Październik
CH ₄	56,2	59,95
CO ₂	40,1	35,79
H ₂ S	0,5	0,55
CO	0,3	0,40
N ₂	2,9	3,31

Wyniki badań gnojowicy pod względem redukcji zanieczyszczeń przed i po fermentacji metanowej przedstawiono w tabeli 2.7.

Tabela 2.7. Charakterystyka gnojowicy przed i po fermentacji metanowej [Romaniuk i in. 2012]

Oznaczenie	Jednostka	Przed fermentacją	Po fermentacji
ChZT ($K_2Cr_2O_7$)	mg·dm ⁻³	810,0	380,0
BZT ₅	mg·dm ⁻³	476,0	290,0
Zawiesina ogólna	g·dm ⁻³	55,5	44,0
Zawiesina mineralna	g·dm ⁻³	4,4	3,6
Sucha pozostałość	g·dm ⁻³	74,0	59,0
Pozostałość po prażeniu	g·dm ⁻³	15,4	15,0
Fosforany	g·dm ⁻³	0,032	0,022
Fosfor ogólny	g·dm ⁻³	0,011	0,007
Azot amonowy	g·dm ⁻³	0,208	0,126
Azot azotanowy	g·dm ⁻³	0,078	0,050

Czynniki sprzyjające prawidłowej fermentacji w biogazowniach oraz mikrobiogazowniach to:

- zakres temperatur 35-38°C (przy czym wskazane jest utrzymywanie stałej temperatury);
- zawartość suchej masy, co najmniej 5%;
- mieszanie hydrauliczne lub mechaniczne (zapobiegające rozwarstwianiu się gnojowicy na frakcje i uaktywniające pracę bakteriom);
- odczyn pH = 6,5-7,5;
- proporcja C do N_{max} = 100 do 3.

Fermentacja metanowa substratów rolniczych, zwłaszcza gnojowicy, pozwala na następujące stwierdzenie:

1. Jednym z produktów fermentacji jest biogaz palny z przewagą metanu w ilości 1,0 m³ (średnio) z 1 m³ komory o wartości opałowej ok. 23 MJ·m⁻³.
2. Pozostałym produktem beztlenowego procesu jest przefermentowana gnojowica, mająca lepsze właściwości nawozowe i sorpcyjne niż surowa, ponieważ:
 - w czasie fermentacji nie obserwuje się strat cennego azotu, a jedynie redukcję do azotu amonowego, bardziej przyswajalnego dla roślin;
 - pH wzrasta z 7 do 8;
 - zmniejsza się zawartość substancji organicznych o 30-50%, co powoduje zmniejszenie proporcji węgla do azotu (C:N); jest to bardzo korzystne, jeśli przefermentowaną gnojowicę wylewa się na pola, gdzie występują resztki poźniwne lub pastwiskowe;
 - fosfor i potas występują również w postaci łatwiej przyswajalnej dla roślin;
 - nasiona chwastów tracą siłę kiełkowania;
 - przefermentowana gnojowica ma mniej nieprzyjemny zapach i korzystniejszą konsystencję, łatwiej się odwadnia.
3. Gnojowica przefermentowana zmniejsza zagrożenie sanitarne przylegających pól i okolic mieszkalnych, ponieważ:
 - redukuje się do minimum liczbę bakterii chorobotwórczych;

- unika się przeciążenia gleby, wód i roślinności ciałami szkodliwymi, które w procesie fermentacji ulegają rozłożeniu na związki proste wykorzystane w procesie sorpcyjnym gleby;
- obserwuje się zmniejszenie objętości gnojowicy, co ułatwia jej zagospodarowanie;
- redukuje się podstawowe zanieczyszczenia, takie jak: biochemiczne zapotrzebowanie tlenu w ciągu 5 dób (BZT₅) o 60-80% i chemiczne zapotrzebowanie tlenu (ChZT) o 50-60%.

2.2.6. Wykorzystanie biogazu

Biogaz można wykorzystywać na kilka sposobów. Spalany w kotle wytwarza ciepło, zaś w urządzeniu do produkcji skojarzonej – energię elektryczną oraz ciepło. Może też trafiać do małych sieci lokalnych i być wykorzystywany w gospodarstwach indywidualnych.

Kotły na biogaz

Do spalania biogazu można też stosować po drobnych modyfikacjach kotły na gaz naturalny. Na rynku oferowane są różne kotły o wydajności cieplnej od kilku do kilkuset kW czy nawet kilku megawatów. Nowoczesne kotły na gaz naturalny mają dużą sprawność wynoszącą ponad 90% w przypadku najlepszych rozwiązań. Z biogazu o zawartości metanu wynoszącej 65% można zatem uzyskać do 6 kWh/m³ ciepła.

Biogaz poddawany jest oczyszczaniu (odwodnieniu i odsiarczeniu) przed wykorzystaniem go w agregacie kogeneracyjnym na energię cieplną i elektryczną.

Urządzenia do produkcji skojarzonej

Urządzenie do produkcji skojarzonej składa się zasadniczo z silnika połączonego z agregatem prądotwórczym. Agregat wytwarza energię elektryczną, ciepło zaś odzyskiwane jest z systemów chłodzenia silnika oraz ze schładzania gazów wydechowych z silnika. Standardowe urządzenia do skojarzonej produkcji energii elektrycznej i ciepła z biogazu mają wydajność elektryczną od 7,5 kW do ponad 1 MW. Jednakże dowolny silnik wysokoprężny lub silnik na gaz naturalny można zasadniczo przebudować bądź zmodyfikować przystosowując go do biogazu. Wydajność elektryczna urządzeń do produkcji skojarzonej uległa znacznej poprawie w ciągu ostatnich dziesięcioleci, nadal jednak występuje tu znaczne zróżnicowanie, zależne przede wszystkim od rozmiarów urządzenia. Wydajność waha się od około 20% dla urządzeń najmniejszych do prawie 40% w przypadku najwydajniejszych dużych urządzeń. Produkcja energii elektrycznej z 1 m³ biogazu o zawartości metanu 65% wynosi zatem od 1,3 kWh do ok. 2,5 kWh. Produkcja ciepła waha się od 2,9 kWh do ok. 4,2 kWh.

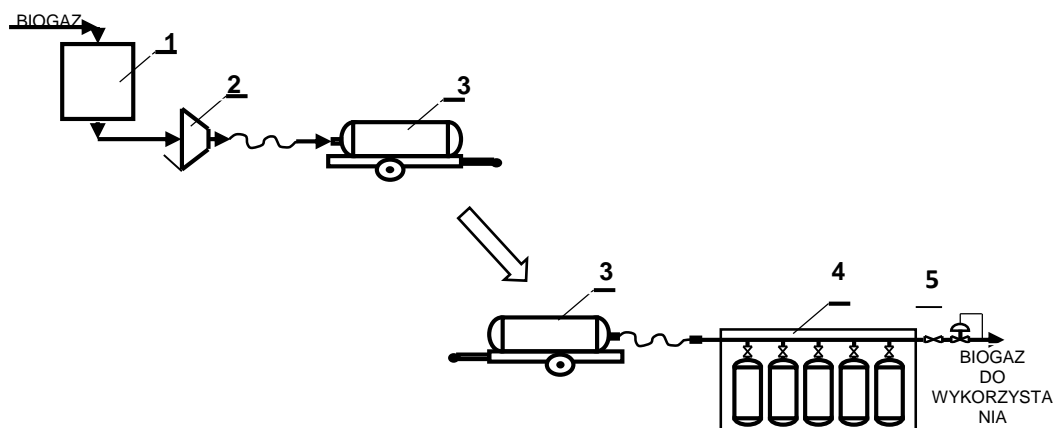
W większości przypadków biogaz wymaga oczyszczenia z H₂S przed wykorzystaniem w urządzeniu do produkcji skojarzonej. Podczas spalania H₂S wchodzi w reakcję z tlenem wytwarzając H₂SO₄ (kwas siarkowy), którego obecność w silniku powoduje silną korozję, a zatem skraca żywotność urządzenia. Oczyszczanie biogazu z H₂S można przeprowadzić na kilka sposobów, na przykład przy zastosowaniu różnych typów filtrów zawierających tlenki żelaza. Najprostszym sposobem jest przeprowadzenie biogazu ponad powierzchnią gnojowicy (np. w przykrytym zbiorniku na gnojowicę) przy jednoczesnym wprowadzeniu do otoczenia niewielkich ilości powietrza (4%). Przy takim sposobie, bakterie siarkowe przejmują H₂S, w związku z tym siarka pozostaje w materiale przefermentowanym, nie zaś w biogazie. Stężenie H₂S w biogazie wynosi zwykle 200-18000 mg·m⁻³, a po odsiarczeniu dopuszczalna ilość wynosi 100 mg·m⁻³ dla silników spalinowych w pojazdach, 1000 ppm dla kotłowni gazowych, a do sieci

gazu ziemnego poniżej $7 \text{ mg}\cdot\text{m}^{-3}$. W związku z tym, biogaz po oczyszczeniu - odwodnieniu i odsiarczeniu, nie powodują korozji silników i kotłów.

Wytworzoną energię elektryczną można wykorzystać w gospodarstwie lub odpłatnie przekazać do publicznej sieci elektrycznej. Ciepło można wykorzystać w gospodarstwie do ogrzewania budynków mieszkalnych i/lub inwentarskich, albo też w małych lokalnych ciepłowniach wiejskich.

Sprężanie, dystrybucja i rozprężanie biogazu w celu dalszego wykorzystania

Istotę wynalazku stanowi układ do transportu niewielkich ilości biogazu składający się z węzła sprężania oraz pojemnika wysokociśnieniowego umieszczonego na platformie jezdnej, z którego gaz jest przekazywany do zespołu magazynowania i rozprężania znajdującego się w miejscu wykorzystania biogazu, przy czym na wlocie biogazu, przed węzłem sprężania, jest umieszczony moduł oczyszczania surowego biogazu, który usuwa co najmniej zanieczyszczenia mechaniczne i zawieszane krople cieczy, parę wodną do poziomu punktu rosy w warunkach po sprężeniu, a także siarkowodór i siloksany. Zwykle dla niewielkich ilości biogazu stosowane jest oczyszczanie adsorpcyjne. Na platformie jezdnej są posadowione dwa połączone rozłącznie pojemniki wysokociśnieniowe (rysunek 2.13).

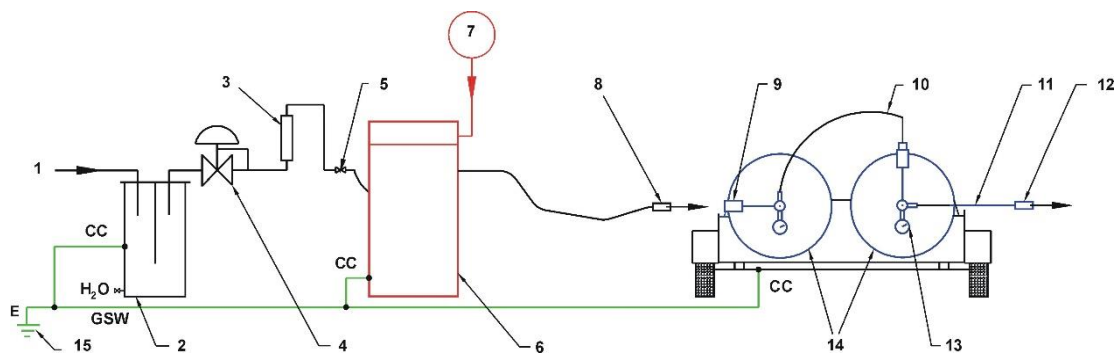


Rys. 2.13. Schemat technologiczno-funkcyjny do sprężania, transportu i dystrybucji biogazu: 1 - moduł, 2 - węzeł, 3 - pojemnik wysokociśnieniowy; 4 - zespół magazynowania i rozprężania, 5 - zawór redukcyjny [opracowanie własne]

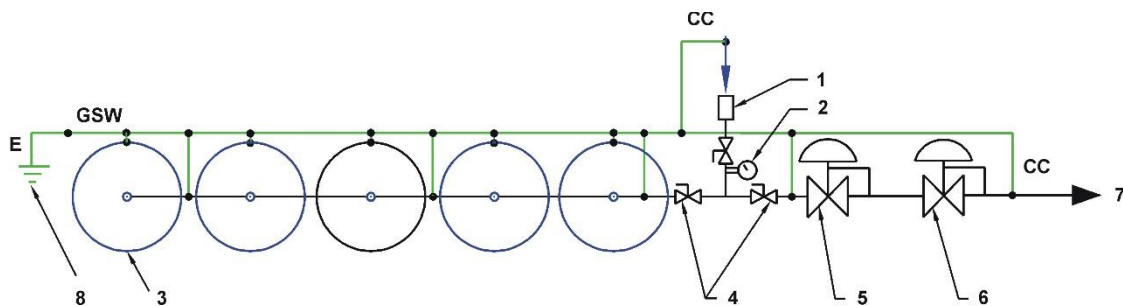
Przedmiot wynalazku został pokazany w przykładzie wykonania na rysunku, który przedstawia schematycznie układ do transportu niewielkich ilości biogazu. Surowy biogaz jest dostarczany do modułu 1 oczyszczania, w którym jest stosowany adsorber wypełniony zeolitem typu 3A. Następnie oczyszczony biogaz jest przekazywany do węzła sprężania 2, gdzie przy pomocy sprężarki tłokowej uzyskuje ciśnienie 25 MPa, a następnie za pomocą elastycznego węża jest wtłaczany do pojemnika 3 wysokociśnieniowego pojemności 140 dm^3 umieszczonego na platformie jezdnej, przy czym można zastosować dwa pojemniki 3 połączone w sposób rozłączny. Przyczepa z pojemnikami 3 wysokociśnieniowymi jest transportowana do miejsca wykorzystywania biogazu, gdzie za pomocą elastycznego węża pojemniki 3 wysokociśnieniowe są podłączane do modułu 4 magazynowania i rozprężania. Biogaz z pojemników 3 jest przetłaczany do modułu 4, skąd przez zawór redukcyjny 5 jest kierowany do wykorzystania.

Układ ten został zastosowany w Jaworzu, Zakładu Doświadczalnego Instytutu Zootechniki PIB w Grodźcu Śląskim im. prof. Mieczysława Czai.

Projekt instalacji i wykonanie prototypu wykonano w ramach programu BIOSTRATEG 1/269056/5/NCBR/2015 z dnia 11 sierpnia 2015 r. przez zespół pracowników ITP-PIB we współpracy z firmą NGV Autogas Sp. z o.o. Koncepcja wyżej wymienionego układu (rys. 2.13) składa się z następujących zespołów technologicznych: moduł do oczyszczania biogazu podawanego ze zbiornika biogazu, sprężarka, pojemniki (butle wysokociśnieniowe) do magazynowania sprężonego biogazu, umieszczone na przyczepie transportowej, stacja rozprężania i pobierania biogazu na potrzeby energetyczne produkcji zwierzęcej, zawór redukcyjny pozwalający na transport biogazu do zasilania odbiorników energetycznych. Szczegółowe schematy zespołów stacji tankujących butle i transportujących biogaz oraz instalacji rozładunku sprężonego biogazu przy budynkach inwentarskich przedstawiono na rysunku 2.14 i rysunku 2.15.



Rys. 2.14. Schemat ideowy instalacji do sprężania i transportu biogazu – układ stacji tankującej oraz układ butli transportowych do 400 m³ (zgodne z przepisami ADR): 1 – sieć biogazu (p = 1,1 bar); 2 – odwadniacz; 3 – zbiornik buforowy; 4 – reduktor 1,1 bar/ 2 kPa; 5 – zawór odcinający; 6 – sprężarka MJ05 (max moc 2,5 kW, 3. faz.); 7 – zasilanie (3L + PEN); 8 – szybkozłączka nakładana na króciec do tankowania; 9 – króciec do tankowania; 10 – wąż ciśnieniowy elastyczny; 11 – wąż ciśnieniowy elastyczny; 12 – szybkozłączka do tankowania i odbioru biogazu; 13 – manometr; 14 – butle umieszczone w konstrukcji mocującej do transportu na przyczepie; 15 – uziemienie; CC – przewody wyrównawcze; GSW – główna szyna wyrównawcza; E – przewód uziemiający [opracowanie własne]



Rys. 2.15. Schemat zespołu instalacji przy budynku inwentarskim do rozładunku biogazu:

1 – króciec do tankowania z przyczepy; 2 – manometr; 3 – butle stacjonarne o pojemności 140 litrów H₂O (140 m³ x 5 sztuk = 700 m³ gazu) umieszczone przy budynku inwentarskim; 4 – zawory odcinające (ręczne); 5 – reduktor 250 bar / 2 bar; 6 – reduktor 2 bar / 2 kPa; 7 – do odbioru biogazu; 8 – uziemienie; E – przewód uziemiający; GSW – główna szyna wyrównawcza; CC – przewody wyrównawcze [opracowanie własne]

Widok stacji tankującej i sprężania biogazu pokazano na fotografii 2.2. z krótką charakterystyką techniczną sprężarki.



Fot. 2.2. Widok instalacji gazowej na stanowisku sprężania gazu. Sprężarka gazu o max poborze mocy 2,5 kW i wydajności znamionowej 5 m³/h (w temp. 15°C i 200 barów, przy ciśnieniu gazu na wlocie 0,1 bara) [materiały własne]

Widok podłączonych butli wraz z reduktorem do zasilania odbiorników biogazu przedstawiono na fotografii 2.3.



Fot. 2.3. Widok podłączenia butli do zasilania biogazem [materiały własne]

Przyczepę transportową z załadowanymi butlami z biogazem pokazano na fotografii 2.4.



Fot. 2.4. Widok przyczepy transportowej z butlami z biometanem wraz z ich zabezpieczeniem na przyczepie [materiały własne]

Przedstawione powyżej rozwiązanie sprężania i dystrybucji biogazu ma charakter innowacyjny niemniej jednak jest łatwy do wdrożenia. System ten pozwala na zabezpieczenie gospodarstw rolnych w źródło energii pozwalające na potrzeby gospodarstwa i domowe.

Biogazownie indywidualne (mikrobiogazownie do 50 kW, z pojemnością komory fermentacyjnej do 500 m³) czy zbiorowe

Wyróżnić można dwa typy biogazowni do celów rolniczych. Biogazownie indywidualne (mikrobiogazownie) działają w poszczególnych gospodarstwach i przetwarzają gnojowicę tylko z danego gospodarstwa (oraz ewentualnie pochodzącą z kilku gospodarstw sąsiednich). Biogazownie centralne są na ogół znacznie większe oraz położone są w okolicy charakteryzującej się intensywną produkcją świń i/lub bydła, przetwarzają gnojowicę z większości gospodarstw na tym obszarze.

Biogazownie centralne posiadają możliwości wykorzystywania wielu rodzajów odpadów. System odbiorczy mikrobiogazowni jest często znacznie uproszczony, dostosowany indywidualnie do producenta.

Przetwarzanie wymieszanej gnojowicy pochodzącej z wielu gospodarstw w centralnej biogazowni umożliwia lepsze rozprowadzenie składników nawozowych na danym obszarze. Wadą tego rozwiązania jest natomiast konieczność przewożenia gnojowicy z poszczególnych gospodarstw i z powrotem. Biogazownia indywidualna nie ma wpływu na zwiększenie ruchu na drogach.

Ciepło wytworzone w indywidualnym urządzeniu do produkcji skojarzonej wykorzystywane jest zazwyczaj w danym gospodarstwie, podczas gdy ciepło pochodzące z centralnej biogazowni trafia często do małych lub średnich ciepłowni okręgowych. Nie ulega, zatem wątpliwości, że przed dokonaniem wyboru typu biogazowni w konkretnej sytuacji należy rozważyć szereg różnych czynników.

Aspekty rolnicze i weterynaryjne

Właściwości obornika i gnojowicy ulegają zmianom podczas procesu fermentacji. Następuje rozpad materii organicznej, organiczny azot przetwarzany jest w amoniak itd. Skutki tych przemian mogą być korzystne z punktu widzenia pobierania składników nawozowych przez rośliny. Uzyskany poferment może być wykorzystywany na potrzeby utrzymania zwierząt w

czystości na stanowiskach np. w oborach wolnostanowiskowych, a także wykorzystany na potrzeby produkcji kompostu oraz granulacji na potrzeby produkcji nawozowej.

Wyniki przeprowadzonych badań w zakresie oddziaływania substratu pofermentacyjnego na ściółkę, nie wpływają na jakość produkcji zwierzęcej, w tym na jakość mleka.

Zasady i przepisy dotyczące bezpieczeństwa

Z przetwarzaniem i wykorzystywaniem biogazu wiążą się dwa rodzaje potencjalnych zagrożeń. Siarkowodor (H_2S) jest gazem wysoce trującym. Obecność w biogazie nawet bardzo małych jego ilości może spowodować śmierć, jeśli biogaz trafi do płuc. Należy zatem podejmować środki ostrożności opisane ogólnie w podrozdziale 2.3.

Biogaz może wybuchnąć w przypadku zmieszania z powietrzem w pewnych proporcjach (15-20% biogazu w powietrzu). W normalnych warunkach sytuacja taka nie zachodzi, ale może do niej dojść w następujących szczególnych sytuacjach:

- podczas opróżniania komór fermentacyjnych w celu dokonania napraw,
- w przypadku przecieków ze zbiornika magazynowego biogazu.

Należy zatem podjąć odpowiednie środki ostrożności w celu minimalizacji ryzyka.

2.3. Mieszanie substratów i zasady ich komponowania

Zasady komponowania mieszanki substratów

Komponowanie mieszanki substratów powinno być dokonywane indywidualnie dla każdej instalacji biogazowni rolniczej i mikrobiogazowni. Procentowy udział poszczególnych substratów w mieszance należy dobierać uwzględniając następujące uwarunkowania: rodzaj fermentacji, rodzaj dostępnych substratów, wielkość instalacji, możliwość nadzoru nad procesem fermentacji, zapewnienie stabilności procesu fermentacji, optymalizacja kosztów produkcji biogazu.

W zdecydowanej większości biogazowni stosowana jest **fermentacja mokra**. Instalacje z fermentacją suchą zaleca się w tych gospodarstwach, które mają ograniczony dostęp do substratów rozcieńczających takich jak gnojowica, gnojówka, serwatka, wywar gorzelniany lub nie mają możliwości zagospodarowania dużej ilości płynnej masy pofermentacyjnej. W biogazowni rolniczej podstawowymi substratami powinny być odchody zwierząt, czyli obornik, gnojowica i pomiot drobiu. W gospodarstwie rolnym produkcja biogazu powinna być uzupełnieniem chowu zwierząt gospodarskich tj. bydła, trzody chlewnej i drobiu. Substratem dla biogazowni i mikrobiogazowni, obok odchodów zwierząt powinny być pozostałości z przygotowania pasz, pasze niepełnowartościowe i nieprzetworzone pozostałości produkcji roślinnej. Podstawowym substratem jest gnojowica. Jej dostępność przez cały rok, właściwości inokulujące (zaszczepiające, inicjujące fermentację dzięki zawartości bakterii fermentacji metanowej) i zawartość wszystkich niezbędnych mikroelementów to zalety dobrego substratu dla biogazowni i mikrobiogazowni. Wadą gnojowicy, zarówno bydłowej jak i świńskiej jest jej niska wydajność biogazowa. Dlatego najczęściej stosowana jest jako substrat rozcieńczający dla substratów o wyższej zawartości suchej masy i wyższej wydajności biogazu, takich jak: kiszonka z kukurydzy, kiszonka ze zbóż, trawy czy okopowych, a także pozostałości z przetwórstwa rolno-spożywczego. Często, przy starannym dobraniu mieszanki zwiększa uzysk biogazu. Dzieje się tak nie tylko w przypadku mieszanki z zawartością gnojowicy.

Badania wykazały sumarycznie większą wydajność biogazową mieszaniny substratów niż pojedynczego substratu, co ilustruje tabela 2.8, pomimo że w połowie przypadków zanotowano mniejszą wydajność, ale wówczas różnica, z jednym wyjątkiem, była minimalna.

Tabela 2.8. Porównanie wydajności biogazowej monosubstratów i ich mieszaniny [opracowanie własne na podstawie Podkówka i in. 2012]

Substrat Mieszanina	Uzysk metanu liczony jako suma wydajności monosubstratów [Nm³ · Mg⁻¹suchej masy organicznej]	Uzysk metanu [Nm³ · Mg⁻¹smo]
[A] Kiszonka z kukurydzy 100%	-	0,397
[B] Ziarno pszenicy ozimej 100%	-	0,430
[C] Kiszonka z koniczyny z trawami 100%	-	0,382
[D] Kiszonka z liści buraka pastewnego 100%	-	0,382
[E] Kiszonka z zielonki żyta GPS 100%	-	0,365
25% [A] + 75% [B]	0,428	0,442↑
50% [A] + 50% [B]	0,414	0,425↑
75% [A] + 25% [B]	0,405	0,418↑
25% [A] + 75% [C]	0,386	0,391↑
50% [A] + 50% [C]	0,390	0,387↓
75% [A] + 25% [C]	0,393	0,387↓
25% [A] + 75% [D]	0,386	0,391↑
50% [A] + 50% [D]	0,390	0,387↓
75% [A] + 25% [D]	0,393	0,387↓
25% [A] + 75% [E]	0,373	0,361↓
50% [A] + 50% [E]	0,381	0,388↑
75% [A] + 25% [E]	0,389	0,386↓

Przy doborze substratów powinniśmy kierować się przede wszystkim ich dostępnością, najlepiej przez cały rok, z gwarancją ich pozyskania i stałych kosztów w kolejnych latach. Mniej ważnym parametrem jest wydajność biogazowa substratu. Dane z około 9000 biogazowni niemieckich pokazują, że koszt substratów stanowi średnio 42% kosztów całkowitych produkcji energii elektrycznej w biogazowi. Lepiej zatem stosować substraty o niższej wydajności biogazowej, ale darmowe lub za symboliczną opłatą aniżeli bardziej wydajne, ale drogie. Niestety wszystko ma swoje granice i nieuzasadnionym byłoby budowanie instalacji na substrat, nawet darmowy, który nie gwarantowałby zwrotu kosztów w okresie przyjmowanym jako okres amortyzacji tj. 15 do 20 lat. Kolejną przeszkodą może być ograniczenie ilościowe dotyczące np. odpadów poubojowych. Jeśli są pozyskiwane bezpłatnie lub za symboliczną

opłatą, to ich zastosowanie generuje koszty związane z ich obróbką termiczną oraz dodatkową kontrolą procesu. Mikrobiogazownie i małe biogazownie powinny stosować mieszaniny o stałym składzie z dwóch, najwyżej czterech substratów.

Charakterystyka najczęściej stosowanych mieszanin substratów

W funkcjonujących krajowych biogazowniach rolniczych skład mieszanin substratów jest bardzo zróżnicowany, co pokazuje tabela 2.9.

Tabela 2.9. Wykaz substratów zastosowanych w biogazowniach w Polsce (stan na 21 marca 2021 r.) [opracowanie własne na podstawie sprawozdań KOWR]

L.p.	Rodzaj substratu	2017 r.	2018 r.	2019 r.	2020 r.	2021 r.
		Ilość [t]	Ilość [t]	Ilość [t]	Ilość [t]	Ilość [t]
1	Gnojowica	807 223,458	757 554,750	733 451,984	764 446,814	805 940,074
2	Kiszonka z kukurydzy	472 151,990	482 426,716	420 712,313	494 453,638	550 560,341
3	Wywar pogorzelniany	762 295,604	839 983,121	817 199,444	914 538,657	932 499,379
4	Pozostałości z warzyw i owoców	756 929,171	770 952,822	768 889,597	679 685,502	734 356,183
5	Wysłodki buraczane	280 208,757	291 648,405	251 506,897	210 452,985	205 963,870
6	Osady technologiczne z przem.roln.-spoż.	158 174,085	179 800,761	187 874,707	225 330,946	413 766,001
7	Obornik	82 703,208	85 422,018	84 923,377	91 681,445	91 075,784
8	Odpady z przemysłu mleczarskiego	75 977,311	107 972,444	125 601,725	131 481,521	134 911,743
9	Zielonka	96 090,469	40 715,342	33 060,336	41 416,118	32 588,010
10	Kiszonka z traw i zbóż	25 141,426	25 418,990	22 344,481	26 708,233	30 814,175
11	Treści żołądkowe	24 477,218	18 387,455	10 606,538	11 347,706	8 537,924
12	Odpady białkowe, tłuszczowe	4 400,360	3 590,090	4 119,540	3 035,680	5 625,060
13	Płynne resztki pszenne	1 368,500	1 435,842	1 203,452	1 100,569	945,627
14	Odpady poubojowe	15 379,995	66 847,115	104 438,227	83 130,548	86 498,929
15	Odpadowa masa roślinna	24 223,322	54 656,930	42 113,627	87 509,534	72 747,999
16	Słoma	11 584,860	6 849,060	4 192,822	7 752,650	9 272,034
17	Osady z przetwórstwa produktów roślinnych	1 494,080	13 046,020	16 732,150	21 062,648	43 857,103
18	Przeteterminowana żywność	35 250,440	73 609,986	98 405,814	117 180,969	146 142,113
19	Pomiot ptasi	21 083,680	22 524,870	19 741,210	27 742,031	30 652,345
20	Tłuszcze	7 116,893	11 909,360	14 601,798	25 591,842	27 302,151
21	Odpady z przetwórstwa spożywczego	32 563,751	66 355,733	120 601,725	346 580,127	402 309,019

22	Zboże, odpad zbożowy	21 316,685	13 137,147	7 345,926	19 010,825	48 011,762
23	Odpady z produkcji oleju roślinnego	1 475,639	615,920	10 129,447	11 839,471	7 261,972
24	Oleje fuzlowe	234,280	140,460	163,140	247,840	26,500
25	Pasza	7 178,196	12 879,019	8 215,525	20 054,990	12 422,341
26	Kawa	3 305,450	2 223,660	9,756	3,180	-
27	Oleje roślinne	78,299	204,330	6 131,586	3 341,679	5 003,813
28	Poferment	-	-	686,410	1 600,00	1 704,120
29	Odpady gastronomiczne	4 184,054	4 919,539	6 195,680	1 528,372	976,057
30	Owoce i warzywa	46 013,022	38 397,139	30 349,858	35 921,838	61 277,637
31	Osady tłuszczowe	11 810,940	5 171,160	4 394,778	3 618,840	4 873,538
32	Popłuczyny	1 043,680	150,360	418,610	1 214,550	1 503,120
33	Osady drożdżowe	3 898,780	865,410	-	-	101,320
34	Gliceryna	484,009	356,670	348,420	414,590	534,945
35	Mieszanina lecytyny i mydeł	-	40,040	1 485,370	181,160	328,670
36	Szlamy białkowe, tłuszczowe	-	-	43,780	802,760	2 062,910
37	Wytłoki poekstrakcyjne z produkcji farmaceutyków ziołowych	68,140	39,920	35,160	-	
Ogółem		3 796 929,752	4 000 248,604	3 957 804,275	4 412 010,258	4 912 454,569

Jak wynika z analizy tabeli 2.9. najwyższy udział wśród surowców dla biogazowni rolniczych mają gnojowica, kiszonka z kukurydzy, wywar pogorzelniany oraz pozostałości warzyw i owoców. W prezentowanym okresie można zaobserwować tendencję do malejącego udziału m.in. kiszonki z traw i zbóż, treści żołądkowych i zbóż wśród surowców użytkowanych do produkcji biogazu rolniczego.

2.4. Dostępne technologie biogazowe

Aktualnie wyróżnia następujące instalacje biogazowe:

- biogazownie rolnicze w których sterowany jest proces fermentacji metanowej substratów pochodzenia rolniczego np.: nawozy naturalne, rośliny „energetyczne” w tym zboża, okopowe, kiszonki z kukurydzy, traw i tp.
- w obszarze biogazowni rolniczych znany jest system produkcji biogazu „NaWaRo” (**Nachwachsende Rohstoffe**) stosowany głównie w Niemczech, wykorzystujący głównie kiszonki z roślin (kukurydzy, traw, buraków i odpadów produkcji i przetwórstwa spożywczego).

Technologia Dynamik Biogaz - polega na dostosowaniu procesu fermentacji metanowej do substratów zwierzęcych, różnej słomy, pozostałości upraw polowych, pozostałości przetwórstwa rolno-spożywczego. Stopień odfermentowania 99%, zawartość metanu powyżej 65%.

BTA – w tej metodzie z nieprzesortowanych odpadów komunalnych ługuje się w podwyższonej temperaturze substancje organiczne a frakcję poddaje fermentacji.

Dranco – inaczej fermentacja sucha, polegająca na fermentacji w reaktorach w temperaturze 55°C odpadów stałych po eksploatacji metodą BTA.

Rottwei – korzysta z odpadów gastronomicznych, kuchennych i ogrodniczych.

SWEGO – w tej technologii fermentację przeprowadza się w przyzmacz energetycznych ze szczelnym dnem i ścianami bocznymi. Nad rozdrobnionymi osadami umieszcza się instalację rurociągów ssących a całość przykrywa się warstwą gliny.

WABIO – w technologii tej śmieci po wstępnym oddzieleniu odpadów wielkogabarytowych są mielone i mieszane z gorącą wodą. Osad nieaktywny biologicznie jest oddzielany a zawiesina poddawana fermentacji w bioreaktorze. Po 18-23 dniach jest usuwany po higienizacji i przetrzymywany przez 30 min. w temperaturze 70°C.

Technologia Schmidta – Eggerglussa – fermentacji poddaje się zawiesinę obornika, siewki i rozdrobnionych odpadów organicznych w wodzie. Wydajność ze 100 kg suchej masy obornika wynosi 27,2 m³ biogazu. Z m³ komory fermentacyjnej można uzyskać 0,75 m³ biogazu na dobę. Metoda ta jest opłacalna dla dużych gospodarstw o dziennej produkcji od 100 do 300 m³.

Technologia Decuelliera – Ismana – w tej metodzie surowcem jest obornik gromadzony przez 14–50 dni w beztlenowych zbiornikach. Komory fermentacyjne są ogrzewane krążącą w wymienniku ciekłą frakcją fermentacyjną i pochodzącą bezpośrednio z obory gnojowicą. W technologii ze obornika uzyskuje się 2 m³ biogazu a wykorzystanie komory wynosi 1 m³ biogazu dziennie z 1 m³ komory.

Technologie Reinholda – Darmstadta – metoda ta została stworzona na potrzeby małych i średnich gospodarstw. W skład instalacji wchodzi betonowa komora fermentacyjna o wymiarach 7x2x2 zagłębiona w gruncie. Dzienna produkcja biogazu

dochodzi do 10 m³ przy obciążeniu komory 0,3-0,5 m³ biogazu dziennie z 1 m³ objętości komory. Fermentacja trwa kilka tygodni, po których kompost jest wywożony na pole, a komory napełniane są gromadzoną w tym czasie gnojowicą.

Technologia Strella – Liebermana – Gotza – w metodzie tej obornik jest poddany w dwuczęściowej komorze fermentacyjnej wstępnej fermentacji tlenowej, w trakcie której się ogrzewa, a następnie po spuszczeniu do drugiej części komory rozpoczyna się fermentacja właściwa – beztlenowa.

Technologia Poetscha – w tej metodzie również stosuje się komory dwuczęściowe, w części górnej gromadzi się rozcieńczony obornik, który stanowi zamknięcie hydrauliczne biogazu wytworzonego w komorze dolnej. W metodzie tej nie jest potrzebny zbiornik biogazu.

Rodzaje instalacji obornikowych stworzonych w gospodarstwach rolnych – mikrobiogazownie:

- instalacje jednorodne wykorzystujące jedynie gnojowicę lub obornik,
- instalacje jednorodne wykorzystujące jako wsad masę organiczną pochodzącą z upraw roślin ekologicznych,
- instalacje mieszane, bazujące na wsadzie zróżnicowanym gnojowica-obornik-biomasa.

2.5. Sposoby magazynowania, przygotowania i podawania do komory fermentacyjnej substratów i mieszaniny substratów

Biogazownie, w których stosuje się fermentację mokrą, pracują w systemie ciągłym i dlatego muszą mieć zapewnioną dostawę substratu, najlepiej jednakowego pod względem składu i jakości, przez cały rok. Wymagania te spełniają takie substraty jak gnojowica, obornik czy pomiot ptaków, ale również kiszonki z roślin energetycznych zarówno z całych jak i z ziarna, bulw lub korzeni. Także ziarna zbóż, magazynowane np. w silosach zbożowych są dostępne przez cały rok.

Sposób magazynowania substratu zależy od rodzaju oraz możliwości dostarczenia do biogazowni. Najkorzystniejsza sytuacja jest wówczas, gdy substraty znajdują się w gospodarstwie i tam są w naturalny sposób magazynowane. W przypadku gnojowicy najlepiej, gdy jest ona pobierana bezpośrednio ze zbiornika, znajdującego się w lub przy budynku inwentarskim, przepompowywana rurociągiem bezpośrednio do zbiornika wstępnego biogazowni. Silosy z kiszonką również powinny być usytuowane w pobliżu biogazowni.

Jest to ważne ze względu na to, że transport substratów i obawa przed zapewnieniem odpowiednich warunków transportu jest najczęściej przyczyną protestów okolicznych mieszkańców.

Lokalizacja, budowa i eksploatacja magazynów na substraty musi spełniać wszystkie obowiązujące przepisy oraz wymagania krajowe i unijne.

W biogazowniach rolniczych podstawowymi substratami są gnojowica, obornik i gnojówka. Zgodnie z art. 25 ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz. U. 2007 nr 147 poz. 1033 z późn. zm.) gnojowicę i gnojówkę przechowuje się wyłącznie w szczelnych zamkniętych zbiornikach. Podmioty, które prowadzą chów lub hodowlę drobiu powyżej 40 000 stanowisk lub chów lub hodowlę świń powyżej 2 000 stanowisk dla świń o masie ponad 30 kg lub 750 stanowisk dla macior, przechowują nawozy naturalne inne niż gnojowica i gnojówka, na nieprzepuszczalnych płytach, zabezpieczonych w taki sposób,

aby wycieki nie przedostawały się do gruntu. Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej z dnia 7 października 1997 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle rolnicze i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 132 poz. 877 z późn. zm.) zamknięte zbiorniki na płynne odchody zwierzęce powinny mieć: 1) dno i ściany nieprzepuszczalne, 2) szczelne przykrycie z wyłączeniem zbiorników na płynne odchody zwierzęce lub ich części znajdujących się pod budynkiem inwentarskim, stanowiących technologiczne wyposażenie budynku inwentarskiego, 3) wylot wentylacyjny i zamykany otwór wejściowy. W rozporządzeniu tym zawarte są również wymagania dotyczące konstrukcji silosów na kiszonki oraz silosów na pasze sypkie i ziarno zbóż o pojemności do 100 Mg oraz powyżej 100 Mg a także podane są minimalne odległości zbiorników na gnojowicę i silosów od budynków i budowli, a także od granicy działki (tabela 2.10).

Zgodnie z powyższym rozporządzeniem (§12) budowle rolnicze uciążliwe dla otoczenia, w szczególności z uwagi na zapylenie, zapachy lub wydzielanie się substancji toksycznych, powinny być oddzielone od przyległych terenów pasem zieleni złożonym z roślinności średnio- i wysokopiennej.

Tabela 2.10. Minimalne odległości magazynów substratów od pozostałych budynków, budowli i granicy działki [opracowanie własne na podstawie: Dz. U. Nr 132 poz. 877 z późn. zm.]

Minimalne odległości od [m]	Zamknięte zbiorniki na płynne odchody zwierzęce mierzone od pokryw i wylotów wentylacyjnych	Płyty do składowania obornika	Silosy na zboża i pasze o pojemności większej niż 100 Mg	Silosy na zboża i pasze o pojemności do 100 Mg	Silosy na kiszonkę
Pomieszczeń przeznaczonych na pobyt ludzi na działkach sąsiednich - od otworów okiennych i drzwiowych w tych pomieszczeniach	10 15	25 30	8 -	10 15	25 30
Obiektów budowlanych służących przetwórstwu artykułów rolno – spożywczych	15	50	-	-	50
Magazynów środków spożywczych	15	-	-	-	-
Granicy działki sąsiedniej	4	4	4	4	5

Budynków magazynowych pasz i ziarna	5	10	-	-	8
Silosów na zboża i pasze	5	55	-	-	-
Silosów na kiszonki	5	10	-	-	-
Instalacji służących do otrzymywania biogazu rolniczego	-	-	15	15	15
Składu węgla i koksu	-	-	15	15	15
Budynków z wyłączeniem budynków inwentarskich i gospodarczych	-	-	8	-	-
Budynków inwentarskich	-	-	-	10	-
Budynków z wyłączeniem budynków inwentarskich i pomieszczeń przeznaczonych na pobyt ludzi	-	-	-	8	-

Jeżeli biogazownia zlokalizowana jest w pobliżu budynku inwentarskiego, to istniejące zbiorniki i silosy służą jako magazyny substratów. Tak zmagazynowane substraty mogą być podawane bezpośrednio do komory fermentacyjnej lub do zbiornika wstępnego. Substraty o zawartości suchej masy nie większej niż 15% zadawane są do komory fermentacyjnej za pomocą pomp. Substraty o wyższej zawartości suchej masy podawane są za pomocą przenośników ślimakowych. W przypadku zastosowania odchodów drobiu należy usuwać piasek z dna zbiornika za pomocą np. wybieraka hydraulicznego. Zbiornik wstępnego magazynowania jest niezbędny w przypadku uzupełniania wsadu substratami spoza gospodarstwa jak np. serwatka, wysłodki buraczane, czy wyciąki owocowe. Powinien mieć odpowiednią pojemność wynikającą z częstotliwości i wielkości dostaw. Ważnym czynnikiem wpływającym na koszty produkcji biogazu jest transport substratów. Przy odległości większej niż 4 km między polem a biogazownią na koszty transportu przypada więcej niż 40% całkowitych kosztów zbioru kukurydzy na kiszonkę. Również ocenia się, że maksymalna odległość transportu obornika i gnojowicy to 25 km. Szczególnego traktowania wymagają substraty pochodzenia zwierzęcego, będące produktami ubocznymi przemysłu rolno-spożywczego, gdyż bardzo szybko ulegają procesowi gnilnemu. Należy pobierać tylko taką ich ilość, która zostanie wykorzystana do przygotowania wsadu w danym dniu. Przy wykorzystaniu odpadów przemysłu mięsnego obowiązują specjalne przepisy, które zostały omówione w rozdziale 5.

3. KOGENERACJA

3.1. Informacje ogólne

Kogeneracja polega na wytwarzaniu ciepła i energii elektrycznej w ramach wykorzystania pozyskanego biogazu np. rolniczego skojarzonego z procesem fermentacji metanowej w biogazowni i mikrobiogazowni rolniczej. Dzięki kogeneracji (przetworzeniu) biogazu mamy odpowiednie rozwiązanie technologiczne: silnik, układ silnikowo-prądowy, układ parowo-turbinowy, we współpracy z układem produkcji chłodu (trigeneracja). Moce elektryczne sięgają od kilku kW do 50 MW. W wyniku współpracy i właściwego doboru agregatu kogeneracyjnego do wydajności instalacji biogazowej można pozyskać energię elektryczną i ciepłą na potrzeby lokalne w tym na potrzeby gospodarstwa rolnego i ewentualnie wykorzystanie na potrzeby szerokiego grona odbiorców do produkcji i przetworów rolnych.

Zastosowany system kogeneracji wpływa na ograniczenie gazów szklarniowych i zabezpiecza potrzeby energetyczne ciepła i energii elektrycznej w gospodarstwie.

3.2. Możliwości wykorzystania ciepła pochodzącego z kogeneracji

W zakresie określenia produkcji energii cieplnej i energii elektrycznej pozyskiwanych w agregatach kogeneracyjnych możemy uzgodnić następujące parametry:

- Wartość kogeneracyjna metanu w biogazie - $9,17 \text{ kWh/m}^3$
- Sprawność agregatu: ciepła 40-43%, elektryczna 30-40% w zależności od rozwiązania technologicznego,
- Czas pracy agregatu w ciągu roku 7500-8300 h/rok, oznacza to dyspozycyjność urządzenia na poziomie 85-95%, średnio można przyjąć 8000 h pracy ciągłej w roku.
- Ilość wyprodukowanego ciepła brutto i netto określone poprzez całkowite ciepło brutto pomniejszone na zużycie na potrzeby własne ciepła technologicznego. Na potrzeby techniczne (własne) zakłada się 25-40% całkowitej produkcji ciepła. Należy uwzględnić w bilansie energetycznym zwłaszcza ciepło sezonowe wahania pracy instalacji biogazowej.
- Ilość energii elektrycznej brutto i netto: całkowita produkcja energii elektrycznej pomniejszona jest o zużycie na potrzeby własne. Innymi słowy na potrzeby technologiczne takie jak: mieszadła, pompy, układ sterowania, oświetlenie etc., które zużywa średnio ok. 9% wyprodukowanej energii. Należy zwrócić jednak uwagę na to, że ze względu na mechanizmy wsparcia dla zielonej energii elektrycznej zazwyczaj całą wyprodukowaną energię przekazuje się do sieci elektro-energetycznej, a na potrzeby procesowe kupuje się energię elektryczną po niższej cenie.

Sposób obliczeń pozwalają na dobór mocy agregatów kogeneracyjnych oraz na oszacowanie produkcji energii elektrycznej i ciepła w celu ich sprzedaży przedstawia tabela 3.1.

Tabela 3.1. Sposób obliczania produkcji energii w instalacjach biogazowych, w tym mikrobiogazowniach [opracowanie własne]

Lp.	Wyszczególnienie parametrów	Jednostka	Sposób obliczania
1	Roczna produkcja metanu	m ³ /rok	Ilość substratu [t/rok] x procentowa zawartość suchej masy w 1 t substratu [%] x procentowa zawartość suchej masy organicznej w suchej masie organicznej [%] x potencjał produkcji metanu [m ³ /t s.m.o.]
2	Roczna produkcja energii	MWh/rok	Roczna produkcja metanu x wartość kaloryczna metanu (9,17 kWh/rok = 33 MJ/m ³ O/1000)
3	Teoretyczna moc cieplna	kW	Produkcja metanu na godzinę x wartość kaloryczna metanu (9,17 kW/m ³) x sprawność cieplna w kogeneracji (42% ³)
4	Produkcja ciepła brutto	GJ/rok	Teoretyczna moc ciepła x czas pracy (8000 h) (założono 91% dostępność czasu pracy urządzeń w ciągu roku) x 3,6 (przeliczenie jednostek)
5	Zużycie ciepła na cele procesowe	GJ/rok	Produkcja ciepła brutto x 0,3 ⁴
6	Produkcja ciepła netto ⁵	GJ/rok	Produkcja ciepła brutto – zużycie ciepła na cele procesowe
7	Produkcja energii elektrycznej brutto	MWh _e /rok	Teoretyczna moc elektryczna x czas pracy (8000 h)
8	Zużycie energii elektrycznej na cele procesowe	MWh _e /rok	Produkcja energii elektrycznej brutto X 0,09 ⁶
9	Produkcja energii elektrycznej netto ⁷	MWh _e /rok	Produkcja energii elektrycznej brutto – zużycie energii elektrycznej na cele procesowe

Wyjaśnienia:

³ – wartość sugerowana do wstępnych obliczeń,

⁴ – w praktyce 25-40% wyprodukowanej energii cieplnej jest na cele procesowe (w zależności od regionu i strefy klimatycznej), użyty w tabeli współczynnik 0,3 do przykładowych obliczeń stosuje się do biogazowni energetycznie bardziej efektywnych,

⁵ – pozostała część ciepła dostępna jako nadwyżka do wykorzystania,

⁶ – Średnio 9% wyprodukowanej energii elektrycznej jest wykorzystane na cele procesowe,

⁷ – Pozostała część energii elektrycznej dostępna jako nadwyżka i zazwyczaj sprzedawana do sieci elektroenergetycznej.

Uzdatnianie biogazu do kogeneracji

W instalacji odnawialnego źródła energii, w której są spalane: biomasa, biopłyny, biogaz lub biogaz rolniczy wspólnie z innymi paliwami, energię wytworzoną z odnawialnych

źródeł energii stanowią energia elektryczna lub ciepło w ilości odpowiadającej udziałowi energii chemicznej biomasy, bioptynów, biogazu lub biogazu rolniczego w energii chemicznej paliwa zużywanego do wytwarzania energii, obliczonej na podstawie rzeczywistych wartości opałowych tych paliw, według wzoru (3.1) zawartego w Rozporządzeniu Ministra Energii z dnia 7 sierpnia 2018 r. w sprawie wymagań dotyczących sposobu obliczania, pomiarów i rejestracji ilości energii elektrycznej lub ciepła wytwarzanych w instalacjach odnawialnego źródła energii [Dz.U. 2018 poz. 1596]:

$$E_{OZE} = \frac{\sum_{i=1}^n M_{Bi} W_{Bi}}{\sum_{i=1}^n M_{Bi} W_{Bi} + \sum_{j=1}^m M_{Kj} W_{Kj}} * E, \quad (3.1)$$

gdzie:

E_{OZE} – ilość energii elektrycznej lub ciepła wytworzonych z odnawialnych źródeł energii w [MWh lub GJ],

E – ilość energii elektrycznej wytworzonej w instalacji odnawialnego źródła energii, w której są spalane biomasa, bioptyny, biogaz lub biogaz rolniczy wspólnie z innymi paliwami, lub ilość ciepła wytworzonego w instalacji odnawialnego źródła energii, w której są spalane biomasa, bioptyny, biogaz lub biogaz rolniczy wspólnie z innymi paliwami, w [MWh lub GJ],

M_{Bi} – masa biomasy, bioptynów, biogazu lub biogazu rolniczego spalonych w instalacji odnawialnego źródła energii w [Mg],

M_{Kj} – masa paliwa innego niż biomasa, bioptyny, biogaz lub biogaz rolniczy spalonego w instalacji odnawialnego źródła energii w [Mg],

W_{Bi} – wartość opałowa biomasy, bioptynów, biogazu lub biogazu rolniczego spalonych w instalacji odnawialnego źródła energii w [MJ/Mg],

W_{Kj} – wartość opałową paliwa innego niż biomasa, bioptyny, biogaz lub biogaz rolniczy spalonego w instalacji odnawialnego źródła energii w [MJ/Mg],

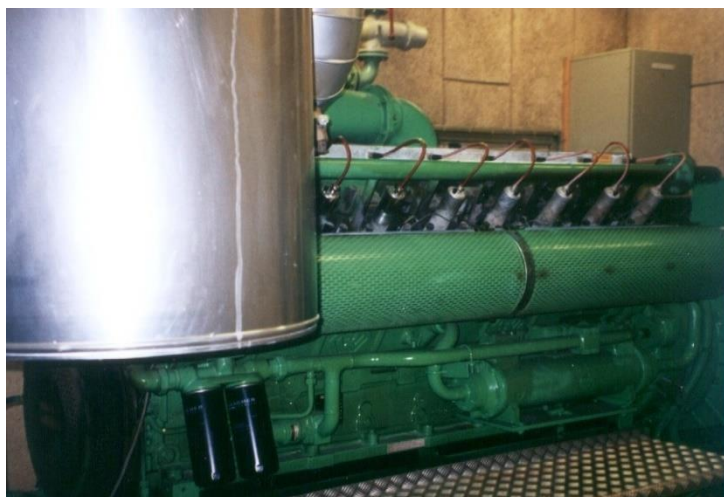
n – liczbę rodzajów biomasy, bioptynów, biogazu lub biogazu rolniczego spalonych w instalacji odnawialnego źródła energii,

m – liczbę rodzajów paliw innych niż biomasa, bioptyny, biogaz lub biogaz rolniczy spalonych w instalacji odnawialnego źródła energii.

W przypadku, kiedy do agregatu CHP dostarczony będzie tylko biogaz, odpowiednio wcześniej oczyszczony, wtedy wskaźniki dotyczące pozostałych nośników energii będą pominięte.

Trwałość agregatów kogeneracyjnych (fot. 3.1.), stanowiących znaczny koszt inwestycyjny, w istotny sposób jest uzależniona od stopnia oczyszczenia biogazu z niekorzystnych domieszek gazowych, takich jak dwutlenek węgla, azot, siarkowodór, które stanowią od dwudziestu kilku do ponad czterdziestu procent objętości, dlatego istotną kwestią pozostaje rozwój technik jego oczyszczania.

Tradycyjne technologie odsiarczania biogazu obejmują odsiarczanie na mokro, odsiarczanie na sucho i odsiarczanie biologiczne.



Fot. 3.1. Przykładowy agregat kogeneracyjny [archiwum ITP-PIB]

Wymienione technologie oczyszczania biogazu są metodami podstawowymi, natomiast w praktyce istnieją rozmaite systemy pokrewne zamieszczone w tabeli 3.2.

Tabela 3.2. Porównanie różnych metod oczyszczania biogazu przy założeniu stężenia początkowego siarkowodoru do 1000 ppm [Żarczyński i in. 2015]

Lp.	Numer metody oczyszczania biogazu (zasadniczy sorbent lub reagent)	Zakres wydajności odsiarczania biogazu, %	Koszty inwestycyjne w skali: niskie, średnie, wysokie	Koszty eksploatacyjne w skali: niskie, średnie, wysokie	Preferencje inwestorów (metoda powszechna, spotykana lub rzadka) ze wskazaniem kryterium wyboru: techniczne, ekonomiczne lub łączone
1.	Ruda darniowa naturalna, tlenki żelaza	zwykle do 90	Średnie	Średnie	metoda powszechna - kryterium łączone
2.	Odpadowe osady boksytowe	do 95	średnie	niskie	metoda rzadka - kryterium łączone
3.	Węgiel aktywny modyfikowany	do 95	wysokie	średnie	metoda spotykana - kryterium techniczne
4.	Sita molekularne lub SiO ₂	do 99	średnie	niskie	metoda rzadka - kryterium techniczne
5.	Sorbent haloizytowy	zwykle do 99,8	średnie	niskie	metoda rzadka - kryterium łączone
6.	Roztwory mocnych zasad jak KOH lub NaOH	nie mniej niż 94	średnie	wysokie	metoda spotykana - kryterium techniczne
7.	Roztwory utleniaczy	powyżej 95	średnie	wysokie	metoda rzadka - kryterium łączone

8.	Roztwory prostych soli żelaza, np. FeCl ₃	od 97 do 100	niskie	średnie	metoda spotykana - kryterium techniczne
9.	Roztwory chelatów żelaza	od 95 do 100	średnie	średnie	metoda spotykana - kryterium techniczne
10.	Komory fermentacyjne	zwykle do 80-99	średnie	niskie	metoda spotykana - kryterium łączone
11.	Biofiltry różnych typów, w tym metoda firmy CES	zwykle do 95, niekiedy do 99	średnie	niskie	metoda spotykana – kryterium techniczne
12.	Bioskrubery	zwykle od 70m do 98	średnie	średnie	metoda spotykana - kryterium techniczne
13.	Fotoreaktory	80-100	wysokie	średnie	metoda rzadka – kryterium techniczne
14.	Mieszanka wodno-popiołowa	do 70	średnie	niskie	metoda rzadka - kryterium łączone
15.	Metoda płuczki wodnej	> 96	Wysokie	średnie	metoda powszechna - kryterium techniczne
16.	Genosorb i inne rozpuszczalniki	> 96	Wysokie	wysokie	metoda spotykana - kryterium techniczne
17.	Inne technologie, np. usuwanie CO ₂ metodą adsorpcji zmiennociśnieniowej	> 95	Wysokie	wysokie	metoda spotykana - stosowana po uprzednim odsiarczeniu biogazu - kryterium techniczne

Metoda utleniania na mokro

Mokre odsiarczanie polega na absorpcji i utlenianiu H₂S zawartego w biogazie przez obojętny lub słaby roztwór zasadowy zawierający utleniacz, dzięki czemu można go zredukować do siarki elementarnej, a katalizator można zregenerować za pomocą powietrza. Z powodu różnej absorpcji i katalizatora istnieje wiele różnych metod odsiarczania, takich jak proces oparty na związkach arsenu, proces oparty na wanadzie, proces oparty na żelazie, etc. Zasadą procesu opartego na żelazie jest to, że siarkowodor jest wspierany przez nośnik tlenu w roztworze alkalicznym, a tlenek żelaza jest katalizowany w celu utleniania siarki. Katalizator zredukowany przez siarkowodor można regenerować powietrzem, a Fe²⁺ utlenia się do Fe³⁺.

Odsiarczanie suche

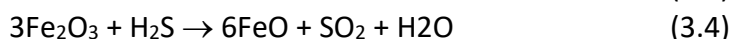
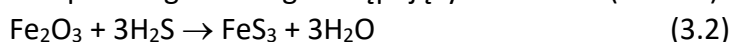
Suche odsiarczanie polega na usuwaniu siarkowodoru za pomocą środka odsiarczającego w postaci proszku lub cząstek. Reakcja jest przeprowadzana w stanie całkowicie suchym, więc nie będzie korozji, tworzenia się kamienia i osadów. Powszechnie stosowane metody to separacja membranowa, metoda adsorpcji w złożu stałym i proces utleniania Clausa.

Separacja membranowa

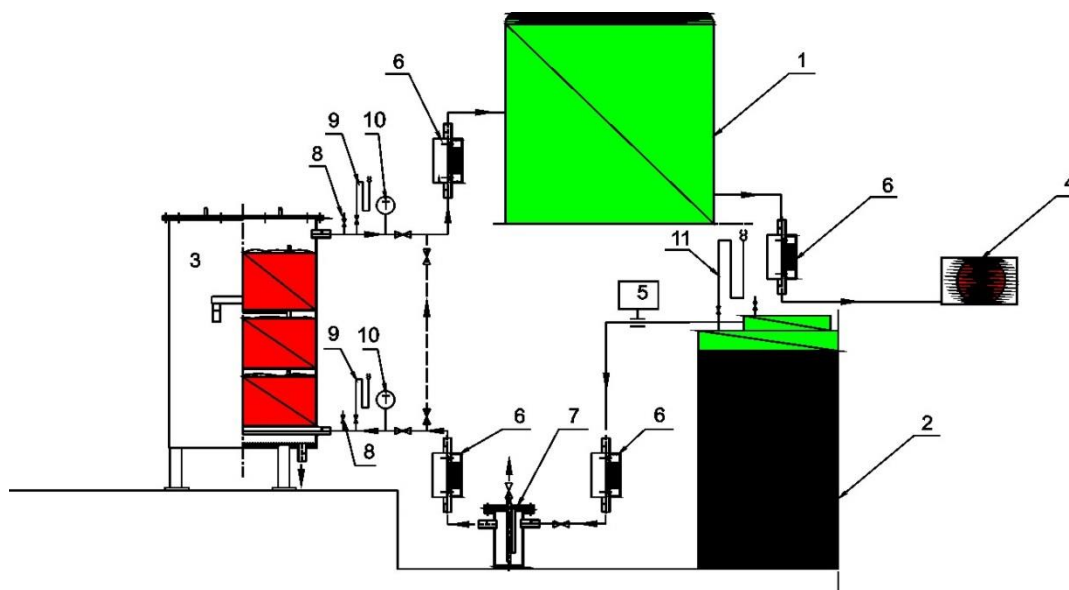
Separacja membranowa to nowa technika separacji, która łączy rozdzielanie gazu na bazie membrany z tradycyjną adsorpcją fizyczną, absorpcją chemiczną i obróbką kriogeniczną. w porównaniu z tradycyjną technologią absorpcji, separacja membranowa posiada zaletę w postaci dużej powierzchni kontaktu gazu z cieczą, dużą wydajność pracy. Warunkiem skuteczności tej metody jest różnica ciśnień między gazem a cieczą wynosząca 50-500 kPa. Wyniki pokazują, że stopień odsiarczania pojedynczego modułu membranowego wynosi do 97%, gdy zawartość H₂S wynosi 296 mg · m⁻³.

Metoda adsorpcji ze stałym złożem

W wielu metodach adsorpcji w złożu stałym metoda odsiarczania za pomocą tlenku żelaza jest klasyczną i skuteczną metodą odsiarczania, która jest nadal szeroko stosowana w oczyszczaniu biogazu ze względu na prosty proces, łatwą obsługę i niskie zużycie energii. Zasada odsiarczania przebiega według następujących wzorów (3.2-3.5):

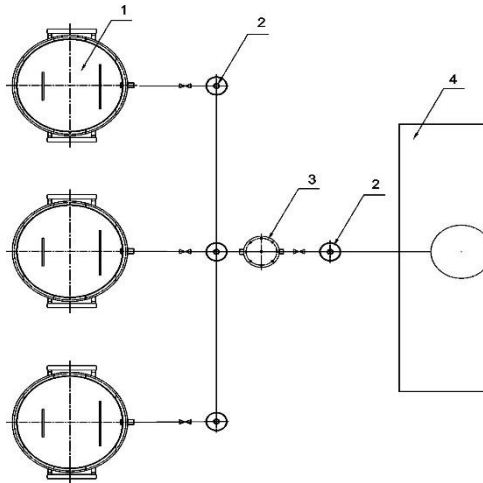


Na rysunku 3.1. przedstawiono schemat zrealizowanego w ITP-PIB urządzenia do odsiarczania biogazu z elementami podłączenia do instalacji mikrobiogazowni.



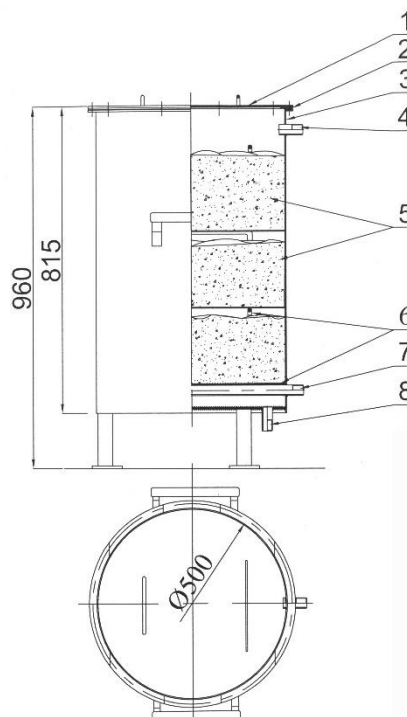
Rys.3.1. Schemat podłączenia instalacji do odsiarczania biogazu do Mikrobiogazowni, zbiornik biogazu, 2 – komora fermentacyjna, 3 – odsiarczalnik, 4 – agregat kogeneracyjny, 5 – licznik gazu, 6 – przerywacz płomienia, 7 – odwadniacz, 8 – próbnik gazu, 9 – manometr, 10 – termometr, 11 – zawór bezpieczeństwa [opracowanie własne]

Do oczyszczania gazu zastosowano trzy odsiarczalniki pracujące szeregowo oraz odwadniacze – rys. 3.2.



Rys. 3.2. Schemat podłączenia trzech odsiarczalników do instalacji mikrobiogazowni: 1 – odsiarczalnik, 2 – odwadniacz, 3 – przerywacz płomienia, 4 – biogazownia [opracowanie własne]

Proces odsiarczania będzie polegał na przepuszczaniu gazu przez masę odsiarczającą, umieszczoną na półkach odsiarczalników – rys. 3.3. Głównym składnikiem masy odsiarczającej jest ruda darniowa. Licznik gazu umożliwia kontrolę produkcji gazu. Gaz jest zmagazynowany w zbiorniku dzwonowym.



Rys. 3.3. Odsiarczalnik przystosowany do oczyszczania z H_2S w instalacji mikrobiogazowni: 1 – pokrywa, 2 – uszczelka, 3 – zbiornik odsiarczalnika, 4 – króciec – wejście gazu, 5 – złożo rudy darniowej, 6 – wspornik z płytą

perforowaną, 7 – króciec – wyjście gazu, 8 – króciec spustu kondensatu
[opracowanie własne]

Ciśnienie gazu wymagane do prawidłowej pracy przyborów wynosi 150-200 mm H₂O. Gaz ze zbiornika skierowany jest do kotła wodnego, którego praca jest zautomatyzowana. Kocioł jest przystosowany do wykorzystywania dwóch źródeł energii: elektrycznej, włączanej przy rozruchu i w wypadku awarii biogazowni, oraz biogazu.

Ciepła woda do podgrzewania masy fermentacyjnej doprowadzana jest z agregatu prądotwórczego rurami do nagrzewnicy komory. Ma ona za zadanie doprowadzić temperaturę gnojowicy do ok. 36°C i utrzymać w czasie procesu fermentacji. Stałą temperaturę gnojowicy w komorze zapewnia regulator temperatury (termostat). Pozostała część gazu będzie zużyta w przyborach gazowych gospodarstwa. Podstawowymi zespołami biogazowni są: komora fermentacyjna, zbiornik biogazu, instalacja zasilająca komorę fermentacyjną oraz instalacja grzewcza łącznie z odsiarczalnikiem. Świeża gnojowica podawana jest do komory fermentacyjnej w dwóch porcjach po ok. 2,5 m³ (4% pojemności komory fermentacyjnej). Pierwsza porcja podawana jest o godzinie 7.00, druga o godzinie 15.00. Podawana gnojowica ma temperaturę ok. 20°C.

W komorze fermentacyjnej temperatura wynosi ok. 36°C. Po dodaniu jednej porcji w ilości 2,5 m³ i ujednorodnieniu za pomocą pompy mieszającej, temperatura w komorze obniża się zwykle o 0,5°C. W takich warunkach pracy instalacja, nawet w niekorzystnych temperaturach otoczenia, wytwarza w ciągu doby netto 70 m³ biogazu.

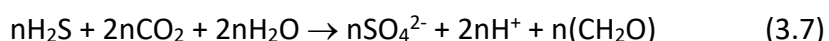
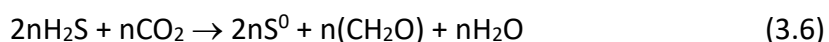
Oczyszczanie biogazu stosując proces utleniania Clausa

W pierwszym etapie procesu H₂S jest częściowo utleniany do SO₂ za pomocą powietrza. Następnie mieszanina H₂S / SO₂ jest poddawana reakcji na katalizatorze boksytu w celu uzyskania siarki elementarnej (S⁰) i wody. w procesie oczyszczania metodą Clausa wychwytywanie siarki wynosiło 94-96%. Proces Clausa jest jednym z najpopularniejszych procesów stosowanych do usuwania siarkowodoru z odzyskiem siarki na skalę przemysłową.

Biologiczna technologia odsiarczania - oczyszczanie fotoautotroficzne

W porównaniu z metodami fizycznymi i chemicznymi, proces odsiarczania biologicznego ma wiele zalet: wysoka wydajność usuwania zanieczyszczeń gazowych, brak katalizatora chemicznego, niskie zużycie energii.

W obecności światła, CO₂ i nieorganicznych składników odżywczych, bakterie odsiarczające autotroficzne (Bakterie siarkowe *Thiobacillus*, *Thiothrix*) mogą wykorzystywać CO₂ do syntezy nowych substancji komórkowych, podczas gdy H₂S utlenia się do elementarnej siarki lub siarczanu. Proces reakcji jest następujący (3.6-3.7):



W procesie utlenienia H_2S do siarki elementarnej ważna jest również intensywność światła. Dzieje się to za pomocą barwnika zawartego w komórkach - bakteriochlorofilu, który wychwytuje światło o długości fali poniżej 400 nm i powyżej 700 nm.

Barierą rozwoju biologicznej technologii odsiarczania jest konieczność stałej kontroli biochemicznej.

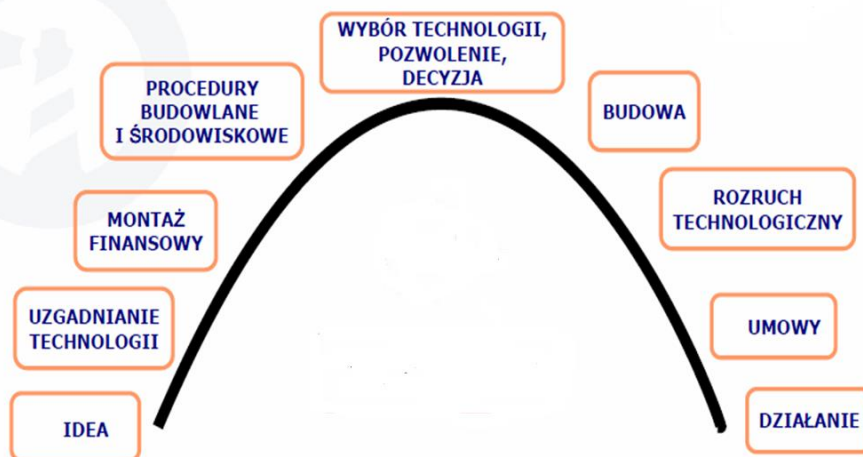
Obecnie tradycyjne technologie odsiarczania, w tym odsiarczanie na sucho i odsiarczanie na mokro, są częściej stosowane, ale istnieją pewne problemy, takie jak wysokie koszty odsiarczania, czy konieczność kontrolowania procesu. Wraz z coraz bardziej rygorystycznymi przepisami i regulacjami dotyczącymi ochrony środowiska, rozwój wydajnej technologii niskonakładowej, recyklingowej i bez dwóch zanieczyszczeń stał się głównym nurtem rozwoju technologii odsiarczania. Jako nowa technologia – odsiarczanie biologiczne może stanowić metodę przyszłościową ze względu na zalety niskiego zużycia energii i równoczesne usuwanie dwóch zanieczyszczeń: CO_2 i H_2S .

4. REALIZACJA BUDOWY MIKROBIOGAZOWNI

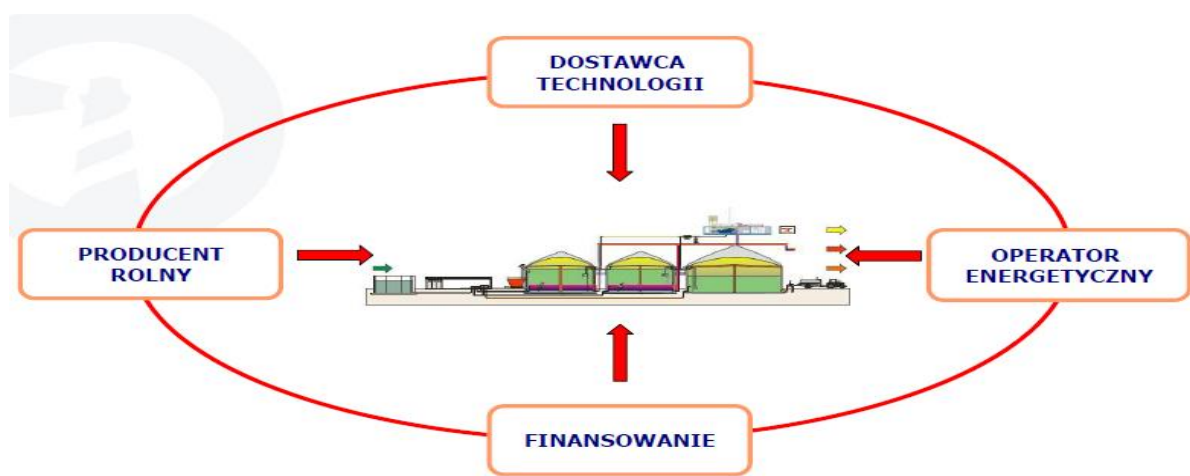
4.1. Opis etapów realizacji budowy od koncepcji do realizacji

Decyzja o budowie mikrobiogazowni

Realizacja inwestycji budowy mikrobiogazowni wymaga działań wynikających z potrzeb obowiązujących przepisów, które zostaną przedstawione na rys. 4.1-4.2.



Rys. 4.1. Etapy realizacji projektu [DGA Energia]



Rys. 4.2. Model realizacji biogazowni i mikrobiogazowni [DGA Energia]

4.2. Uwarunkowania prawne dotyczące budowy mikrobiogazowni

Mikroinstalacja według Ustawy z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (tekst uaktualniony Dz.U. 2022 poz. 1378, 1383) jest to instalacja odnawialnego źródła energii o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej nie większej niż 50 kW, przyłączonej do sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV albo o mocy osiągalnej cieplnej w skojarzeniu nie większej niż 150 kW, w której łączna moc zainstalowana elektryczna jest nie większa niż 50 kW.

Magazyn energii elektrycznej, według ustawy art. 3 pkt 10k Ustawy Prawo energetyczne jest to instalacja umożliwiająca magazynowanie energii elektrycznej i wprowadzenie jej do sieci elektroenergetycznej.

Zgodnie z Ustawą o odnawialnych źródłach energii z dnia 20 lutego 2015 r. (tekst jednolity Dz.U. z 2022 r. poz. 1378, 1383, 2370) realizacja inwestycji budowy mikrobiogazowni może być rozpoczęta jeżeli posiadamy następujące dokumenty:

- posiadanie lub uzyskanie tytułu prawnego do terenu pod lokalizację,
- wypis i wyrys z Miejscowego Planu Zagospodarowania Przestrzennego,
- karta informacyjna o udostępnianiu informacji przedsięwzięcia zgodnie z ustawą z dnia 3.10.2008 r. o udostępnianiu informacji i środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz. U. Nr 199, poz. 1227),
- umowa o przyłączenie do sieci i zapewnienie odbioru wyprodukowanej energii elektrycznej pomiędzy inwestorem a operatorem sieci.

Przyłączenie do sieci odbywa się na wniosek, który powinien zawierać tytuł prawny do nieruchomości, plan zabudowy, wypis i wyrys z Miejscowego Planu Zagospodarowania Przestrzennego, parametry techniczne urządzenia, schemat instalacji elektrycznej.

Dodatkowo mikroinstalacje wyłączone są z wymagań uzyskania koncesji w zakresie wytwarzania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł.

Następnie, należy złożyć wniosek na pozwolenie na budowę, do którego należy dołączyć:

- decyzję o środowiskowych uwarunkowaniach - w przypadku mikroinstalacji wydawana jest ona na podstawie karty informacyjnej,
- 4 egzemplarze projektu budowlanego wraz z opisami, uzgodnieniami, pozwoleniami i innymi dokumentami wymaganymi przepisami szczególnymi, zawartymi w Prawie Budowlanym,
- oświadczenie o posiadanym prawie do dysponowania nieruchomością na cele budowlane,
- decyzję o warunkach zabudowy i zagospodarowania terenu, wymagana przy braku Miejscowego Planu Zagospodarowania Przestrzennego.

Zgodnie z przepisami polskimi (Dziennik Ustaw Nr 132, poz. 877 z 1997 r.), wokół ścian zewnętrznych zbiorników biogazu i komór fermentacyjnych należy stworzyć następujące strefy ochronne (zależne od pojemności zbiornika bądź komory):

- do 50 m³-3 m,
- 50–100 m³-5 m,
- ponad 100m³-8 m.

Strefę bezpieczeństwa otacza się ogrodzeniem o wysokości co najmniej 1,8 m, zaopatrzonym w tablicę ostrzegawczą: "Biogaz – niebezpieczeństwo wybuchu. Zakaz używania otwartego ognia oraz palenia tytoniu".

Zbiorniki biogazu i komory fermentacyjne o pojemności powyżej 100 m³ powinny znajdować się na terenach przeznaczonych wyłącznie na biogazownie, zaś odległości wymienione poniżej należy co najmniej podwoić – tabela 4.1.

Tabela 4.1. Minimalne odległości komór fermentacyjnych i zbiorników biogazu o pojemności do 100 m³ i powyżej 100 m³ od innych budowli rolniczych [opracowanie własne na podstawie Dziennik Ustaw Nr 132, poz. 877 z 1997 r.]

Wyszczególnienie	Minimalna odległość (komora i zbiornik do 100 m ³)	Minimalna odległość (komora i zbiornik powyżej 100 m ³)
Od otworów okiennych i drzwiowych pomieszczeń przeznaczonych na pobyt ludzi oraz od budynków inwentarskich	15 m	30 m
Od innych budynków	8 m	16 m
Od granicy działki sąsiedniej	5 m	10 m
Od składu węgla i koksu	15 m	30 m
Od innych komór fermentacyjnych i zbiorników biogazu	15 m	30 m
Od silosów na zboże i pasze o pojemności większej niż 100 ton	15 m	30 m
Od innych obiektów budowlanych nie będących budynkami	5 m	10 m

Prosumenci energii odnawialnej wytwarzający energię elektryczną z biogazu rolniczego nie mają obowiązku zgłaszania działalności wytwórczej do dystrybutora zgodnie z art. 22a Ustawy z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (tekst uaktualniony Dz.U. 2022 poz. 1378, 1383). Wytwarzanie i sprzedaż energii elektrycznej, ciepła lub biogazu rolniczego w mikroinstalacjach nie podlega wpisowi do rejestru wytwórców biogazu rolniczego prowadzonego przez Dyrektora Generalnego KOWR.

Wytwarzanie i sprzedaż energii elektrycznej, ciepła lub biogazu rolniczego w mikroinstalacjach biogazowni rolniczych stanowi działalność wytwórczą w rolnictwie w rozumieniu przepisów ustawy z dnia 6 marca - Prawo przedsiębiorców (Dz. U. z 2021 r. poz. 162, z późn. zm.) i nie podlega wpisowi do rejestru wytwórców biogazu rolniczego prowadzonego przez Dyrektora Generalnego KOWR.

Wytwórca energii elektrycznej z biogazu rolniczego w mikroinstalacji oraz wytwórca biogazu rolniczego w mikroinstalacji biogazu rolniczego, będący osobami fizycznymi wpisanymi do ewidencji producentów, o których mowa w przepisach o krajowym systemie ewidencji producentów, ewidencji gospodarstw rolnych oraz ewidencji wniosków o przyznanie płatności, **mogą sprzedać**: 1- energię elektryczną lub ciepło wytworzone z biogazu rolniczego w mikroinstalacji, 2- biogaz rolniczy wytworzony w mikroinstalacji biogazu rolniczego

5. BUDOWA I UŻYTKOWANIE

Przedstawiono wybrane aspekty ekonomiczne związane z procesem inwestycyjnym, jak również eksploatacyjnym biogazowni rolniczych. Przeprowadzona została analiza wskaźnikowa, a także zastosowana została nowatorska metoda oceny oraz szacowania kosztów inwestycyjnych ustalając stan robót. Przedstawiony został również przykłady oceny opłacalności inwestycyjnej budowy oraz eksploatacji biogazowni rolniczych w Polsce.

Ponieważ inwestycje w sektorze odnawialnych źródeł energii (OZE) są długoterminowe i wymagają systematycznych oraz konsekwentnych działań - to co obecnie nie jest opłacalne, może stać się rentowne w perspektywie kilku lat. Wiele barier, które blokują rozwój OZE na każdym poziomie może się z czasem stopniowo skurczać. Wszystkie bariery, zarówno te psychologiczne, społeczne, prawne, ekonomiczne i polityczne powinny zostać zminimalizowane, bądź w znacznym stopniu zredukowane. Konieczne jest natomiast do tego wypracowanie efektywnych narzędzi promujących i zachęcających do inwestowania w tym obszarze. Wsparcie dla przyszłych inwestorów i edukacja społeczeństwa to pierwszy krok, aby przyczynić się do budowy i eksploatacji mobilnych mikrobiogazowni rolniczych.

Zgodnie z załącznikiem VI dyrektywy 2018/2001 z dnia 18 grudnia 2018 r. w sprawie promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych (dyrektywa RED II), w części odnoszącej się do biogazu, rozróżniane są wielkości redukcji emisji gazów cieplarnianych w zależności od stosowania zbiorników na poferment zamkniętych lub otwartych. Ponieważ inwestycja biogazowa wymaga poniesienia znacznych nakładów finansowych należałoby zwrócić uwagę na fakt znaczenia redukcji emisji podczas przyszłej eksploatacji biogazowni rolniczej. Dyrektywa REDII wyraźnie sprzyja pozyskiwaniu energii w kontekście redukcji emisji gazów cieplarnianych z produkcji rolnej

Zainteresowanie branży rolniczej produkcją biogazu w małej skali, pozwoliło firmą projektowym na opracowanie koncepcji dla instalacji mobilnych, często o prostej konstrukcji kontenerowej, gotowych do usytuowania w infrastrukturze gospodarczej. Najczęściej w skład mikrobiogazowni wchodzi następujące elementy [Kowalczyk-Juśko 2013]:

- a) punkt przyjęcia substratów stałych i płynnych,
- b) zespół pomp mieszających i dozujących substraty,
- c) komory fermentacyjne wyposażone w system grzewczy, mieszający i odprowadzający poferment,
- d) zbiornik biogazu,
- e) odsiarczalnik,
- f) oprzyrządowanie służące kontroli przebiegu procesu oraz system sterowania,
- g) instalacje rur i przewodów,
- h) silnik kogeneracyjny,
- i) pochodnia spalająca nadmiar biogazu w sytuacji braku jego odbioru,
- j) budynek techniczny.

Zaprojektowanie konkretnej mikrobiogazowni odbywa się w zasadzie indywidualnie dla każdego gospodarstwa. Według jednego z wariantów zaspokojenie zapotrzebowania na substraty dla mikrobiogazowni o mocy 50 kW wymaga obsiania ok. 30 ha gruntów roślinami przeznaczonymi do produkcji biogazu. Wykorzystanie substratów odpadowych, które poddawane są następnie fermentacji metanowej - konieczne jest zapewnienie warunków do zagospodarowania tej masy z uwzględnieniem przepisów ustawy z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz.U. z 2021 r. poz. 76, z 2022 r. poz. 1370, 2364) oraz ustawy z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. z 2022r. poz. 699 z późn. zm.) - odpowiednio zmniejsza

wymagany areał. Pozostałość pofermentacyjna (masa pofermentu stanowi około 80 – 90% wsadu kierowanego do biogazowni) znajduje wykorzystanie do użyźniania gruntów w obrębie własnego gospodarstwa. Zrealizowane dotychczas biogazownie charakteryzuje duża różnorodność – zarówno pod względem instalowanych urządzeń, jak i ilości produkowanego biogazu i otrzymywanej z niego energii. Sama zasada i sposób otrzymywania biogazu rolniczego pozwalają na takie właśnie zróżnicowanie.

Główną ideą przyświecającą twórcom kontenerowej mikrobiogazowni rolniczej KMR 7 – Rys. 5.1a, było dostosowanie jej konstrukcji do realiów polskiego rolnictwa [Stowarzyszenie Gmin 2021]. Mikrobiogazownia została przystosowana do pozostałości z produkcji rolnohodowlanej, jak również do kiszzonek z roślin energetycznych celowo uprawianych. Przewidywana wielkość produkcji biogazu o zawartości około 55% metanu (CH_4) w komorze fermentacyjnej wynosi 3,5 do 5 m^3/godz . Odpowiadająca tej ilości biogazu, moc elektryczna mikrobiogazowni wynosi około 7-10 kW_{el} . Zaprojektowana komora fermentacyjna wraz z ociepleniem i osłoną zewnętrzną w postaci blach trapezowych w zasadzie nie przekracza gabarytów podwyższonego 40 stopowego kontenera morskiego. Pojemność całkowita wynosi ok. 70 m^3 , a pojemność wypełnienia substratami ok. 60 m^3 . Na górze kontenera zaplanowano umieszczenie magazynu buforowego biogazu o pojemności około 15 m^3 , nakrytego dachem z blachy trapezowej. Zasilanie komory substratami odbywa się poprzez nakryty kanał wrzutowy w górnej części kontenera. Dostarczane kanałem wrzutowym substraty opadają po skośnej blasze do wnętrza komory. Komora nie posiada mieszadła, zastosowano okresowe natryskiwanie perkolatem (przefermentowaną gnojowicą). Wytworzony biogaz, gromadzony w magazynie buforowym biogazu, jest kierowany do silnika agregatu kogeneracyjnego, gdzie następuje przetworzenie energii biogazu w energię elektryczną i ciepłą. Układ kogeneracyjny jest umieszczony na pomoście obsługi KMR7, w osobnym wytlumionym kontenerze lub w wyznaczonych pomieszczeniach gospodarstwa rolnego. KMR7 jest wyposażona w standardowy układ przyłączenia do sieci niskiego napięcia, obejmujący wyłącznik, szafkę przyłączeniową z aparaturą sterowniczo-zabezpieczeniową, oraz wymaganą instalacją telemechaniki (telesygnalizację i telepomiar). Jedną z głównych zalet konstrukcji jest możliwość jej transportu bez konieczności uzyskiwania specjalnych pozwoleń, m.in. budowlanych [Stowarzyszenie Gmin 2021].

Założono, że dla zaspokojenia popytu inwestorów pikoinstalacji oraz mikroinstalacji biogazowych, podstawowym elementem powinna być kontenerowa mikrobiogazownia rolnicza firmy: *Mega Sp. z o.o.* [Mega 2021] Rys. 5.1b doposażona w urządzenia do wstępnej hydrolizy wsadu oraz w urządzenia służące do poprawy sprawności elektrycznej agregatu prądotwórczego. Biogazownia małej mocy (mikrobiogazownia) jest oprzyrządowaną i skomputeryzowaną jednostką podstawową umieszczoną w kontenerze, która w zależności od potrzeb może być wykorzystana do budowy odpowiedniego typoszeregu instalacji o mocy od 5 do 150 kW [Myczko i in. 2017].

a)



b)



c)



d)



e)



Rys. 5.1. Mobilne instalacje do produkcji biogazu rolniczego:

- a) Kontenerowa Mikrobiogazownia Rolnicza KMR7 [Stowarzyszenie Gmin 2021],
- b) mikrobiogazownia kontenerowa [Mega 2021], c) Micro-Biogas-Plant [AR Biogas System 2019],
- d) biogazownia rolnicza MB-30 [<https://biogaz.egie.pl>],
- e) biogazownia rolnicza MB-50 [<https://biogaz.egie.pl>].

Celem mikrobiogazowni AB Biogas System (Rys. 5.1c) jest podawanie odpadów organicznych do biologicznej fermentowni oraz udostępnienie powstałego biogazu do dalszego wykorzystania [AR Biogas System 2019]. Powstała pozostałość fermentacyjna może być stosowana jako płynny polepszacz gleby (np. nawóz). W takim przypadku odpady organiczne w ilości (100 – 1000) kg/dobę można poddać recyklingowi i otrzymać 120 m³ biogazu/dobę. Ze względów logistycznych cała mikrobiogazownia jest zamontowana w 20-stopowym kontenerze towarowym. W momencie dostawy magazyn gazu montowany jest na dachu kontenera. Możliwa jest dowolna liczba mikrobiogazowni, które mogą pracować równolegle do siebie. Wprowadzenie odpadów organicznych odbywa się za pomocą jednostki rozdrabniającej. Rozdrabniacz jest montowany w przedniej części i (podobnie jak wszystkie inne elementy sterujące) dostępny po otwarciu drzwi kontenera. Dalsze podawanie rozdrobnionych odpadów do przestrzeni fermentacyjnej trwa automatycznie za pomocą systemu pompującego. Fermentator wyposażony jest w grzałkę i mieszadło łopatkowe. Ogrzewanie musi być zasilane z zewnątrz, aby utrzymać stałą temperaturę w komorze fermentacyjnej, zwłaszcza w chłodniejszych miesiącach. Zapotrzebowanie na energię cieplną

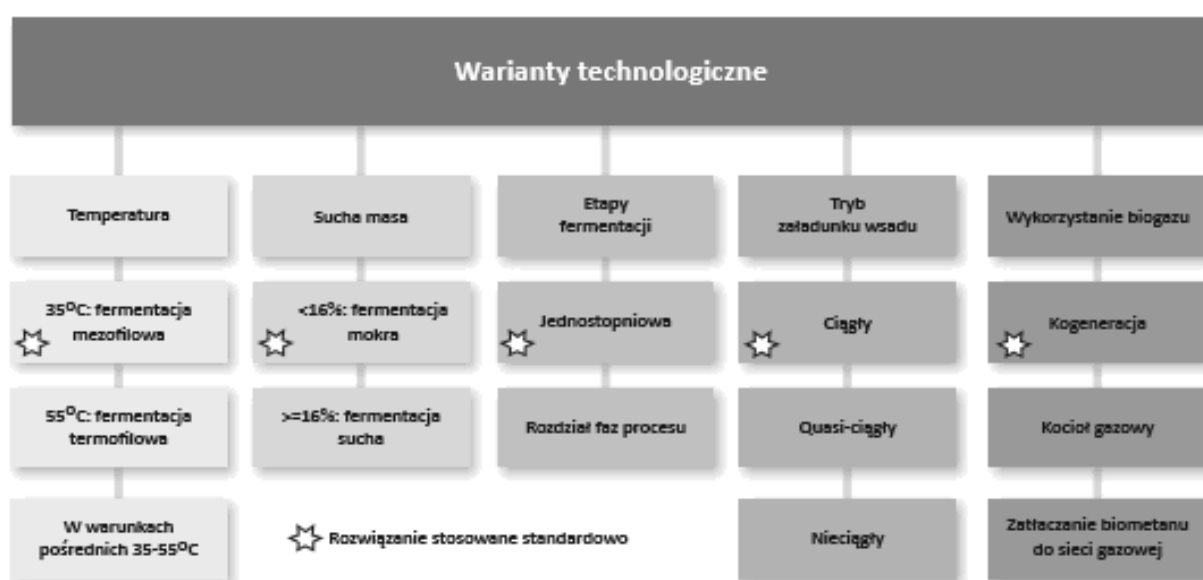
zależy od temperatury otoczenia. Mieszadło łopatkowe jest napędzane silnikiem elektrycznym za pośrednictwem przekładni kołnierkowej i pracuje ze stałą prędkością. Sterowanie silnikiem odbywa się za pomocą zintegrowanego sterowania. Właściwa fermentacja jest w pełni automatyczna. Wyprodukowany biogaz jest gromadzony w zbiorniku gazu (zamontowanym na górze pojemnika i zabezpieczony przed wiatrem). Cały system gazowy pracuje przy maksymalnym ciśnieniu 5 mbar i jest wyposażony w mechaniczne zabezpieczenie nadciśnieniowe. W przypadku nadciśnienia biogaz jest uwalniany do atmosfery. Ilość i jakość powstałego biogazu jest bezpośrednio zależna od rodzaju i świeżości wprowadzonych odpadów organicznych. Pozostałość po fermentacji jest odsączana i może być użyta jako płynny polepszacz gleby (np. nawóz). Skład pofermentu jest bezpośrednio zależny od wprowadzanych materiałów. Opcjonalnie można zapewnić jednostkę rozdzielającą w celu oddzielenia składników stałych i ciekłych poferment bezpośrednio po usunięciu [AR Biogas System 2019].

Najbardziej popularnym modelem mikrobiogazowni firmy: *eGmina, Infrastruktura, Energetyka Sp. z o.o.*, jest MB-30 (Rys. 5.1d). Mikrobiogazownia idealnie nadaje się dla mniejszych gospodarstw hodowlanych lub rolniczych [<https://biogaz.egie.pl>]. Uwzględniając specyfikację mikrobiogazowni można osiągnąć:

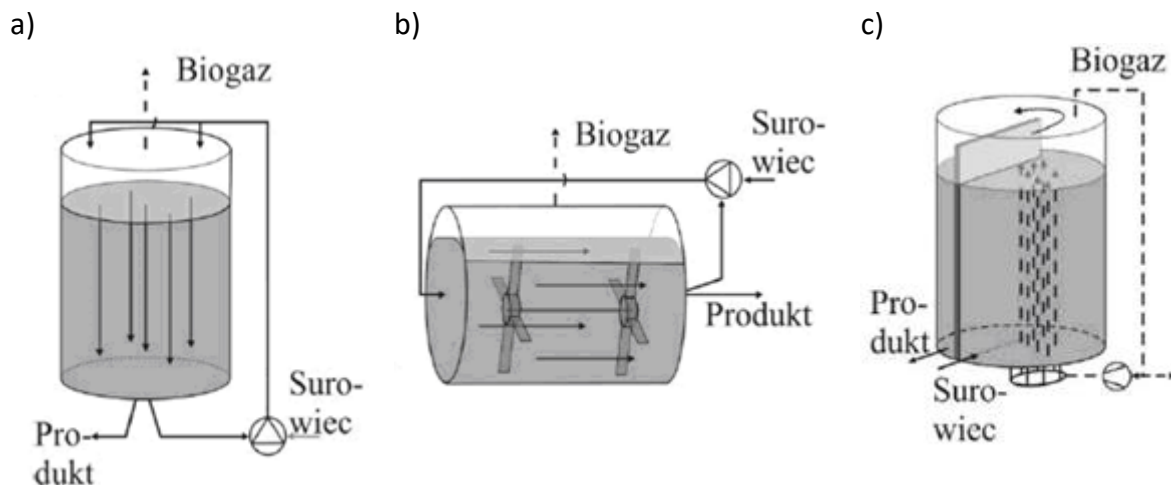
- całoroczną produkcją prądu, tj. 30 kW;
- całoroczną produkcję ciepła, tj. 40 kW;
- produkcję pełnowartościowego i naturalnego nawozu przy kilkutonowym dowolnym wsadzie dziennie (odchody, kiszonka etc.)
- prosty i bezobsługowy układ, nadzór przez Internet.

Natomiast biogazownia rolnicza MB-50 (Rys. 5.1e) jest większym modelem dla średnich gospodarstw, które są w stanie dostarczyć kilkanaście ton wsadu dziennie osiągając na rok: 50 kW prądu i 70 kW ciepła [<https://biogaz.egie.pl>].

Istnieje wiele możliwości przeprowadzenia fermentacji (Rys. 5.2), ale najważniejszy jest wybór trybu pracy komory fermentacyjnej (Rys. 5.3).



Rys. 5.2. Warianty technologiczne biogazowni rolniczej [Oniszk-Popławska, Matyka 2021, Romaniuk, Biskupska 2014, Romaniuk i in. 2012]



Rys. 5.3. Przykładowe usytuowania komór fermentacyjnych wg systemu [Jędrzak 2001]:
 a) Dranco, b) Kompogas, c) Valorga

Komory fermentacyjne stanowią „serce” biogazowni, gdyż w nich przebiega właściwy proces fermentacji [Wałowski i in. 2019]. Biogazownia może być wyposażona w jedną lub kilka komór fermentacyjnych, co jest uzależnione od zastosowanych rozwiązań technologicznych. Komory mogą być betonowe lub stalowe, zaopatrzone w instalację do ogrzewania, muszą być właściwie izolowane, umożliwiające dostęp do wnętrza w przypadku awarii lub konieczności wykonania prac konserwacyjnych czy remontowych. Komory najczęściej budowane są na powierzchni gruntu, rzadziej są częściowo zagłębione. Istnieje też możliwość całkowitego zagłębienia komór w ziemi, co pozwala na lepszą izolację termiczną, jednak utrudnia dostęp do jej wnętrza czy urządzeń pomocniczych [Bonin 2008]. Konfiguracja biogazowni, która odbywa się już na etapie planowania i projektowania, powinna w pierwszej kolejności zależeć od cech dostępnych substratów [Oniszk-Popławska, Matyka 2021].

Jako ciekawostkę technologiczną należy wskazać na wdrożenie przez Instytut Technologiczno-Przyrodniczy – Państwowy Instytut Badawczy, mikrobiogazowni – Rys. 5.4, w gospodarstwie rolnym na terenie województwa wielkopolskiego [Klimek i in. 2021].



Rys. 5.4. Mobilna biogazownia na terenie gospodarstwa rolnego [fotografia G. Wałowski]: A – budynek inwentarski (chlewnia); B – zbiornik zamknięty na surową gnojowicę świńską (substrat); C – fermentator; D – kontener, w którym znajduje się aparatura oraz sterowanie procesem; E – zbiornik otwarty na poferment, tzw. "laguna".

Instalacja fermentacji beztlenowej jest instalacją biotechnologiczną, która prawidłowo funkcjonuje oraz wymaga spełnienia ściśle określonych warunków i przestrzegania procedur związanych z obsługą, kontrolą i wspomaganie procesu namnażania specyficznych kultur mikroorganizmów odpowiedzialnych za syntezę produktu końcowego.

Dużym wyzwaniem jest adoptowanie mikroorganizmów dla produkcji biogazu w warunkach procesowych dla instalacji demonstracyjnych, które związane są z bardzo zróżnicowaną strukturą materiałów o powierzchni chropowatej, zwłaszcza w kontekście kształtu złoża adhezyjnego, które umożliwia immobilizację mikroorganizmów metanogennych.

Opracowana mobilna instalacja pilotażowa biogazowni rolniczej o pojemności czynnej fermentatora 15 m³, służy do zagospodarowania gnojowicy świńskiej z 1100 szt. tuczników utrzymywanych w systemie rusztowym.

Węzeł produkcji surowego biogazu stanowi system transportu biogazu produkowanego w zbiorniku fermentacyjnym (Rys. 5.5a) wraz z wyposażeniem, umożliwia prowadzenie procesu fermentacji, jego kontrolę i regulację.

Zbiornik fermentacyjny jest zaprojektowany dla układu w pozycji pionowej. Dno zbiornika jest w kształcie stożka ściętego z centralnie umieszczonym spustem. Szczelność zbiornika fermentacyjnego zapewnia pokrywa zamykająca fermentator wraz z elementem uszczelniającym.

System cyrkulacji - opis pracy układu. Zbiornik fermentacyjny napełniany jest biomasą od góry, co zapewni kierunkowe przemieszczanie frakcji fermentu przez cały układ. Do mieszania zawartości zbiornika fermentacji służy układ cyrkulacji pionowej biomasy. Zastosowany system mieszania biomasy zapewnia ujednorodnienie składu i temperatury fermentu, jak również dostarczenie określonych składników wspomagających jakościowo proces fermentacji.

System immobilizacji - opis pracy układu. Wewnątrz zbiornika fermentacyjnego znajduje się wypełnienie tj. złożo szkieletowe wykonane z pionowych rur (materiał PCV) stanowiące tzw. „kosz” - Rys. 5.5b, którego rolą jest zwiększenie powierzchni czynnej dla flory bakterii fermentacyjnych. Wypełnienie znajduje się na wysokości 1,22 m od dna zbiornika, tzw. „kosz” oparty jest na podporach, które jednocześnie centrują go względem osi układu - Rys. 5.5c.

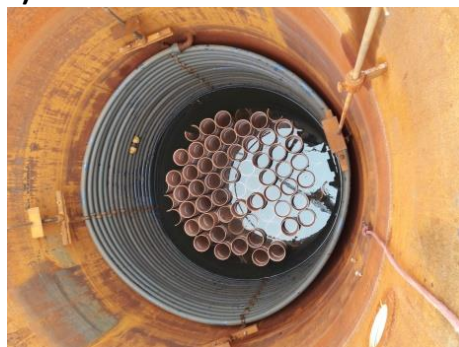
System ogrzewania - opis pracy układu. Na wewnętrznej ścianie zbiornika fermentacyjnego umieszczono spiralę grzewczą (Rys. 5c) w postaci rury o średnicy DN32 wykonanej z tworzywa sztucznego. Czynnikiem grzewczym jest ciepła woda pobierana z wymiennika ciepła głównego umieszczonego przy kogeneratorze. Dla zapewnienia optymalnych warunków powstawania biogazu, ścianki, dno stożkowe i pokrywa fermentatora są zaizolowane dla ograniczenia emisji ciepła na zewnątrz. Optymalne warunki pracy fermentatora to temperatura (35÷40)°C, nadciśnienie gazu (10÷20) kPa .

a)

b)



c)



- Rys. 5.5. Elementy mobilnej biogazowni rolniczej - widok [fotografia G. Wałowski]:
- a) reaktor przepływowy monosubstratowy do fermentacji metanowej gnojowicy wraz z instalacją do produkcji biogazu;
 - b) złoże szkieletowe stanowiące system immobilizacji - wykonane z pionowych rur;
 - c) złoże szkieletowe zalane wodą dla prób ciśnienia, na ścianie fermentatora widoczna spirala grzewcza.

Gnojowica świńska najczęściej jest produkowana w gospodarstwach, które posiadają zbiorniki do magazynowania gnojowicy. Pojemności tych zbiorników, z mocy obowiązujących przepisów, umożliwiają magazynowanie gnojowicy przez okres minimum 4 miesięcy. Po tym okresie oraz w sezonach agrotechnicznego nawożenia upraw roślinnych - gnojowica jest w stanie surowym (nieprzefermentowanym) wywożona na pola. W jej składzie znajdują się, m.in. duże ilości zdolnych do kiełkowania nasion chwastów, jaja pasożytów i mikroorganizmy patogenne. Wkomponowanie w taki cykl produkcyjny instalacji (szacowanej na 0,3 mln PLN) umożliwiającej skierowanie całego strumienia gnojowicy z kanałów podrusztowych obory lub chlewni do pracującego w trybie przepływowym reaktora, w którym będzie zachodziła fermentacja beztlenowa, pozwala na uzyskanie czystego biologicznie nawozu. W ten sposób, oprócz uzyskania energii w postaci prądu i ciepła (kogeneracja), możliwe będzie stosowanie na polach wartościowego pod względem ekologicznym i plonotwórczym nawozu. Taka instalacja będzie również spełniała realizację kryteriów produkcji zrównoważonej w gospodarstwach rolnych prowadzących produkcję zwierzęcą [Wałowski i in., 2017].

Z rolniczego punktu widzenia biogazownie rolnicze są szczególnie ważne, ponieważ umożliwiają zagospodarowanie całej biomasy odpadowej i jej konwersję na użyteczną energię i nawóz rolniczy. Wskazano na wymagane techniczno-technologiczne kryteria wytwarzania i przetwarzania biogazu. Przedstawiono przykład pilotażowej produkcji biogazu do fermentacji mezofilnej z wykorzystaniem gnojowicy świńskiej. Przedstawiono technologię oraz instalację pilotażową dostosowaną do gospodarstwa rolnego. Przebieg zmian

objętościowego strumienia biogazu dla średniej dobowej produkcji biogazu rolniczego oraz skład jakościowy biogazu rolniczego wytwarzanego z gnojowicy świńskiej wskazał na 80% CH₄.

5.1. Koszty budowy biogazowni od 10 kW do 50 kW wraz z określeniem innych możliwych (dodatkowych) kosztów.

Dotychczasowe doświadczenia zagraniczne oraz krajowe wskazują, że w sektorze biogazowni rolniczych działają zasady ekonomiki skali, tzn. jednostkowe nakłady inwestycyjne rosną lub maleją wraz ze zmianą mocy instalacji [Romaniuk i in. 2012; Szlachta, Dworaczyk 2017]. Trudno w chwili obecnej wskazać do jakiej wielkości pojedynczej mikrobiogazowni działa efekt skali, o którym decydują elementy indywidualnej oceny inwestycji takie jak konieczność rozbudowy niezbędnej infrastruktury. Różnie też rozkładają się elementy ryzyka w dużych i małych obiektach, wpływając na działalność podstawową inwestora.

Według Curkowskiego i in. [2011] aspekty ekonomiczne można uwzględnić dla kosztów, jako jednostkowe nakłady inwestycyjne oraz koszty operacyjne, które uzależnione są od wielkości skali inwestycji.

W przypadku mikrobiogazowni i małych biogazowni brak jest wystarczająco wiarygodnych informacji o rynku w Polsce – przykładem jest biogazownia w miejscowości Studzionka [Curkowski i in. 2011]. Z uwagi na pilotażowy charakter obiektu, przyjętą metodę budowy sposobem gospodarczym oraz brak szerszych doświadczeń eksploatacyjnych, nie można choćby w przybliżeniu określić jak będą się kształtowały koszty dla takich inwestycji. Nie można bezpośrednio przeliczyć jednostkowych nakładów z dużych na małe biogazownie, ponieważ istnieje cała grupa kategorii nakładów, takich jak opłata przyłączeniowa, zakup technologii, aparatura kontrolno-pomiarowa, które są raczej stałe i w mniejszym stopniu zależą od mocy zainstalowanej. O ile istnieją analogiczne warunki przyłączenia w danym punkcie, jednostkowe koszty przyłączenia do sieci maleją wraz ze wzrostem wielkości instalacji.

Dlatego dla mikrobiogazowni oraz małych biogazowni poniżej 500 kW_{el} podano, jako referencyjne nakłady inwestycyjne dla biogazowni niemieckich, w przeliczeniu na 1 kW_{el} mocy zainstalowanej. Trzeba pamiętać o tym, że nie można w bezpośredni sposób przełożyć informacji z rynku niemieckiego, o bardzo rozbudowanym rynku dostawców, serwisu - bezpośrednio na rynek polski. Ponieważ rynek urządzeń i usług w branży biogazu rolniczego jest w początkowej fazie rozwoju, szacuje się, że dla takiej samej wielkości małej biogazowni nakłady mogą być nawet kilkukrotnie wyższe niż dla dużej. W przypadku małych biogazowni działa również ekonomia skali - jednostkowa wysokość nakładów maleje wraz ze zmianą wielkości instalacji – czym większa instalacja tym nakłady inwestycyjne jednostkowe będą mniejsze [FNR 2005].

Ogólny podział poszczególnych kategorii nakładów w rozbiciu na składniki cząstkowe zależy od urządzeń wchodzących w skład ciągu technologicznego danej biogazowni. Dla przykładowej biogazowni opartej na kiszonce kukurydzy i gnojowicy o mocy 0,86 MW_{el} strukturę kategorii nakładów inwestycyjnych można przedstawić w sposób następujący: komora fermentacyjna 16%, kogeneracja 17%, składowanie i obróbka wstępna substratów 12%, prace budowlano-montażowe 13%, przechowywanie pulpy pofermentacyjnej 6%, instalacje elektryczne i pomiarowe 8%, system grzewczy 3%, środki transportu 2%, instalacje wodne/kanalizacyjne/gazowe 7%, inne 16% [Curkowski i in. 2011].

Warto wskazać, że nakłady inwestycyjne są zależne od wielkości instalacji, lokalizacji, dostępu substratów oraz funkcji, jakie ma spełniać biogazownia, a co za tym idzie - od stopnia zaawansowania technologii [Kosewska, Kamiński 2008].

Przedstawiono trzy metody szacowania kosztów (cen) wynikające ze sposobu postępu prac dotyczących realizacji biogazowni.

Pierwsza metoda dotyczy tzw. „zapytań ofertowych” dla budowy przykładowej biogazowni o mocy do 0,5 MW „pod klucz” wraz z infrastrukturą towarzyszącą, rozruchem oraz uruchomieniem procesu biologicznego w tym:

- 1) opracowanie projektu wykonawczego;
- 2) zespół trzech zbiorników zamkniętych (2 fermentacyjne i 1 pofermentacyjny) o kubaturze pozwalającej na uzyskanie 0,5 MW energii elektrycznej;
- 3) zbiornik na gnojowicę;
- 4) studzienka zbiorcza z separatorem substancji ropopochodnych dla wód opadowych;
- 5) kontener techniczny;
- 6) zespół kogeneracyjny o mocy 0,5 MW energii elektrycznej;
- 7) zbiornik p.poż.;
- 8) separator mechaniczny;
- 9) pochodnia biogazu;
- 10) sieci wodno-kanalizacyjne;
- 11) sieci elektryczne siłowe, elektryczne, sterowanie, oświetlenie;
- 12) instalacja odgromowa;
- 13) transformator;
- 14) sieci ciepłne;
- 15) sieci biogazu;
- 16) sieci technologiczne;
- 17) drogi wewnętrzne i plac manewrowy zgodnie z przepisami;
- 18) rozruch technologiczny (substrat po stronie zamawiającego);
- 19) dokumentacji powykonawczej.

Konstrukcja zbiorników - okrągłe zbiorniki monolityczne żelbetowe stanowiące ciąg technologiczny instalacji wytwarzania biogazu.

Zespół zbiorników składa się z:

a) dwóch komór fermentacyjnych (fermentacja pierwotna i wtórna) o średnicy 18 m i wysokości 6 m (pojemność całkowita 1526 m³) wyposażonych w zadaszenie membranowe dwupowłokowe będące jednocześnie zbiornikiem biogazu;

- założenia technologiczne przewidują podgrzewanie wsadu przy pomocy ogrzewania umieszczonego bliżej niż 20 cm od ściany zbiornika;
- maksymalna dopuszczalna różnica temperatury pomiędzy medium grzewczym, a zawartością zbiornika wynosi $\Delta T = 30$ K;
- płyta denna nieogrzewana;

b) zbiornika magazynowego na masę pofermentacyjną o średnicy 24,5 m i wysokości 6 m (pojemność całkowita 2827 m³) wyposażonego w zadaszenie membranowe dwupowłokowe będące jednocześnie zbiornikiem biogazu;

- zbiornik ocieplony;
- nie przewiduje się instalacji grzewczej wewnątrz zbiornika;
- jedyne ciepło będzie pochodziło od ciepła własnego wsadu;
- przewiduje się możliwość odzysku gazu i zadaszenie typu plandekowego;

c) zbiornika na odciek z silosów na kiszonkę o średnicy 7 m i wysokości 3,5 m (pojemność całkowita 134 m³) przykrytego stropem żelbetowym nie przejazdowym i zagłębionego 0,7 m w gruncie;

- zbiornik nieocieplony, całkowicie zagłębiony w gruncie;
 - nie przewiduje się instalacji grzewczej wewnątrz zbiornika;
- d) zbiornika na gnojowicę o średnicy 7 m i wysokości 3,5 m (pojemność całkowita 134 m³) przykrytego stropem żelbetowym nie przejazdowym;

- zbiornik nieocieplony, częściowo zagłębiony w gruncie;
- nie przewiduje się instalacji grzewczej wewnątrz zbiornika;

Zbiorniki otwarte, zadaszone dachem plankowym zostaną ocieplone i obudowane od zewnątrz blachą falistą, składają się one z:

- płaskiej płyty dennej,
- ścian cylindrycznych,
- centralnego słupa wspartego na cokole.

Zbiorniki zamknięte ze stropem żelbetowym składają się z:

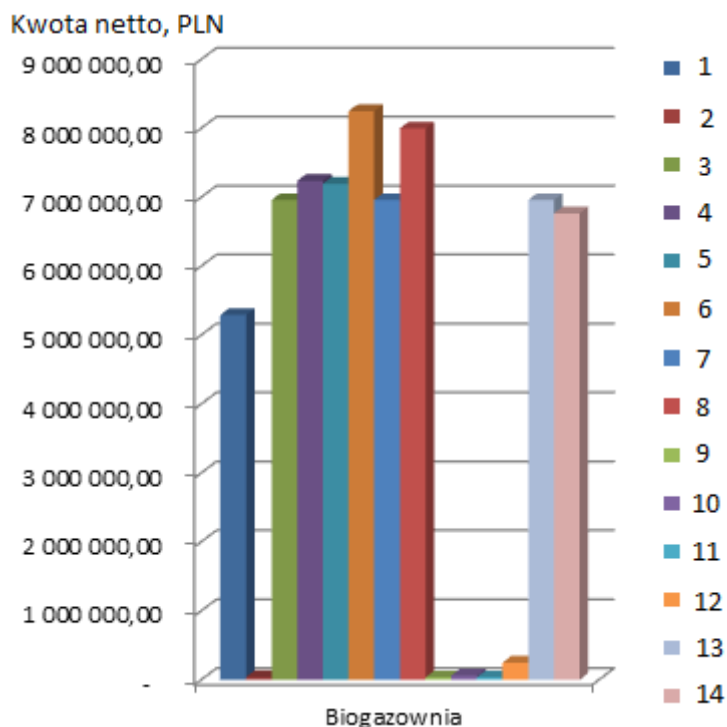
- płaskiej płyty dennej,
- ścian cylindrycznych,
- stropu żelbetowego, który z góry ukształtowany jest w lekki stożek (spadek < 1%) celem umożliwienia odpływu wód opadowych.

Parametry techniczne:

budynek techniczno-socjalny	86,99 m ²
kogeneracja	55,96m ²
stacja pomp	56,01 m ²
pochnia gazu	3,98 m ²
zbiornik na gnojowicę	42,38 m ²
zbiorniki fermentacyjne I i II	543,18 m ²
zbiornik pofermentacyjny	496,47 m ²
płyta fundamentu pod dozownik substratu	35,81 m ²
zbiornik końcowy na odciek	42,06 m ²
zbiornik na nieczystości ciekłe	4 m ²
stacja transformatorowa	13,19 m ²
miejsce gromadzenia nieczystości stałych	2 m ²
nawierzchnie:	
- żwirowe	80,14 m ²
- brukowe (grubość 10 cm)	1370 m ²
- z kostki (6 cm)	291,55 m ²
- betonowe szczelne	900,74 m ²
zbiornik p. poż. oraz wody opadowej	654,86 m ²
trawniki	4155 m ²

Wnioskować można, że wybudowanie biogazowni w roku 2019 wynosiło w zakresie (8,5÷11) mln zł netto.

Druga metoda: „Interpolacja tzw. ekwiwalentu kosztu netto na jednostkę mocy 0,5 MW dla wykonanych biogazowni” to autorski sposób przeliczenia wartości poniesionych wydatków (kwota netto) na zrealizowane biogazownie w odniesieniu do 0,5 MW „pod klucz”. Na Rys. 5.6 zestawiono koszty zrealizowanych biogazowni przez firmę działającą w branży biogazowni na terenie Polski, przeliczając koszt netto biogazowni na jednostkę mocy 0,5 MW według interpolacji.



Rys. 5.6. Zestawienie zrealizowanych biogazowni w latach (2011÷2014) w odniesieniu do tzw. ekwiwalent kosztu netto w PLN na jednostkę mocy 0,5 MW.

Przykład obliczeń dla biogazowni o mocy 1,6 MW zlokalizowaną na południu Polski; koszt netto 16.937.000,00 zł; rok 2013; tzw. ekwiwalent kosztu netto (5.1) na jednostkę mocy 0,5 MW wynosi 5.292.812,50 zł.

$$\frac{0,5 \text{ MW} \cdot 16.937.000,00 \text{ zł}}{1,6 \text{ MW}} = 5.292.812,50$$

(5.1)

Analizując Rys. 5.6 należy zauważyć, że osiągnięcie tzw. ekwiwalentu kosztu netto na jednostkę mocy 0,5 MW mieści się w zakresie (6,5÷7,5) mln zł dla pełnego zakresu prac realizowanych dla inwestora. Reszta wykonanych biogazowni (Rys. 5.6) nie spełnia kryterium pełnego zakresu prac zestawionych.

Trzecia metoda: „Interpolacja tzw. ekwiwalentu kosztu netto na jednostkę mocy 0,5 MW dla biogazowni w północnej części Polski” to autorski sposób przeliczenia wartości poniesionych wydatków (kwota netto) na realizowaną biogazownię w odniesieniu do 0,5 MW „pod klucz” - na podstawie udostępnionej dokumentacji.

Przykład obliczeń dla biogazowni o mocy 0,5 MW dla inwestora. Zestawiono prawdopodobieństwo wykonania prac w odniesieniu do planowanych kosztów, zmienną są wykonane prace w jednostce %, których średnia wynosi 70% stanowiąc prawdopodobny koszt netto (5.2) poniesionych nakładów finansowych 6.606.818,18 zł odniesionych do wartości ofertowanej w wysokości 9,5 mln zł:

$$\frac{9.500.000,00 \text{ zł} \cdot 70\%}{100\%} = 6.606.818,18$$

(5.2)

Analizując prawdopodobieństwo wykonanych prac należy zauważyć, że osiągnięcie tzw. ekwiwalentu kosztu netto na jednostkę mocy 0,5 MW mieści się według oferty w koszcie 9,5 mln zł dla pełnego zakresu prac realizowanych dla biogazowni w północnej części Polski. Uwzględniając prawdopodobny zakres wykonanych prac % wynika z interpolacji, że koszt netto poniesiono dla wartości ponad 6,6 mln zł.

Na podstawie wymienionych metod do oceny efektywności ekonomicznej inwestycji możliwe staje się także zidentyfikowanie potencjalnego ryzyka i przewidywanie ewentualnych trudności dla wypracowanego modelu finansowego inwestycji biogazowych również i dla mikrobiogazowni rolniczych.

Uwzględniając algorytm przeliczenia skali w zakresie od 10 kW do 50 kW stanowiący odpowiedź do oszacowania kosztów budowy mikrobiogazowni, należy odnieść się do wyżej wymienionych wariantów dla których wartość 0,5 MW stanowi 100%. W ten sposób można wykazać poziom od 2% do 10% wartości wskazanych w złotych (PLN) dla trzech metod szacowania kosztów (cen):

- I metoda, wnioskować można, że wybudowanie biogazowni w roku 2022 wynosi w zakresie (0,17÷1,1) mln zł netto.

- II metoda, na jednostkę mocy w zakresie od 10 kW do 50 kW wybudowanie biogazowni w roku 2022 mieści się w zakresie (0,13÷0,75) mln zł dla pełnego zakresu prac realizowanych dla inwestora.

- III metoda, uwzględniając prawdopodobny zakres wykonanych prac % wynika z interpolacji, że koszt netto poniesiony może być w zakresie (0,132÷0,66) mln zł.

Warto dodać, że należy uwzględnić jeszcze wpływ geopolityczny wojny w Ukrainie, który zdecydowanie będzie regulował wartości cen oraz sytuacja jaka ma miejsce na rynku paliw.

5.2. Przychody i koszty budowy biogazowni rolniczej przyjmując określone parametry techniczne (określona moc wytwórcza, planowane dofinansowanie, wkład własny beneficjenta, substrat).

Informacje z zakresu przygotowania analizy opłacalności inwestycji pozwolą na opracowanie modelu, którego zadaniem jest wsparcie procesu decyzyjnego dotyczącego budowy biogazowni [Przesmycka, Podstawka 2016]. Przy szacowaniu kosztów inwestycji w mikro i małą biogazownię do 50 kWel należałoby uwzględnić wpływ inflacji, który obecnie ma miejsce w Polsce. Inwestorzy największym zaufaniem obdarzają metody do oceny efektywności ekonomicznej inwestycji, takie jak: NPV, IRR, SPBT, DPP i PI.

NPV (*Net Present Value* - wartość bieżąca netto) oraz IRR (*Internal Rate of Return* – wewnętrzna stopa zwrotu) pozwalają ocenić pojedyncze projekty inwestycyjne w oparciu o analizę zdyskontowanych przepływów pieniężnych. Mają zastosowanie przy stałej stopie dyskonta w rozpatrywanym okresie [Szlachta 2005].

Wskaźnik NPV stanowi różnicę pomiędzy zdyskontowanymi przepływami pieniężnymi i nakładami początkowymi, wyraża się wzorem (5.3):

$$NPV = \sum_{t=1}^n \frac{CF_t}{(1+r)^t} - I_0 \quad (5.3)$$

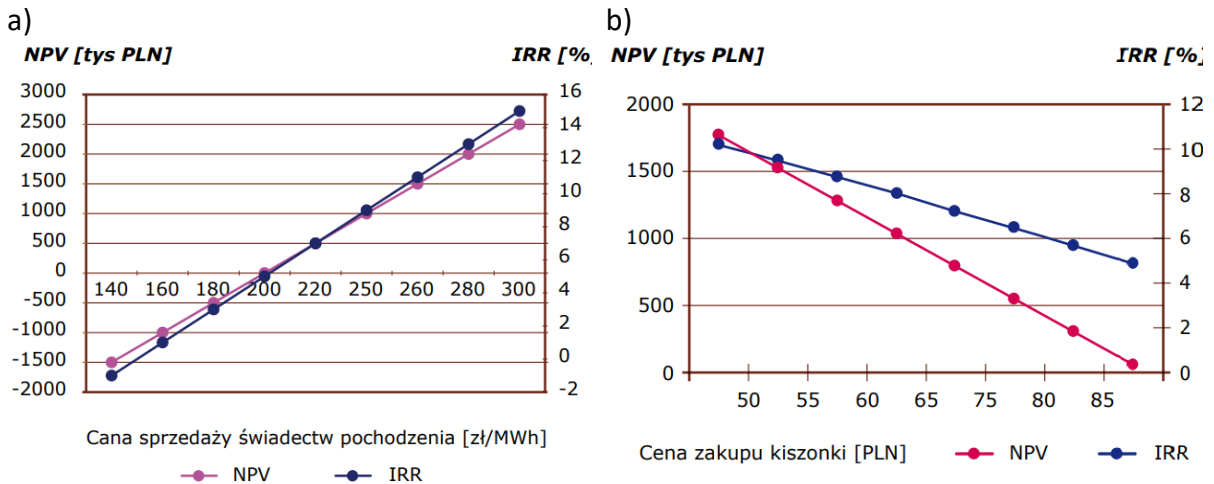
gdzie: NPV – wartość bieżąca netto, CF_t - przepływy gotówkowe w okresie t , r – stopa dyskonta, I_0 – nakłady początkowe, t – kolejne okresy (lata) eksploatacji biogazowni.

IRR - wewnętrzna stopa zwrotu informuje jaki średni zwrot w okresie życia inwestycji przynosi 1 zł zaangażowanego w inwestycję kapitału. Innymi słowy jeżeli złotówka kapitału całkowitego zaangażowanego w daną inwestycję przynosi 20 groszy korzyści netto (IRR= 20%), to aby inwestycja była opłacalna, koszt po jakim może być zgromadzony kapitał na sfinansowanie inwestycji nie może przekroczyć 20% [Curkowski i in. 2011].

SPBT (*iSimply Pay Back Time* – zdyskontowany czas zwrotu nakładów) oznacza czas potrzebny do odzyskania nakładów inwestycyjnych poniesionych na realizację przedsięwzięcia. Określa moment, gdy korzyści brutto zrównoważą poniesione nakłady [Kuczowic, Kuczowic 2006; Brandenburg 2002].

DPP (*Discounted Payback Period*) - zdyskontowany okres zwrotu nakładów inwestycyjnych i PI (*Profitability Index*) - rentowność inwestycji.

Przykładowy koszt budowy biogazowni rolniczej o mocy 1 MW wynosi ok. (12÷15) mln zł [Kowalczyk-Juško, 2013]. Przyjęto, że możliwy czas eksploatacji biogazowni wynosi 20 lat. Założono stałą stopę dyskonta na poziomie 7%. Ryzyko finansowe dla producenta biogazu wynika z niestabilności cen energii i świadectw jej pochodzenia (następuje migracja z systemu świadectw pochodzenia do uynegosystemu aukcyjnego). Podstawowe wskaźniki oceny ekonomicznej inwestycji: NPV i IRR były ściśle uzależnione od ceny świadectw pochodzenia energii – Rys. 5.7a. Jeżeli $NPV \geq 0$ inwestycja jest akceptowana, natomiast w przypadku gdy $NPV < 0$ należy podjąć decyzję o zaniechaniu inwestycji. Według przykładowych obliczeń cena świadectw pochodzenia jest wartością graniczną, poniżej której NPV uzyskuje wartość ujemną, co świadczy o braku opłacalności inwestycji. Wskaźnik IRR także jest pomocny przy ocenie opłacalności inwestycji. Gdy jego wartość jest równa lub wyższa od tzw. stopy granicznej, np. realnie oprocentowanego kredytu, inwestycję można ocenić, jako opłacalną. Poprawę wskaźników ekonomicznych zapewni pozyskanie kredytu preferencyjnego lub dotacji do inwestycji.



Rys. 5.7. Zależności wskaźników [Kowalczyk-Juśko, 2013]: a) wpływ ceny sprzedaży świadectw pochodzenia na wskaźniki NPV, IRR, przy stałej cenie sprzedaży prądu do sieci; b) wpływ ceny zakupu kiszonki kukurydzianej na wskaźniki NPV, IRR.

Na wskaźniki ekonomiczne biogazowni istotnie wpływa koszt zakupu substratów – Rys. 5.7b. Dla przykładu przy aktualnych cenach sprzedaży energii i świadectw pochodzenia graniczną ceną kiszonki jest ok. 85 zł/t. Zakup substratu w wyższej cenie powoduje, że produkcja energii z biogazu przestaje być opłacalna. W związku z tym wskazane jest poszukiwanie substratów odpadowych, których koszt będzie jak najniższy. Z punktu widzenia rolników, jako dostawców substratów ryzykowne może być niewłaściwe skonstruowanie umowy kontraktacyjnej, jej zbyt ogólne lub uzależnienie od sytuacji samej biogazowni. Dlatego bardzo ważna jest taka konstrukcja umowy, która będzie satysfakcjonowała obydwie strony, a rolnik będzie dokładnie wiedział, za jaki rodzaj biomasy, w jakiej ilości i postaci dostanie wynagrodzenie [Kowalczyk-Juśko, 2013].

5.3. Zapotrzebowanie na gnojowicę / obornik / mieszankę kiszonki dla biogazowni o różnych mocach od 10 kW do 50 kW.

Generalnie przyjmuje się, że gnojowica to produkt o konsystencji płynnej powstający podczas bezściółkowego chowu zwierząt będący mieszaniną odchodów zwierzęcych, zarówno stałych jak i ciekłych w naturalnej proporcji, z dodatkiem wody technologicznej zużytej na jej sptukiwanie oraz pochodzącej z przecieków z urządzeń do pojenia zwierząt [Hus 1995; Kutera 1994]. W zależności od gatunku zwierząt wyróżnia się gnojowicę bydlęcą, świńską oraz drobiu, przy czym ostatni typ odprowadzany jest z ferm w stanie suchym w postaci tzw. pomiotu. Wprowadzono także podział gnojowicy ze względu na zawartość domieszek (np. gnojówki, ścieków powstających na fermie lub pochodzących z zewnątrz). W tym przypadku wyróżnia się gnojowicę pełną (bez jakichkolwiek domieszek) lub niepełną (zmieszaną z co najmniej jedną z wyżej wymienionych domieszek) [Baltic Green Belt 2012].

Według Zbytka i Talarczyka [2008] gnojowica to produkt o konsystencji płynnej powstający podczas bezściółkowego chowu zwierząt. Jest mieszaniną odchodów zwierzęcych, zarówno stałych jak i ciekłych, w naturalnej proporcji, z dodatkiem wody technologicznej zużytej na jej sptukiwanie i pochodzącej z przecieków z urządzeń do pojenia zwierząt oraz resztek paszy.

Głównymi składowymi gnojowicy są kał i mocz. Kał będący odpadkowym produktem trawienia zawiera:

- pozostałości paszy: niestrawione oraz strawione albo niewchłonięte części, surowy włóknik, części zdrewniałe, celulozę, włosy, części roślin w różnym stopniu rozkładu oraz materiały mineralne i wodę,
- wydzieliny organizmu z przewodu pokarmowego; sekrecje, substancje mineralne i epitel jelit,
- bakterie i produkty ich przemiany materii.

Mocz jest wodnym roztworem nieorganicznych i organicznych związków azotu z przemiany materii substancji białkowych i niebiałkowych oraz witamin, hormonów i enzymów [Kutera 1994]. Na ilość oraz skład gnojowicy znaczny wpływ mają: gatunek, wiek, wydajność i sposób karmienia zwierząt, sposób odprowadzania i magazynowania gnojowicy, zużycie wody na fermie oraz warunki klimatyczne [Kwiecińska 2013]. Dlatego w ciągu roku z jednego stanowiska w chowie bydła uzyskuje się w zakresie (7,5÷21) m³, zaś w chowie trzody chlewnej w zakresie (1,2÷6,0) m³ gnojowicy [Jochimsen 2006; Maćkowiak 2003]. Dzienną produkcję gnojowicy różnych gatunków i kierunków użytkowych zwierząt przedstawiono w Tabeli 5.1.

Tabela 5.1. Średnia ilość gnojowicy pozyskiwana z ferm bydła i trzody chlewnej [Buraczewski 1991].

Wyszczególnienie	Dzienna produkcja gnojowicy dm³
Bydło	
cielęta do 0,5 roku	12÷15
jałówki do 1,5 roku	30÷35
jałówki powyżej 1,5 roku	25÷40
bukaty (opasy)	22÷36
krowy mleczne	50÷75
buhaje	50÷75
Trzoda chlewna	
prosięta do 60 dnia	3÷10
warchlaki	4÷15
tuczniaki i loszki	6÷25
maciory	10÷30
knury	8÷20

Szacunkowo ilość wydalanego kału i moczu od jednej dużej sztuki przeliczeniowej (JDJP) wynosi 45 kg na dobę [Podkówka 2016]. Standardowe zużycie wody do utrzymania higieny pomieszczeń inwentarskich nie powinno przekraczać 10 dm³ dziennie. Łącznie uzyskuje się dziennie około 55 kg gnojowicy, co w przeliczeniu na 1 rok daje 20 m³ gnojowicy od jednej dużej sztuki [Marszałek i in. 2011]. W praktyce przyjmuje się, że 1 tona gnojowicy ma objętość 1 m³ [Jochimsen 2006; Maćkowiak 2003].

Zawartość suchej masy w gnojowicy bydłowej waha się w zakresie (6,5÷10,5)%, zaś świńskiej w zakresie (3,8÷7,5)%. Ilość suchej masy w gnojowicy uzależniona jest od ilości zużytej wody. Ze względu na ilość wody w odchodach gnojowicę dzieli się na gęstą (powyżej 8% suchej masy) oraz rzadką (zawartość suchej masy poniżej 8%). Ponadto wyróżnia się także gnojowicę

rozcieńczoną, w której dodatek wody technologicznej przekracza 20% objętości odchodów, a zawartość suchej masy jest mniejsza niż 8% [Kwiecińska 2013].

Okolo (70÷80)% suchej masy stanowią związki organiczne, m.in. celuloza, ligniny, hemicelulozy, pentozy, skrobia. Głównym źródłem azotu w gnojowicy jest mocznik [Dębska 2004]. Azot w gnojowicy występuje w połączeniach organicznych i mineralnych. Wśród związków organicznych należy wymienić: białka, aminokwasy, mocznik, kwas hipurowy oraz inne. Średnio 50% azotu występuje w formie rozpuszczalnej w wodzie, zaś 40 % to azot amonowy, łatwo dostępny dla roślin. Stosunek C:N w gnojowicy bydłowej wynosi średnio 6,8 [Flizikowski i in. 2000]. Gnojowica zawiera makro- i mikroelementy, które są niezbędne w procesie przemian biochemicznych w komorze fermentacyjnej. W ciągu roku od 1 sztuki przeliczeniowej w gnojowicy przeciętnie otrzymujemy: P – 28,8 kg, K – 41,1 kg, Ca – 35,3 kg, Na – 11,0 kg, Mg – 10,0 kg. Gnojowica trzody chlewnej jest zasobniejsza w fosfor od gnojowicy bydłowej. Odczyn gnojowicy jest stabilny, dla gnojowicy bydłowej wynosi ok. 7,2 a trzody chlewnej wynosi ok. 7,0 i jest odczynem zasadowym.

Gnojowica jest w Polsce podstawowym substratem do produkcji biogazu - Tabela 5.2. Wynika to z faktu, że pierwsze biogazownie w Polsce budowane były przez firmę Poldanor S.A. [Poldanor 2020] i zlokalizowane były w pobliżu ferm hodowlanych. Spowodowane to było dostępnością gnojowicy, która z jednej strony stanowiła wsad do biogazowni, a z drugiej wymagała utylizacji. Jednak w latach 2011–2013 jej udział w ilościowej strukturze zużycia surowców zmniejszył się w zakresie (57÷29)% [Piwowar 2014]. Obecnie biogazownie często budowane są przy zakładach przetwórstwa rolno-spożywczego (gorzelnianach, mleczarniach czy zakładach przetwórstwa owoców i warzyw) oraz mięsnych (zwłaszcza ubojniach) i wykorzystują powstające w nich produkty uboczne. Przykładem jest wybudowanie biogazowni w Mełnie, spowodowało, to że wywar gorzelniany stał się drugim pod względem ilości substratów stosowanych w komorach fermentacyjnych biogazowni. Natomiast postawienie instalacji w Strzelinie wyniosło wysłodki buraczane na piąte miejsce w rankingu [Podkówa 2015].

Tabela 5.2. Surowce wykorzystywane do produkcji biogazu rolniczego w Polsce w latach 2011-2019 [ARR 2014, KOWR 2018-20212021].

Substrat	Łączna ilość substratu zużyta w poszczególnych latach, w Mg						
	2011	2012	2013	2018	2019	2020	2021
Gnojowica	265960	349173	455583	757554757554,7	733451733451,9	764446,8	805940,1
Wywar pogorzelniany	30465	146607	254877	839983839983,1	817199,44	914538,6	932499,4
Kiszonka z kukurydzy	108876	241590	287470	482426482426,7	420712,33	494453,6	550560,3
Resztki warzyw i owoców	10984	86109	268599	770952770952,8	768889,66	679685,5	734356,2
Wysłodki buraczane	6922	37081	101660	291648291648,4	251506251506,9	210452,9	205963,9

Obornik	11 640	23 502	30 778	8542285422	8492384923,4	91681,4	91075,8
---------	-----------	-----------	-----------	------------	--------------	---------	---------

Z punktu widzenia ochrony środowiska oraz uzyskiwanych wskaźników ekonomicznych rolnicze wykorzystanie gnojowicy jest najbardziej uzasadnione [Kwiecińska 2013]. Wynika to z założenia kontrolowanego obiegu składników pokarmowych w przyrodzie. Gnojowica jest wartościowym nawozem organicznym charakteryzującym się wysoką zawartością składników pokarmowych występujących w formie łatwo przyswajalnej dla roślin. Dzięki nawożeniu użytków rolnych gnojowicą możliwe jest spełnienie podstawowych zadań rolnictwa, tj. utrzymanie i podnoszenie żyzności gleby. Fosfor i potas zawarte w gnojowicy są wykorzystywane przez rośliny w stopniu porównywalnym z działaniem nawozów mineralnych. W przypadku azotu, efektywność przyswajania nie jest tak wysoka, jednak wyraźnie lepsza niż w przypadku zastosowania np. obornika. Ilość wapnia i magnezu zawartych w gnojowicy jest wystarczająca, aby pokryć zapotrzebowanie na te składniki na okres co najmniej dwóch lat. Gnojowica zawiera także pełny zestaw mikroelementów niezbędnych do prawidłowego rozwoju roślin. Ponadto, znajdują się w niej auksyny, czyli hormony powodujące wzrost, rozwijanie i krzewienie roślin [Kutera 1994]. Nawożenie gleb gnojowicą niesie za sobą szereg korzyści. Przede wszystkim, jako nawóz organiczny, stanowi ona ważne źródło próchnicy w glebie, a zwiększenie ilości próchnicy powoduje wzrost pojemności sorpcyjnej gleb. Dodatkowo, nawozy organiczne pozytywnie wpływają na strukturę i pojemność wodną gleby, a także stanowią źródło składników pokarmowych i energii dla mikroorganizmów w niej żyjących. Nierzadko także dzięki zastosowaniu gnojowicy można złagodzić skutki niezrównoważonego mineralnego nawożenia gleb, a także przeciwdziałać ich silnemu zakwaszeniu. Poza podstawowymi składnikami nawozowymi jak N, P, K nawozy organiczne stanowią jedyne źródło mikroelementów niezbędnych do prawidłowego rozwoju roślin [Fotyma i in. 1995]. Wpływ długotrwałego stosowania gnojowicy na gleby zależy od jej składu chemicznego, zawartości substancji organicznych oraz stanu wyjściowego. Zastosowanie małych i średnich dawek gnojowicy skutkuje okresowym wzbogaceniem gleby w próchnicę, zaś wielokrotne dostarczanie dawek większych (czyli zawierających więcej substancji organicznych niż może ulec mineralizacji w glebie) skutkuje stałym wzbogaceniem gleby w próchnicę. Stosunek ilościowy N:P:K w gnojowicy nie zawsze jest odpowiedni dla roślin. Szczególnie często stwierdza się względny niedobór fosforu. Stosunek ten jednak może zostać poprawiony poprzez zastosowanie odpowiednich nawozów mineralnych na polu lub ich dodanie do gnojowicy. W rejonach systematycznego stosowania gnojowicy do celów nawozowych może wystąpić problem zanieczyszczenia wód gruntowych składnikami zawartymi w nawozie. Szczególne niebezpieczeństwo stanowi azot azotanowy, który jest najsilniej wmywany w głąb profilu glebowego. Stąd, na takich terenach niezbędne jest przeprowadzanie okresowej kontroli składu chemicznego wód gruntowych [Fotyma i in. 1995]. Roczna dawka azotu wprowadzanego do gleby wraz z nawozami naturalnymi nie powinna przekraczać 170 kg N/ha/rok, co odpowiada ok. 45 m³ gnojowicy/ha/rok. Dawki nawozu ustala się na podstawie zawartości tzw. azotu działającego. Azot działający wykazuje takie samo działanie nawozowe jak ten pochodzący z nawozów mineralnych. Przeliczenia zawartości azotu działającego na podstawie ilości azotu całkowitego dokonuje się za pomocą wzoru (5.4):

$$N_{dz} = N_c r_n \quad (5.4)$$

gdzie: N_{dz} - azot działający, N_c - azot całkowity, r_n - równoważnik nawozowy.

Równoważnik nawozowy określa dostępność składników pokarmowych w nawozach naturalnych w odniesieniu do nawozów mineralnych. Wartość równoważnika nawozowego w zależności od okresu stosowania przedstawia Tabela 5.3, a wartość równoważnika nawozowego w zależności od składnika nawozowego przedstawiono w Tabeli 5.4.

Tabela 5.3. Wartość równoważnika nawozowego w zależności od terminu stosowania nawozu [Jadczyzyn 2009].

Rodzaj nawozu	Termin	
	wiosenny	jesienny
Obornik	0,30	0,30
Gnojowica	0,60	0,50
Gnojówka	0,80	0,5

Tabela 5.4. Wartości równoważników nawozowych w zależności od składnika z nawozów naturalnych [Jadczyzyn 2009].

Rodzaj nawozu	W 1 rok po zastosowaniu			W 2 rok po zastosowaniu		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Obornik	0,3	0,4	0,8	0,1	0,3	0,1
Gnojowica	0,5÷0,7	0,7	0,0	0,1	0,1	0,1
Gnojówka	0,5÷0,7	-	0,5	-	-	0,1

Ponadto, nawozy organiczne powinny być stosowane jedynie w okresie od 1 marca do 30 listopada. Stąd potrzeba budowania na fermach specjalnych zbiorników umożliwiających przechowywanie co najmniej 4-miesięcznej produkcji gnojowicy. Najlepiej jest stosować gnojowicę na nieobsianą glebę w okresie wczesnej wiosny. Dopuszcza się jej stosowanie na rośliny, z wyjątkiem tych przeznaczonych do bezpośredniego spożycia przez ludzi lub na krótko przed skarmianiem zwierząt. Gnojowicę najlepiej jest wprowadzać bezpośrednio do gleby wykorzystując ku temu tzw. węże rozlewowe. Nawozy naturalne należy stosować w odległości większej niż 20 m od stref ochronnych źródeł i ujęć wody, brzegów zbiorników oraz cieków wodnych, kąpielisk zlokalizowanych na wodach powierzchniowych oraz obszarów morskiego pasa nadbrzeżnego. Ponadto zabrania się stosowania płynnych nawozów organicznych na terenach, na których poziom zwierciadła wód gruntowych znajduje się poniżej 1,2 m. [MRiRW 2004].

Uwzględniając realizowane badania dotyczące zapotrzebowania substratu w procesie fermentacji – zestawiono w Tabeli 5.5, trend kombinacji substratów w zależności od ilości energii ejuzyskiwanej z biogazu (o średniej zawartości metanu).

Tabela 5.5. Zestawienie wydajności substratów w zależności od ilości energii uzyskiwanej z biogazu [opracowanie własne], objaśnienia: CH₄ – metan, ha – hektar, t – tona, VS - lotne związki, L – litr, a - ar.

Lp	Literatura	Charakterystyka substratu (biomasy)	Strumień biogazu	Zapotrzebowanie ilości biogazu w przeliczeniu na mocy agregatu kogeneracyjnego	Ilość energii uzyskiwana z biogazu (o średniej zawartości CH ₄)
1	Podkówka 2006	Kiszonka z kukurydzy 500 t/ha		9405 m ³ /ha	15906 kWh/ha
2	Kaparaju i in. 2009	Słoma pszenna (stężenie substratu: 21,9 (g-VS/L), rozcieńczenie 50%)	297 litrów CH ₄ /kg VS	-	-
3	Asam i in. 2010	Filtr prasowany włókno obornika 161 ± 19 (L/kg VS) Włókno nawozowe strącane chemicznie 231 ± 51 19 (L/kg VS) Surowa gnojowica wieprzowa 330 ± 49 19 (L/kg VS) Kiszonka z kukurydzy 236 ± 52 19 (L/kg VS) Kiszonka z trawy 361 ± 8 19 (L/kg VS)	Włókno sprasowane z obornika 54,5 ± 6,4 L/kg Chemicznie strącane włókno obornika 12,3 ± 2,7 L/kg Surowa gnojowica ca wieprzowa 10,4 ± 1,5 L/kg Kiszonka z kukurydzy 68,0 ± 15,0 L/kg Kiszonka z trawy 46,5 ± 1,03 L/kg	-	-
4	Gołaszewski 2011	Kukurydza	5780 m ³ CH ₄ /ha·rok = 56 MWh/ha·rok	-	-
5	Li i in. 2013	Kukurydza (CS) i obornik (CM), proporcje 3:1 i 1:1 (dla lotnych substancji stałych)	218,8 ml CH ₄ /g V dodane (stosunek=3:1) wydajność objętościowa metanu	-	-

			14.2 Objętość L CH ₄ /L reaktora (CS:CM 1:1)		
6	Chrząstek 2016	18000 t/a	142703 m ³ /miesiąc = 227 MWh w 2015 roku	130 Nm ³ /t zmieszanych odpadów komunalnych, Tychy, STRABAG	-
7	Sadecka 2016	-	-	-	(5,5÷7,5) kWh/m ³ dla 65% CH ₄
8	Morken i in. 2018	Substrat, 10,24% TS (całkowita substancja stała), stosunek (DCS/MFW) = 2,10) = płynna gnojowica krowa (DCS) i komunalne odpady żywnościowe (MFW)	818.18 m ³ CH ₄ /rok	-	21,66 kW/h
9	Rusanowska i in. 2018	Kiszonka z Sida hermaphrodita zmieszana z obornikiem krowim, STARE= 3 kg/(m ³ ·d)	9345.80 m ³ CH ₄ /miesiąc	-	1,559 kWh/d
10	Ormaechea i in. 2018	Obornik bydłocy	0.44-0.59 m ³ CH ₄ /kg VS	a) wstępna obróbka ultradźwiękami (US), b) współfermentacja z surową gliceryną z przemysłu biodiesla, c) wstępna obróbka US przed współfermentacją beztlenową.	62.2%-64.3% o 672.83 kJ/kg po dodaniu substratu (US) 1207.29 kJ/kg po dodaniu substratu +gliceryny
11	Liberti i in. 2019	kiszonka kukurydziana, wyłoki z oliwek i gnojowica wieprzowa,	1,974,488 Nm ³ / 2014 rok 1,995,791 Nm ³ / 2016 rok	Usprawnienie procesu fermentacji beztlenowej przy użyciu mieszanki składników odżywczych i	7,989,701 kWh _{el} w 2014 8,075,900 kWh _{el} w 2016 (po ulepszeniu)

				sacharozy w zakładzie inkubacji wstępnej.	
12	Nsair i in. 2019	Substrat - całkowita zawartość substancji stałych (w %w/w), zawartość lotnych substancji stałych (w %TS): gnojowica, 5,3 ± 2,08 % w/w, 77,9 ± 1,25% TS, nawóz z kurczaka 42,1 ± 7,78 % w/w, 61,4 ± 1,25% TS i kiszonka z kukurydzy 36,3 ± 3,07% w./w., 95,9 ± 1,25% TS. Surowcem sezonowym były: kukurydza 67,01 ± 0,93 % w/w, 98,7 ± 1,25% TS, żyto 87,0 ± 0,93 % w/w, 98,0 ± 1,25 %TS i buraki cukrowe 15,3 ± 2,17% w/w, 85,5 ± 1,25% TS.	1.75 ± 0.404 MWh/t	-	574 ± 21.4 MWh
13	He i in. 2020	Chore świnie, zawierające 45,5% suchej masy	104,59 CH ₄ mL/L	45,50 CH ₄ mL/(d·L)	-
14	Uddin i in. 2021	1 tona wytlóków z oliwek	1tona= 5766 m ³ CH ₄ /miesiąc	-	1 ton= 0,769 MWh/d.
15	Piekutin i in. 2021	1) Substraty =62 t/dzień (kiszonka z kukurydzy, obornik, płyn) obornik, wytloki owocowe, ściółka, zawartość żołądka, Pulpa ziemniaczana)	1) 117 m ³ biogazu na 1 tonę substratów. 2) 20 m ³ /miesiąc biogazu na 1 m ³ substratów 3) 83 m ³ biogazu na 1 tonę substratów	-	1) Kogeneratory: 400 kW, 600 kW 2) Kogeneracja: 2xJENBACHER JMS 312 GS-B/NL; 530 kW każdy; HORUS HE-s 480/510; 480-B, 48 kW każdy;

	<p>2) Substraty = 47t/dzień (Osad surowy, nadmierny osad czynny, koferment).</p> <p>3) Substraty = 98 t/dzień (gnojowica, kurczaki obornik, rzeźnia i flota mleczarska, pióra drobiowe, serwatka, warzywo materia, zawartość żołądka).</p>			<p>Spalanie: 2xVITOPLEX 300, 140 kW każdy</p> <p>3) Kogenerator: 0,99 MW</p>
--	--	--	--	--

6. POFERMENT

6.1. Czym jest poferment – definicja

W myśl definicji biogazu rolniczego zgodnie z ustawą z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. z 2022 r. poz. 1378, 1383, 2370) gaz ten otrzymywany jest w procesie fermentacji metanowej m.in. z surowców rolniczych oraz płynnych lub stałych odchodów zwierzęcych (nawozów naturalnych zgodnie z ustawą z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz. U. z 2021 r., poz. 76, z 2022 r. poz. 1370, 2364)). Biogaz ten powstaje w instalacjach odnawialnych źródeł energii (biogazowniach rolniczych), małych instalacjach oraz mikroinstalacjach. Produktem pozostającym po procesie fermentacji jest właśnie substancja pofermentacyjna, którą nazywamy nieprzefermentowane związki organiczne, składniki mineralne oraz biomasę bakterii metanowych stanowiących pozostałość po procesie fermentacji. Można też stosować takie określenia, jak: poferment, pozostałość fermentacyjna, pulpa pofermentacyjna, odciek lub ściek pofermentacyjny. Skład odpadu pofermentacyjnego przede wszystkim uzależniony jest od substratów biorących udział w procesie fermentacji metanowej.

W procesie wytwarzania biogazu zachodzą zmiany w składzie chemicznym wsadu. Zmianom ulega stosunek węgla do azotu (C:N). Przykładowo stosunek węgla do azotu w surowej gnojowicy wynosi 6,8:1,0, a w substancji pofermentacyjnej ten stosunek wynosi 15,0-20,0:1,0. Magazynowanie surowej gnojowicy zwiększa intensywność wydzielanych odorów o 77%, a przechowywanie przefermentowanej gnojowicy obniża odory o 80%.

6.2. Zagospodarowanie substratu pofermentacyjnego

6.2.1. Ogólne informacje o zagospodarowaniu substratu pofermentacyjnego

Przefermentowane podłoże kierowane jest z komory fermentacyjnej do zbiorników składujących odpady pofermentacyjne (np. stare zbiorniki lub baseny na gnojowicę), gdzie poferment jest przechowywany i schładzany. Na tym etapie można oddzielić frakcje płynną od stałej. Frakcja płynna może być rozlewana jako nawóz płynny, a frakcja stała może być składowana przed wykorzystaniem jako kompost. Do rozdzielania tych frakcji stosuje się między innymi taśmowe prasy filtracyjne lub wirówki. Jednak taki sposób separacji podnosi koszty produkcji biogazu. Pojemność zbiorników wykorzystywanych do fermentacji powinna być tak dobrana, aby można było przechowywać przefermentowany materiał do czasu, gdy będzie możliwość jego wywiezienia na pola uprawne. Czas składowania przefermentowanej substancji w zbiorniku zależy od pory roku i może wynosić nawet 6 miesięcy. Zbiorniki mogą być zamykane gazoszczelnym przykryciem, ze względu na zawartą w substracie fermentacyjnym materię organiczną nie ulegającą całkowitemu rozkładowi beztlenowemu w fermentatorze. Robi się tak, dlatego że procesy gnilne odbywają się również w zbiorniku, gdzie przechowywane są odpady pofermentacyjne. Pozyskanie dodatkowego biogazu może wynosić nawet 20% całkowitej produkcji. Inną zaletą stosowania zakrytych zbiorników jest zmniejszenie emisji odorów do otoczenia.

Granulacja

Przed energetycznym wykorzystaniem wysuszony poferment może być poddany granulacji do postaci peletów, tak samo jak można granulować poferment na cele nawozowe.

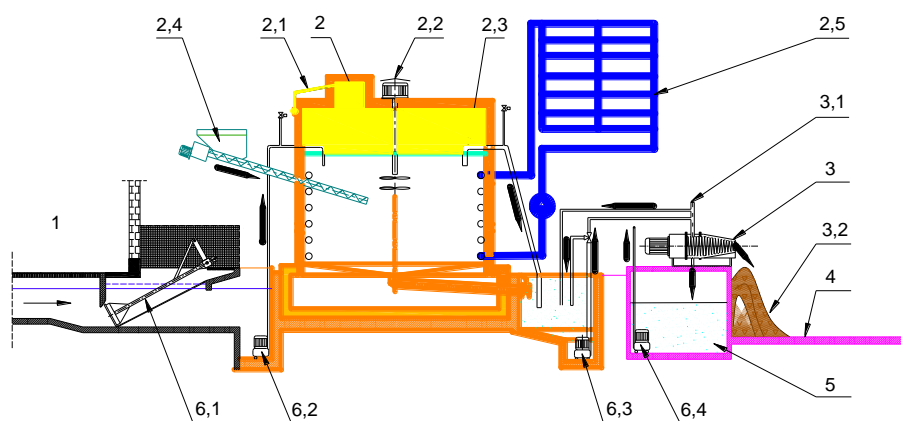
Suszenie

Stała frakcja pofermentu, po podsuszeniu, może stanowić ściółkę dla zwierząt gospodarskich. Chłonność takiego materiału jest nie mniejsza niż np. słomy. Poza tym, obornik powstający z udziałem takiego pofermentu, dzięki jego rozdrobnieniu, może być równomiernie rozrzucony na polu oraz szybciej ulega rozkładowi w glebie niż obornik z tradycyjnym materiałem ściółkowym.

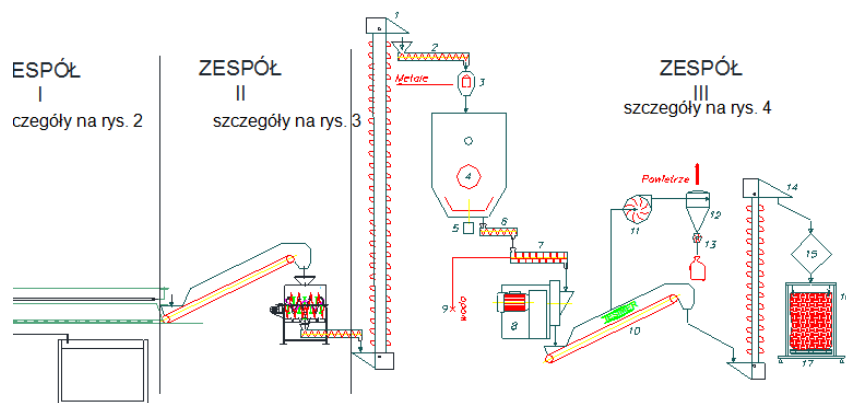
6.2.2. Granulacja substratu pofermentacyjnego

Z punktu widzenia technologicznego przefermentowana gnojowica stanowi cenny nawóz naturalny. W wyniku procesu fermentacji metanowej powinna być separowana na części stałą o zawartości około 30% suchej masy i część ciekłą o zawartości do 5% suchej masy.

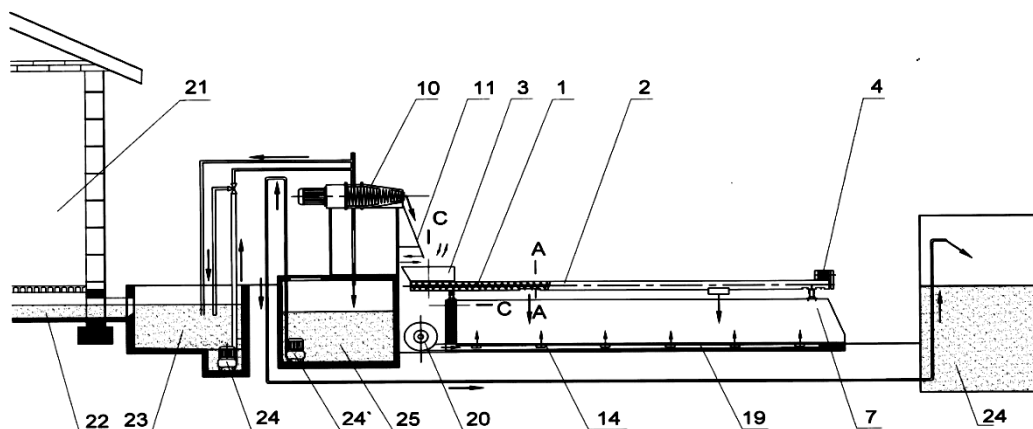
W nawiązaniu do instalacji kompleksowego pozyskania i zagospodarowania energii w postaci biogazu a następnie energii elektrycznej i ciepłej pokazanej na rysunku 2.9 oraz poniżej na rysunku 6.1 przedstawiono mikrobiogazownię w której to przedstawiono schemat pozyskania energii i substratu pofermentacyjnego z możliwością jego zagospodarowania na potrzeby wynikające z gospodarstwa rolnego lub rynku. Schemat realizacji tej technologii jest przedstawiony na rysunku 6.1, na którym to przedstawiono zasadę separacji przefermentowanej gnojowicy i następnie na rysunkach 6.2. i 6.3 schemat technologiczny jej magazynowania.



Rys. 6.1. Schemat komory rolnej biogazowej z separatorem do przefermentowanej gnojowicy i z kolektorem słonecznym do podgrzewania reaktora: 1- budynek inwentarski; 2- komora fermentacyjna; 3- separator; 3.1 – rurociąg do podawania płynnej masy pofermentacyjnej z rurą przelewową od separatora, 3.2- frakcja stała masy przefermentowanej (sucha masa do produkcji kompostu), 4- płyta na odseparowaną frakcję stałą; 5- zbiornik pośredni na odseparowaną frakcję płynną pofermentacyjną; 6.1 mieszadło gnojowicy w kanałach gnojowicowych, 6.2.- pompa z rurociągiem do zadawania świeżej gnojowicy, 6.3 – pompa z rurociągiem do mieszania i podawania gnojowicy do separatora, 6.4 – pompa do przepompowania odseparowanej gnojowicy [opracowanie własne]

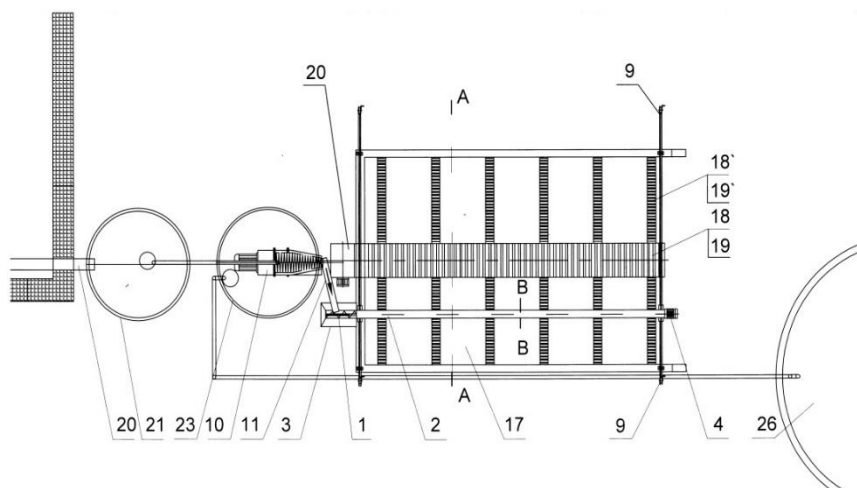


Rys. 6.2. Schemat linii do granulacji substratów pofermentacyjnych o zawartości suchej masy około 30% [opracowanie własne]



Rys. 6.3. Urządzenie do odseparowywania i magazynowania stałej masy z gnojowicy w przekroju wzdłużnym: 1 – ślimakowy przenośnik, 2 – rurowa obudowa, 3 – zasypowy kosz, 4 – silnik z motoreduktorem, 7 – ściana silosu, 10 – separator, 11 – rynna, 14 – zawiasy, 19 – szeroki ruszt, 20 – wentylator, 21 – obiekt inwentarski, 22 – kanał spływowy, 23 – zbiornik, 24 – pompa wirowa, 24' – pompa, 25 – zbiornik [opracowanie własne]

Na schematach (rysunek 6.3 i 6.4) przedstawiono rozwiązanie do magazynowania substratu pofermentacyjnego odseparowanego o zawartości suchej masy powyżej 30%. Instalacja ta umożliwia przykrycie (zadaszenie) a także zainstalowanie wentylatora umożliwiającego podsuszenie substratu zgodnie z wymaganiami granulacji.



Rys. 6.4. Urządzenie do odseparowywania i magazynowania stałej masy z gnojowicy – widok z góry: 1 – ślimakowy przenośnik, 2 – rurowa obudowa, 3 – zasypowy kosz, 4 – silnik z motoreduktorem, 9 – wciągarka, 10 – separator, 11 – rynna, 17 – dno komory, 18 – wzdłużny kanał, 18' – poprzeczne kanały wentylacyjne, 19 – szeroki ruszt, 19' – wąski ruszt, 20 – wentylator, 21 – obiekt inwentarski, 23 – zbiornik, 26 – zbiornik magazynujący [opracowanie własne]

Nad powyższą instalacją do magazynowania substratu zaleca się wykonać konstrukcję dachową do przykrycia zabezpieczająco przed warunkami atmosferycznymi.

Jest to zmagazynowany bardzo cenny produkt, którego widok przedstawiono na fotografii 6.1 A. Przedstawiono też widok separacji substratu (B) oraz widok substratu z jego wykorzystaniem na potrzeby ściółki w oborach (C).



Fot. 6.1. Separacja substratu, wykorzystanie na potrzeby ściółki w oborach.

Podsumowując, przedstawione powyżej linie technologiczne procesu zagospodarowania pofermentu rolniczego pozwalają na następujące jego zagospodarowanie:

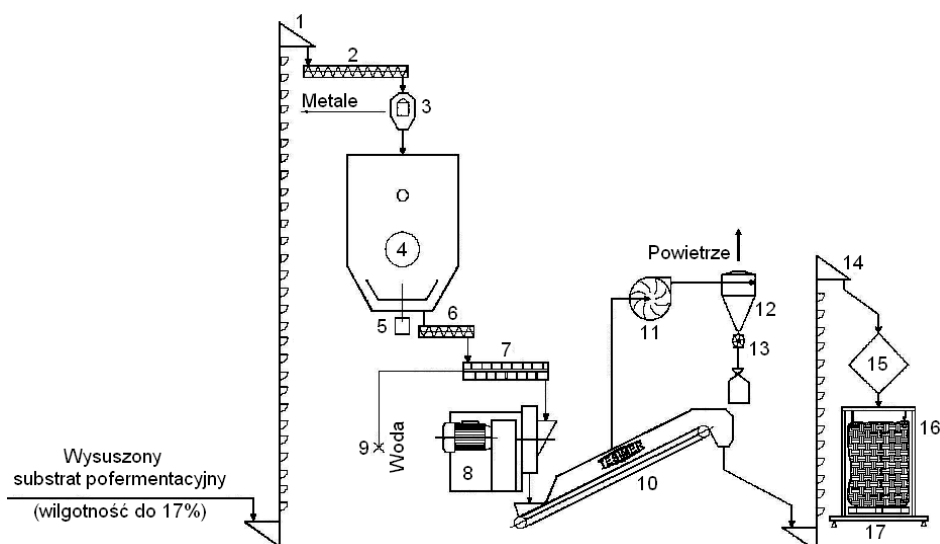
- jako podściółka dla zwierząt (zwłaszcza krów),
- do produkcji granulatu na potrzeby nawozu ekologicznego,
- do produkcji kompostu na potrzeby gospodarstwa i rynku.

Proces granulacji substratu pokazano na fotografii 6.2.



Fot. 6.2. Widok granulatora, matrycy pierścieniowej, substratu po wysuszeniu i granulatu –końcowego produktu.

Koncepcję pozyskania granulatu pofermentacyjnego według założeń ITP-PIB przedstawiono na rysunku 6.5.



Rys. 6.5. Schemat technologiczny linii granulowania wysuszonego substratu pofermentacyjnego o wydajności 200-300 kg/h: 1– podnośnik kubełkowy (2,2 kW); 2 – przenośnik ślimakowy (2,2 kW); 3 – wychwytycz magnetyczny; 4 – zbiornik 2-3 m³ z czujnikiem napełnienia; 5 – mieszadło wygarniające zbiornika (2,2 kW); 6 – dozownik ślimakowy (0,75 kW); 7 – konicjoner (2,2 kW); 8 – prasa granulacyjna (11 kW); 9 – instalacja dozowania wody; 10 – chłodnica pozioma (0,75 kW); 11 – wentylator promieniowy (2,2 kW); 12 – cyklon; 13 – śluza podcyklonowa (0,55 kW); 14 – podnośnik kubełkowy (2,2 kW); 15-16 – stanowisko do załadunku; 17 – waga pomostowa [opracowanie własne]

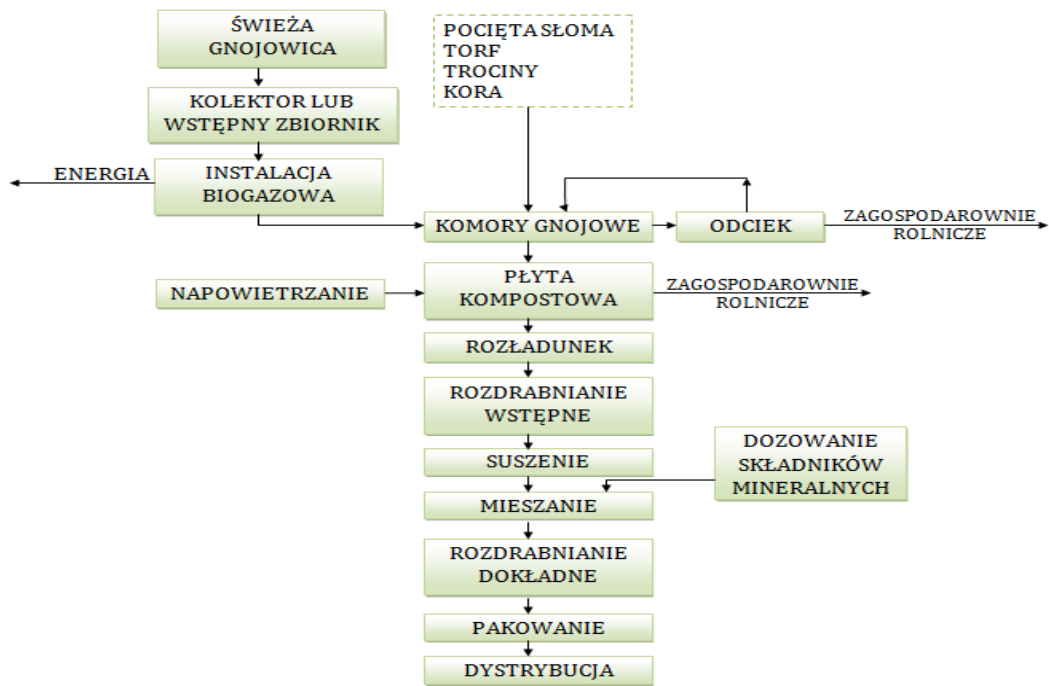
Przykładowa charakterystyka granulatu została przedstawiona w tabeli poniżej, na podstawie badań własnych granulatu z pofermentu biogazowni Wojny-Wawrzyńce.

Tabela 6.1. Parametry fizyko-chemiczne granulatu z masy pofermentacyjnej z biogazowni (średnia za lata 2016-2018) [opracowanie własne]

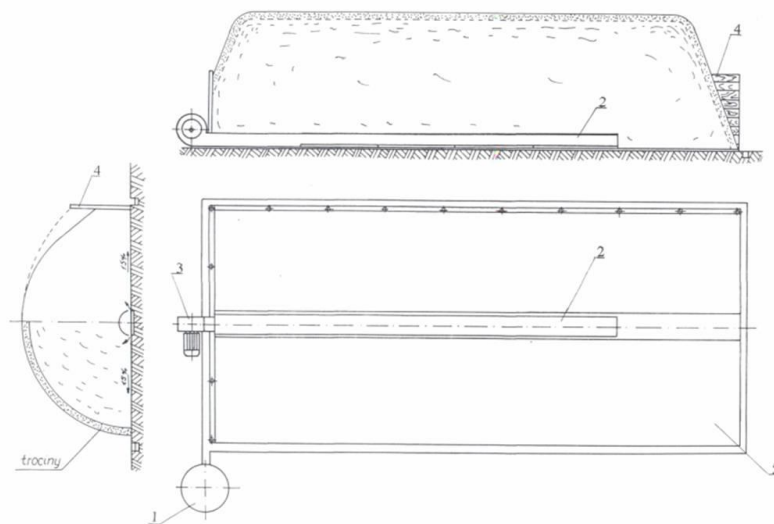
Parametr	Wartość
Azot	1,57%
Fosfor	0,4%
Potas	1,00%
Magnez	0,38%
Wapń	2,23%

6.2.3. Kompostowanie substratu pofermentacyjnego.

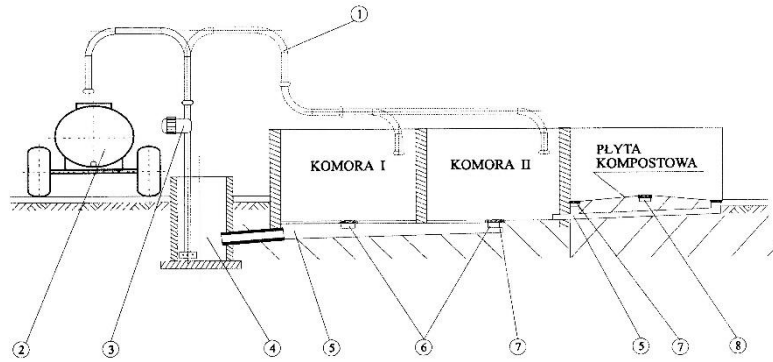
Drugim etapem w procesie zagospodarowania substratu pofermentacyjnego, w celu jego bardziej efektywnego wykorzystania, jest produkcja kompostu, którego zasadę przedstawiono schematycznie na rysunkach 6.6 - 6.9.



Rys. 6.6. Schemat obróbki gnojowicy i pozyskania biogazu oraz zagospodarowania masy pofermentacyjnej w gospodarstwie [opracowanie własne]

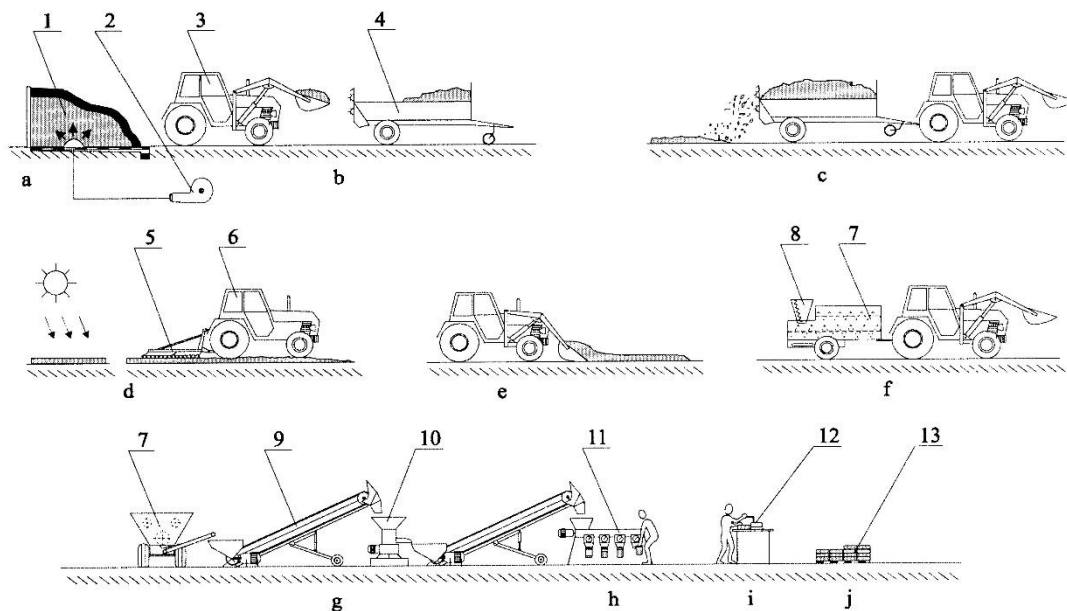


Rys. 6.7. Płyta kompostowa: 1 – studzienka, 2 – tunel napowietrzający, 3 – wentylator, 4 – ściana oporowa, 5 – płyta kompostowa [opracowanie własne]



Rys. 6.8. Przekrój poprzeczny kompostowni:

1 – rurociąg świeżej lub przefermentowanej gnojowicy, 2 – wóz asenizacyjny, 3 – pompa, 4 – studzienka na odciek, 5 – kanał poprzeczny, 6 – kanał podłużny w komorach, 7 – przykrycie kanału, 8 – tunel napowietrzający [opracowanie własne]



Rys. 6.9. Technologia produkcji nawozu organiczno-mineralnego BIOKOM:

a – napowietrzanie, b – załadunek na rozrutnik, c – rozrzucanie kompostu do suszenia, d – suszenie kompostu, e – zgarnianie kompostu i załadunek do wozu mieszającego, f – mieszanie kompostu z dodatkami, g – rozdrabnianie, h – pakowanie, i – zgrzewanie worków foliowych, j – magazynowanie; 1 – kompost, 2 – wentylator, 3 – ciągnik z ładowniczem czołowym, 4 – rozrutnik obornika, 5 – brona zębowa, 6 – ciągnik, 7 – wóz mieszający, 8 – dozownik dodatków, 9 – przenośnik, 10 – rozdrabniacz, 11 – pakowarka, 12 – zgrzewarka, 13 – paleta [opracowanie własne]

Kompostownię i biogazownię (z możliwością zastosowania w mikrobiogazowniach) zaprezentowano na zdjęciach (fot. 6.3, 6.4 i 6.5). Przefermentowana gnojowica poddawana jest dalszej obróbce, polegającej na wymieszaniu jej z pociętą słomą pokombajnową, torfem i innymi odpadkami rolniczymi. Masa kierowana jest do otwartej komory gnojowej, w której przebywa około 3 miesięcy i jest zraszana świeżą gnojowicą przez cały okres fermentacji.

W pierwszym etapie procesu kompostowania przebiegają głównie procesy beztlenowe w wyniku zaszczeplenia bakteriami metanowymi z przetworzonej gnojowicy z biogazowni. Proces ten powoduje szybki rozkład cukrów złożonych, peptydów i lipidów do związków prostych i ich mineralizację. W następnym etapie masa kompostowana jest napowietrzana. W masie słomy zaczyna się proces fermentacji tlenowej, w czasie której temperatura osiąga 50-60°C. Pod koniec tego procesu temperatura spada. Wtedy należy powstałą masę wymieszać i ułożyć na płycie kompostowej, gdyż cała masa jest dodatkowo napowietrzana za pomocą dmuchawy. Kompostowana masa poddana intensywnemu napowietrzaniu, przechowywana jest przez okres jednego miesiąca. Szczegóły wykonania zrealizowanej kompostowni w Duchnowie pokazane na rysunku 6.7, przekrój położny i poprzeczny płyty kompostowej oraz na rysunku 6.8 przekrój poprzeczny zakładu kompostowni, to jest obwód komór gnojowych i płyty kompostowej.



Fot. 6.3. Widok elementu płyty kompostowej [materiały własne]



Fot. 6.4. Gotowy obiekt kompostowni w Duchnowie [materiały własne]



Fot. 6.5. Gotowe obiekty biogazowni i kompostowni w Duchnowie [materiały własne]

Finalny produkt kompostowania ma duży stopień biodegradacji (ok. 60%) i higienizacji. Jest bezpieczny pod względem bakteriologicznym i chemicznym dla ludzi i środowiska. Masa organiczna po kompostowaniu ma wilgotność ponad 60%. Wilgotność całej masy należy sprowadzić do około 40%. Suszenie w sprzyjającej pogodzie wykonuje się na słońcu, przerzucając substrat rozłożony cieką warstwą na płycie betonowej. W okresie niesprzyjającym dosuszanie można prowadzić w suszarni podłogowej z nawiewem ciepłego powietrza. Wilgoć można sprawdzić metodą suszarkowo-wagową.

Wysuszoną masę należy przesiać w celu wyeliminowania zanieczyszczeń mechanicznych i poddać rozdrobieniu. Tak przygotowana masa jest podstawowym składnikiem nawozu. Na tej bazie opracowano dwie mieszanki nawozowe: BIOKOM-1 i BIOKOM-2. Pierwsza mieszanka (o odczynie pH = 7,5) przeznaczona jest do nawożenia warzyw, upraw polowych, działkowych, w szklarniach i tunelach foliowych. Druga zaś do zastosowania w uprawach roślin iglastych (pH = 5,5).

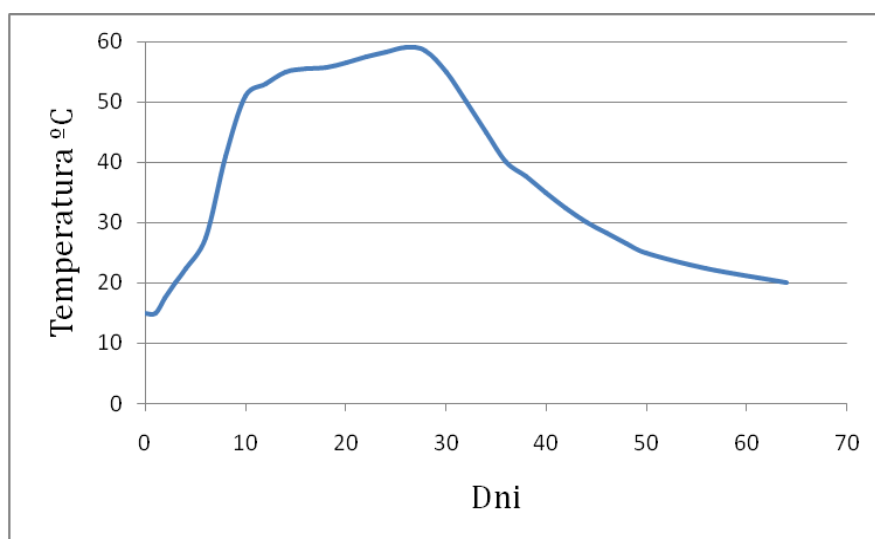
Skład ilościowy nawozu BIOKOM-1:

<u>Składnik</u>	<u>Proporcje objętościowe [%]</u>
Kompost	60
Torf	10
Kora drzew iglastych	10
Pomiot kurzy	10
Dolomit	10

Aby proces całego cyklu kompostowania przebiegał skutecznie, należy zachować odpowiednie podstawowe warunki sprzyjające temu procesowi. Są to:

- temperatura w granicach 50-60°C;
- wilgotność 40-50%;
- zapotrzebowanie na tlen ok. 1 m³ na kg kompostowanej masy;
- zalecana wartość pH = 6-7,5;
- rozdrobienie cząsteczek organicznych przyspieszające stopień rozkładu przez zwiększenie aktywności mikrobiologicznej.

Charakter zmiany temperatury masy kompostowanej w komorze pokazano na rysunku 6.10.



Rys. 6.10. Zmiana temperatury kompostu w komorach kompostowych (na głębokości 1,5 m) [opracowanie własne]

Skład ilościowy nawozu BIOKOM-2:

<u>Składnik</u>	<u>Proporcje objętościowe [%]</u>
Torf	50
Kora drzew iglastych	10
Kompost	30
Magnezyt	5

Skład fizyko-chemiczny kompostu po obróbce na płycie kompostowej przedstawiono poniżej w tabeli 6.2, zaś wyniki badań mikrobiologicznych kompostu w tabeli 6.3.

Tabela 6.2. Skład fizyko-chemiczny kompostu po obróbce na płycie kompostowej [badania własne]

Rodzaj oznaczenia	Zawartość
Wilgotność	68%
Substancja organiczna	18,5%
pH	5,7
N	1,48%
P ₂ O ₅	1,35%
K ₂ O	0,47%
CaO	0,89%
Mg	0,88%
Cu	11,70 ppm
Zn	82,9 ppm
Mn	96,4 ppm
Fe	3375,0 ppm
Pb	10,0 ppm
Cd	0,25 ppm
Ni	4,2 ppm
Cr	6,1 ppm

Tabela 6.3. Wyniki badań mikrobiologicznych kompostu [opracowanie własne]

Rodzaj oznaczenia	Wyniki oznaczeń
Miano bakterii z grupy Coli	10 ⁻³
Miano bakterii z grupy Coli typu kałowego	10 ⁻¹
Miano Clostridium perfringens	10 ⁻²
% bakterii przetrwalnikowych	19
Bakterie chorobotwórcze z rodzaju Salmonella	Nie wykryto
Obecność jaj Ascaris Cumbricoides lub Trichocephalus Trichuria	Nie wykryto
Miano w przeliczeniu wg normy PN-75/C-04615/05	
Miano bakterii z grupy Coli	0,04

Miano bakterii z grupy Coli typu kałowego	4,0
---	-----

W wyniku powyższych technologii, oprócz kompostu, powstaje odciek pofermentacyjny, którego ładunki zanieczyszczeń są znacznie zredukowane w stosunku do gnojowicy surowej. We wspomnianym gospodarstwie odciek jest stosowany do rolniczego nawożenia użytków zielonych w dogodnych warunkach agrotechnicznych.

Odpady z biogazowni rolniczej i mikrobiogazowni mogą być dobrym nawozem pod warunkiem, że będą prawidłowo zagospodarowane. Jednak nie zawsze istnieje taka możliwość. Wówczas pozostałość po procesie fermentacji staje się obciążeniem, a przechowywanie, wywóz, rozlewanie, wykonywanie analiz glebowych powoduje podniesienie kosztów działania biogazowni.

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Klimatu z 2 stycznia 2020 roku w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. 2020, poz. 10) masa powstająca po skończeniu procesu fermentacji metanowej w biogazowni znajduje się w katalogu odpadów pod nazwą „ciecz z beztlenowego rozkładu odpadów zwierzęcych i roślinnych” (19 06 05) lub „przefermentowane odpady z beztlenowego rozkładu odpadów zwierzęcych i roślinnych” (19 06 06). Ta ustawa zmusza inwestora do uzyskania pozwolenia na odzysk i wytwarzanie odpadów.

Stosowanie tych substratów do użyźniania gleby musi spełniać wiele wymogów, m.in.:

- jak dla komunalnych osadów ściekowych,
- odpady muszą być stosowane jednolicie na całej powierzchni gleby,
- rozpraszanie odpadów na powierzchni gleby musi odbywać się do głębokości 30 cm,
- odpady mają być stosowane na glebach, gdzie nie zostały przekroczone dopuszczalne stężenia substancji, określone w rozporządzeniu Ministra Środowiska z 9 września 2002 roku,
- odpady powinny być wykorzystywane w odpowiedni sposób a ich dawka wprowadzana do gleby, nie powinna powodować przekraczania dopuszczalnych wartości metali ciężkich w glebie (Cr, Pb, Cd, Hg, Ni, Zn, Cu) określonych w rozporządzeniu Ministra Środowiska z 1 sierpnia 2002 roku.

Szczegółowa kontrola substancji pofermentacyjnej obejmuje również zawartość suchej masy, azotu, materii organicznej (węgla), określenie stosunku C:N, obecność szkodliwych związków organicznych, zawartość składników pokarmowych i metali ciężkich oraz obecność patogenów. Dodatkowo próbki pofermentu podlegają badaniom określającym liczebności bakterii z rodzaju *Salmonella* i innych z rodziny *Enterobacteriaceae*.

Skład chemiczny substancji pofermentacyjnej (tabela 6.4) uzależniony jest od rodzaju substratów biorących udział w procesie. Większość biogazowni rolniczych wykorzystuje gnojowicę jako podstawowy substrat w produkcji biogazu.

Tabela 6.4. Wartość nawozowa gnojowicy i substancji pofermentacyjnej [Węglarzy, Podkówa 2010]

Substrat	Sucha masa [%]	Koncentracja składników (kg/m ³ świeżej masy)				pH
		N	N-NH ₄	P ₂ O ₅	K ₂ O	
Gnojowica	7,5	3,5	2,5	2,5	3,5	7,2

Substancja pofermentacyjna	6,3	4,4	2,6	1,9	5,0	8,5
-----------------------------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Jak wynika z danych przedstawionych w tabeli 6.4 substancja pofermentacyjna zawiera mniej suchej masy i związków fosforowych, a więcej azotu i potasu. W przeciwieństwie do gnojowicy nie zakwasza gleby.

Podczas rozkładu beztlenowego zachodzą duże zmiany w składzie chemicznym gnojowicy, m.in.:

- zostają usunięte związki węgla, które łatwo ulegają przemianom,
- następuje rozłożenie substancji koloidowych oraz śluzowych,
- związki azotu zostają przekształcone w azot amonowy,
- zostają zniszczone bakterie oraz wirusy chorobotwórcze,
- zmniejsza się ilość substancji, które zużywają tlen,
- zwiększa się ilość aminokwasów i zawartość witaminy B₁₂,
- reszta substancji biogennych (P, K, Na, Ca, Mg, mikroelementów) pozostaje bez większych zmian.

W trakcie fermentacji beztlenowej zmianie ulega stosunek węgla do azotu. Dodatkowo maleje zawartość substancji organicznej, co skutkuje wzrostem zawartości azotu oraz związków mineralnych. Poprzez aplikowanie na pole przefermentowanej gnojowicy poprawie ulegają warunki nawożenia pól uprawnych, ponieważ zawartości N-NH₄ wynosi nawet 90%, zaś w gnojowicy surowej około 48,8%. Azot zawarty w formie amonowej jest lepiej przyswajany przez rośliny. Równocześnie taka forma azotu jest mniej narażona na wymywanie do wód powierzchniowych i gruntowych, co skutkuje zmniejszeniem ryzyka eutrofizacji wód. W przypadku stosowania odpadów pochodzących z rzeźni istotne jest, aby poddawać je procesowi higienizacji, który eliminuje możliwość rozprzestrzeniania się mikroorganizmów chorobotwórczych mogących znajdować się w tych odpadach.

Stosowanie higienizacji i efektywnego procesu fermentacji beztlenowej zapewnia wytworzenie nawozu wolnego od patogenów oraz innych zagrożeń zdrowotnych. Taki nawóz w formie podstawowej jest płynny, jednorodny i łatwy w analizach pod kątem zawartości różnych składników. Podczas fermentacji większość organicznie związanego azotu zostaje zredukowana do wolnego azotu, który jest łatwo przyswajalny przez rośliny. Proces higienizacji zwiększa wydajność produkcji biogazu oraz minimalizuje utratę składników odżywczych podczas obróbki. Fermentacji metanowa odpadów zwierzęcych oraz innych odpadów, powoduje rozłożenie substancji wywołujących odór, dzięki czemu powstaje prawie całkowicie wolny od odoru nawóz, który można aplikować na pole, a zapach nie jest uciążliwy dla sąsiadów. Zostają też zniszczone nasiona chwastów. Niekorzystną cechą pofermentu jest jego wysokie uwodnienie. W zależności od wykorzystywanego substratu, zawartość wody w substancji pofermentacyjnej może wahać się od 90 do 97%. Wyjątkowo dużą zawartość wody ma poferment pozyskiwany z samej gnojowicy, bo aż 94%. Można to ograniczyć poprzez zagęszczenie pozostałości oraz separację azotu i fosforu lub poprzez odparowanie.

Wykorzystanie pofermentu z fermentacji gnojowicy, obornika, odpadów poubojowych i innych organicznych odpadów przemysłowych nie powoduje żadnych problemów. Poferment ma bardzo dobry wpływ na glebę, środowisko naturalne i opłacalność produkcji.

6.3. Magazynowanie pofermentu

W czwartym etapie przefermentowany substrat może być usuwany z fermentatora za pomocą odpływu przez przelew lub odciągany za pomocą pomp. Następnie jest on transportowany do zbiornika pofermentacyjnego, gdzie schładza się go i przechowuje do czasu wywozu. Na tym etapie możliwe jest oddzielenie frakcji płynnej od stałej. Poferment w stanie ciekłym magazynuje się tak samo, jak gnojowicę. W związku z tym zbiorniki do gnojowicy mogą być stosowane również do przechowywania masy pofermentacyjnej. W zbiornikach na poferment często stosuje się mieszadła, aby zapobiec tworzeniu się kożucha na powierzchni magazynowej. Spowodowane jest to zachodzeniem procesów sedymentacji, czyli rozwarstwiania. Masa pofermentacyjna może być magazynowana poniżej poziomu gruntu w lagunach lub w zbiornikach naziemnych. Najtańszym rozwiązaniem są otwarte laguny – fot. 6.6. Wadą takich lagun jest dostawanie się opadów atmosferycznych do zbiornika, które powiększają jego zawartość. Przy zastosowaniu zamkniętych lagun przykrytych membraną problemem mogą być opady deszczu i śniegu gromadzące się na zewnętrznej warstwie membrany.



Fot. 6.6. Odkryta laguna przy biogazowni [archiwum ITP-PIB]

Do naziemnych zbiorników magazynujących masę pofermentacyjną należą żelbetonowe zbiorniki (fot. 6.7), podobne do komór fermentacyjnych, które nie wymagają ocieplania i ogrzewania. Zbiorniki te mogą być otwarte lub zamknięte. W takich zbiornikach mogą być zamontowane mieszadła uniemożliwiające osadzanie się substancji pofermentacyjnej na dnie i powstawanie kożucha na powierzchni.



Fot. 6.7. Zbiornik żelbetonowy na poferment [www.inzynierbudownictwa.pl, 2022]

Frację stałą pofermentu można magazynować w hali albo na zewnątrz na szczelnej płycie magazynowej lub w silosie.

W piątej fazie biogaz jest magazynowany, uzdatniany a następnie wykorzystywany, ponieważ niemożliwe jest jego bezpośrednie wprowadzenie do systemu spalania. Zbiorniki magazynujące biogaz muszą spełniać wiele warunków, takich jak: szczelność, odporność na zmiany temperatury zewnętrznej, zmiany warunków atmosferycznych, odporność na promieniowanie UV. Najczęściej wykorzystywane są zbiorniki niskociśnieniowe, które pracują w zakresie nadciśnienia od 0,05 do 0,50 mBar. Zbiorniki średnio- i wysokociśnieniowe, w których można magazynować gaz pod ciśnieniem od 5 do 250 bar, są kosztowne dlatego nie stosuje się ich w agrobiogazowniach. W przypadku, gdy zbiorniki magazynujące nie są w stanie przyjąć większej ilości biogazu, jego nadmiar jest spalany w instalacji awaryjnej zwanej pochodnią lub świecą awaryjną. Biogaz wymaga uzdatnienia przed spalaniem w instalacji produkującej energię elektryczną i ciepłą. Polega to na odwodnieniu, odsiarczeniu gazu oraz usunięciu CO₂. Następnie może on być wykorzystywany jako paliwo do silników trakcyjnych, w produkcji metanolu czy w produkcji energii elektrycznej i ciepłej w jednostkach skojarzonych.

Okres przechowywania pofermentu na terenie biogazowni jest uwarunkowany przepisami. W związku z tym, już na etapie projektowania biogazowni jest niezbędne obliczenie ilości pofermentu powstającego w ciągu jednego miesiąca i zapewnienie właściwych warunków do przechowywania go przez okres 4-6 miesięcy. Złe oszacowanie wielkości zbiornika na poferment, może skutkować tym, że zabranie w nim miejsca na gromadzenie masy w czasie, gdy aplikacja na pola nie będzie możliwa ze względów technicznych lub prawnych.

6.4. Pozostałe możliwości zagospodarowania pofermentu

Masa pofermentacyjna jest drugim po biogazie produktem fermentacji metanowej. Jest ona źródłem składników mineralnych i energii, a nie tylko odpadem, dlatego należy ją odpowiednio wykorzystywać i wybrać odpowiednie kierunki jej zagospodarowania, z uwzględnieniem jej metod utylizacji w przypadku dużych ilości. Istnieje wiele metod zagospodarowania pofermentu, a wszystko zależy od jego składu, charakterystyki oraz jego lokalizacji. Wyróżnia się trzy podstawowe kierunki wykorzystania masy pofermentacyjnej:

rolniczo-nawozowy, energetyczny i technologiczny. Jedynie zagospodarowanie na cele rolniczo-nawozowe pozwala na wykorzystanie pofermentu bez obróbki, z zachowaniem wymagań odzysku R10. Pozostałe kierunki wymagają dalszego przetwarzania pofermentu. Można go wtedy poddawać separacji, suszeniu, brykietowaniu, peletyzacji, granulacji, kompostowaniu i obróbce termicznej.

W przypadku wykorzystywania pofermentu na cele energetyczne należy ustalić jego wartość energetyczną. Jest ona uzależniona od jego wilgotności, zawartości węgla i wodoru i wynosi od kilku do kilkunastu MJ/kg. Najczęściej wartość opałowa pofermentu jest niższa w porównaniu do innych paliw biomasowych. Spowodowane jest to tym, że w pofermencie zachodzi częściowy rozkład materii organicznej i wyodrębnienie palnych pierwiastków w postaci biometanu. Równocześnie ma też wyższą popiołu, co powoduje pogorszenie jakości biopaliwa. Przykładowo pelety z pofermentu o wilgotności 10% powstałe po fermentacji gnojowicy i odpadów z przemysłu rolno-spożywczego cechują się wartością opałową 11,3 MJ/kg, a zawartość popiołu wynosiła 37,5%.

Brykietowanie i peletyzacja

Poferment na cele energetyczne można tak zagęścić pod mniejszym ciśnieniem co umożliwi uzyskanie postaci brykietów. Zagęszczenie pofermentu pozwala na ujednoczenie przetwarzanego materiału pod względem granulacji i właściwości mechanicznych oraz składu chemicznego. Poza tym, brykiety i pelety z suchej frakcji pofermentu stanowią łatwy do transportu surowiec.

Obróbka termiczna masy pofermentacyjnej (toryfikacja, piroliza, zagazowywanie)

Zagazowanie i piroliza to procesy termochemiczne polegające na rozkładzie materii organicznej pod wpływem wysokich temperatur, a następnie spalaniu gazów powstałych podczas tego rozkładu (gaz drzewny, syngaz, gaz pirolityczny). Dodatkowo w procesie pirolizy powstaje jeszcze biowęgiel. Może być on wykorzystywany jako paliwo stałe, substancja wzbogacająca glebę lub element sekwestracji węgla. Piroliza prowadzona w temperaturze ok. 200-300°C nazywana jest toryfikacją. Proces ten pozwala na uzyskanie biowęgla (karbonizatu), który może być wykorzystywany np. do nawożenia.

6.5. Metody aplikacji pofermentu

Poferment, który został uzdatniony metodą odzysku R10 można aplikować na powierzchnie gleby za pomocą wielu technik. W zależności od metod przetwarzania masy pofermentacyjnej, typów nawożonych upraw, terminu nawożenia, stosuje się inną technikę. W przypadku rozwożenia osadu pofermentacyjnego po separacji, obie frakcje służą jako nawóz. Należy wtedy zastosować dwa rodzaje maszyn rolniczych: wóz asenizacyjny lub deszczownicy do rozlewania frakcji ciekłej oraz rozrzutniki nawozów do frakcji stałej. Jeżeli w pofermencie jest poniżej 5% suchej masy można stosować deszczownice. Dodatkowo masę pofermentacyjną można rozcieńczyć wodą, co daje efekt nawożenia i nawadniania upraw.

Najpopularniejszą techniką aplikacji pofermentu jest rozwożenie go za pomocą wozów asenizacyjnych – fot. 6.8. Urządzenia te są przystosowane do pobierania, transportu oraz rozprowadzania substancji ciekłych. Występują wozy asenizacyjne samojezdne lub przyłączane do ciągnika rolniczego. Najważniejszym elementem wozu asenizacyjnego jest cysterna metalowa lub z tworzywa sztucznego.



Fot. 6.8. Wóz asenizacyjny z aplikatorem w postaci ramion umieszczonych na rampie
[www.joskin.com, 2022]

Dostępne są różne pojemności beczkowozów mieszczących 2000-3000 litrów do maszyn po pojemności od 25000-30000 litrów. Do napełniania wozów asenizacyjnych najczęściej stosuje się zintegrowane pompy napędzane z wału odbioru mocy ciągnika lub hydraulicznie. Dodatkowo taka pompa służy do opróżnienia zbiornika na polu. W celu efektywnego wykorzystania maszyn i pracowników można zastosować systemy umożliwiające podłączenie beczkowozu do zbiornika z pofermentem bez wychodzenia z ciągnika.

Najpopularniejszą w Polsce metodą rozlewania nawozów polega na użyciu płytki rozbryzkowej. Umożliwia ona rozlanie masy pofermentacyjnej na szerokości do około 16 metrów, a przy zastosowaniu rampy z dwoma dyszami (lub więcej) nawet do 24 metrów. Wadą takiego rozwiązania jest: mała dokładność, wrażliwość na warunki atmosferyczne, zwiększona emisja odorów z rozlewanej substancji. Rampy z wieloma dyszami ograniczają rozwiewanie substancji podczas rozprowadzania.

Innym rodzajem aplikatora jest rampa, na której zamontowane są węże wleczone. Taki system pobiera masę pofermentacyjną ze zbiornika za pomocą pojedynczej rury, która trafia do rozdzielacza. Następnie pod ciśnieniem kierowana jest do każdego z węży wylotowych, które zapewniają równomierne rozprowadzenie. Ciągnięcie węży za wozem ogranicza kontakt pofermentu z powietrzem, a co za tym idzie zmniejsza ryzyko strat amoniaku i emisji odorów. Istnieją również systemy umożliwiające aplikację masy pofermentacyjnej bezpośrednio do gleby – fot. 6.9. Oprócz systemu węży takie aplikatory wyposażone są w elementy robocze, takie jak: redlice, lemiesz lub talerze zruszające glebę. Na użytkach zielonych stosuje się aplikatory płozowe lub talerzowe, które umożliwiają aplikację rozlewanej cieczy na niewielkiej głębokości (do kilku centymetrów). Aplikatory doglebowe są najczęściej zintegrowane z kultywatorem. Zastosowanie takiego typu systemu umożliwia łatwe zmieszanie gleby z pofermentem.



Fot. 6.9. Aplikator doglebowy z kultywátorem [www.pichonindustries.fr/pl, 2022]

6.6. Właściwości fizyko-chemiczne pofermentu

Substancja pofermentacyjna to nieprzefermentowane związki organiczne, składniki mineralne oraz biomasa bakterii metanowych, które pozostały po procesie fermentacji metanowej. nazywana jest też pofermentem, pozostałością fermentacyjną, pulpą pofermentacyjną, odciekiem lub ściekiem pofermentacyjnym. skład pofermentu uzależniony jest w szczególności od substratów biorących udział w procesie fermentacji beztlenowej.

Po fermentacji beztlenowej masa pofermentacyjna kierowana jest z komory fermentacyjnej do zbiorników składujących odpady pofermentacyjne (np. baseny na gnojowice). Tam poferment jest przechowywany i schładzany. Pojemność zbiorników do magazynowania pofermentu powinna być tak dobrana, aby można było przechowywać go do czasu wywiezienia na pole uprawne. W zależności od pory roku substancje pofermentacyjną można przechowywać nawet sześć miesięcy. Zbiorniki mogą być zamykane gazoszczelnym przykryciem. Substancja organiczna nie ulega całkowitemu rozkładowi w fermentatorze i procesy fermentacji metanowej przebiegają dalej także w zbiornikach magazynujących poferment. W taki sposób można dodatkowo pozyskać nawet 20% całkowitej produkcji dodatkowego biogazu. Zakryte zbiorniki ograniczają również emisje odorów do otoczenia.

Ze względu na niską zawartość suchej masy w pofermencie (3-10%) obecnie częstym zjawiskiem jest separacja masy pofermentacyjnej na frakcję płynną i stałą, co przyczynia się do zmniejszania objętości masy pofermentacyjnej. Frakcja stała przed wykorzystaniem może być składowana oraz kompostowana zaś frakcja płynna może być rozlewana jako nawóz lub zwracana do komory fermentacyjnej jako ciecz technologiczna i wykorzystywana do rozcieńczania substratów. Do rozdzielenia obu frakcji stosuje się taśmowe prasy filtracyjne (odwadniające) lub wirówki. Frakcja stała po przepuszczeniu przez prasę filtracyjną może zawierać nawet ok. 30% suchej masy. W takiej postaci można aplikować ją na pola uprawne i użytki zielone.

Frakcja stała i ciekła w masie pofermentacyjnej powstaje podczas różnych etapów fermentacji metanowej. Różnią się one właściwościami fizyko-chemicznymi. W trakcie octanogenezy

powstaje frakcja stała, w której skład wchodzi celuloza i lignina. Ich zawartość we frakcji stałej powoduje, że posiada ona duże zdolności pochłaniania wody. Dodatkowo zawiera duże ilości związków mineralnych. Stosowanie tej frakcji zwiększa pojemność wodną gleb oraz zawartość materii organicznej. W trakcie metanogenezy powstaje frakcja ciekła, która zawiera duże ilości rozpuszczalnych form azotu, fosforu i potasu. Podczas obliczania maksymalnej ilości frakcji ciekłej zwracanej do komory trzeba wziąć pod uwagę potas, który głównie znajduje się w tej frakcji, aby nie doprowadzić do jego kumulacji do poziomu, w którym będzie on hamować proces fermentacji.

W tabeli 6.5 zostały przedstawione właściwości chemiczne pofermentu uzyskanego w wyniku fermentacji metanowej gnojowicy z uwzględnieniem podziału na frakcje. Przedstawione wyniki doświadczeń laboratoryjnych wskazują na to, że masa pofermentacyjna w porównaniu z gnojowicą wykorzystaną jako materiał wyjściowy zawiera praktycznie takie same ilości N, K, Al, Fe, Cu i Zn. Ubytki fosforu wynosiły 36%, wapnia 44%, a magnezu 32,5%.

Tabela 6.5. Właściwości chemiczne masy pofermentacyjnej uzyskanej po fermentacji gnojowicy [Szymańska 2011, Marcato i wsp. 2008]

Wyszczególnienie	Masa pofermentacyjna		
	Przefermentowana gnojowica przed rozdzieleniem na frakcje	Frakcja ciekła	Frakcja stała
Sucha masa [%]	1,6	1,5	32,6
Azot ogólny [% ś.m.]	0,28	0,26	1,77
N-NH ₄ ⁺ [% ś.m.]	0,23	0,22	0,28
Fosfor ogólny [g/kg s.m.]	31,5	24,9	43,8
Potas ogólny [g/kg s.m.]	65,5	72,3	4,1
Ca [g/kg s.m.]	47,2	39,0	96,1
Mg [g/kg s.m.]	15,9	12,1	6,8
S [g/kg s.m.]	11,1	10,8	6,8
Fe [g/kg s.m.]	4,0	4,3	4,1

Al [mg/kg s.m.]	1641	998	760
Cu [mg/kg s.m.]	1016	1001	170
Mn [mg/kg s.m.]	708	610	1042
Zn [mg/kg s.m.]	2628	2563	519

Masę pofermentacyjną można również uzdatniać. Do metod uzdatniania zalecanych przy magazynowaniu pofermentu zaleca się kompostowanie, które powoduje rozkład materii organicznej. W wyniku takiego rozkładu następuje zmniejszenie stosunku węgla do azotu. Rozpoczęcie kompostowania odbywa się przy stosunku C:N wynoszącym ok. 20-30:1. Przy węższym stosunku proces ten nie zachodzi. Inną metodą zagospodarowania pofermentu jest produkcja na jego bazie granulatu. Granulat można produkować z frakcji stałej i z kompostów, jednak materiały te należy dosuszyć do około 80% suchej masy.

W zależności od rodzaju substratów biorących udział w procesie fermentacji beztlenowej skład chemiczny pofermentu jest zróżnicowany (tab. 6.6, 6.7). Większość biogazowni i mikrobiogazowni jako podstawowy substrat do produkcji biogazu wykorzystuje gnojowice lub kizzonkę z kukurydzy. Na podstawie analizy reakcji, które zachodzą podczas fermentacji metanowej można ogólnie określić właściwości fizyko-chemiczne pofermentu, czyli również jego wartość nawozową. Istotne w określeniu takiej wartości są m.in. następujące właściwości: zawartość węgla (C), azotu (N), fosforu (P), potasu (K), stosunek C:N, a także pH i zawartość mikroelementów (w tym metali ciężkich).

Tabela 6.6. Charakterystyka chemiczna mas pofermentacyjnych [Szymańska 2013; Alborquerque i in. 2012]

Symbol pofermentu	pH	s.m. (g/l)	Azot ogólny (g/l)	NH₄-N (g/l)	P (g/l)	K (g/l)
PS-EC1	7,82	43,9	3,6	2,9	1,1	3,1
PS-EC2	7,92	38,3	3,5	2,6	1,1	3,1
PS-EC3	7,9	28,3	3,4	2,7	1,2	2,7
PS-AB1	7,95	21	2,9	2,2	0,5	2,2
PS-AB2	7,86	29,5	4,9	3,4	0,8	3,1
PS-AB3	8,2	19,5	4	3,5	0,2	2
Średnia	7,91	28,9	3,6	2,8	0,9	2,9
CS-G1	5,64	28,9	1,9	1	0,5	1,8

CS-G2	7,35	38,3	2,3	0,9	0,4	1,6
CS-G3	6,35	72,9	0,6	0,4	0,1	0,8
CS-AW1	7,86	17,6	1,4	0,8	0,2	1,1
CS-AW2	7,9	90,1	1,5	0,9	0,2	1,2
CSAW3	7,5	31,4	4	2,4	0,8	3,1
Średnia	7,42	31,4	1,7	0,9	0,3	1,4

gdzie:

- 1) Grupa 1: gnojowica świńska + dodatek roślin energetycznych
 - PS-EC1 – gnojowica świńska + pozostałości rzepaku (9,6%),
 - PS-EC2 – gnojowica świńska + pozostałości słonecznika (4,5%),
 - PS-EC3 – gnojowica świńska + pozostałości kukurydzy (5,4%).
- 2) Grupa 2: gnojowica świńska + odpady zwierzęce
 - PS-AB1 – gnojowica świńska+ pasteryzowane odpady z rzeźni (0,6%),
 - PS-AB2 – gnojowica świńska + pasteryzowane odpady z rzeźni (3,8%),
 - PS-AB3 – gnojowica świńska + osad z oczyszczalni ścieków z ubojni (1%) + ścieki po biodieslu (6,5%).
- 3) Grupa 3: gnojowica bydlęca + dodatek gliceryny
 - CS-G1 – gnojowica bydlęca + gliceryna (4%),
 - CS-G2 i CS-G3 – gnojowica bydlęca + gliceryna (6%).
- 4) Grupa 4: gnojowica bydlęca + dodatek pozostałości z przemysłu rolno-przemysłowego
 - CS-AW1 – gnojowica bydlęca + pozostałości skórki z pomarańczy (5%),
 - CS-AW2 – gnojowica bydlęca + pozostałości skórki z pomarańczy (10%),
 - CS-AW3 – gnojowica bydlęca + gnojówka bydlęca (4,3%) + kiszonka z owsa i kukurydzy (11,6%).

Tabela 6.7. Charakterystyka chemiczna mas pofermentacyjnych [Szymańska 2013; Alborquerque i in. 2012]

Symbol pofermentu	Ca [mg/l]	Mg [mg/l]	Na [mg/l]	Zn [mg/l]	Cu [mg/l]
PS-EC1	1993	633	666	49,2	8,4
PS-EC2	1970	721	699	45,9	7
PS-EC3	1863	698	697	62,5	7,8
PS-AB1	799	324	696	84,4	14,3
PS-AB2	828	365	995	140,2	15,1
PS-AB3	218	67	726	34,7	4
Średnia	1345	499	698	55,8	8,1
CS-G1	1550	267	1164	18,1	10,8

CS-G2	1735	333	1842	28,3	13
CS-G3	192	79	66	10,6	1,4
CS-AW1	1008	257	276	7,7	2,8
CS-AW2	1035	314	303	8	3,1
CSAW3	4026	698	746	27,7	10,8
Średnia	1293	290	525	14,4	6,9

gdzie:

- 1) Grupa 1: gnojowica świńska + dodatek roślin energetycznych
 - PS-EC1 – gnojowica świńska + pozostałości rzepaku (9,6%),
 - PS-EC2 – gnojowica świńska + pozostałości słonecznika (4,5%),
 - PS-EC3 – gnojowica świńska + pozostałości kukurydzy (5,4%).
- 2) Grupa 2: gnojowica świńska + odpady zwierzęce
 - PS-AB1 – gnojowica świńska+ pasteryzowane odpady z rzeźni (0,6%),
 - PS-AB2 – gnojowica świńska + pasteryzowane odpady z rzeźni (3,8%),
 - PS-AB3 – gnojowica świńska + osad z oczyszczalni ścieków z ubojni (1%) + ścieki po biodieslu (6,5%).
- 3) Grupa 3: gnojowica bydlęca + dodatek gliceryny
 - CS-G1 – gnojowica bydlęca + gliceryna (4%),
 - CS-G2 i CS-G3 – gnojowica bydlęca + gliceryna (6%).
- 4) Grupa 4: gnojowica bydlęca + dodatek pozostałości z przemysłu rolno-przemysłowego
 - CS-AW1 – gnojowica bydlęca + pozostałości skórki z pomarańczy (5%),
 - CS-AW2 – gnojowica bydlęca + pozostałości skórki z pomarańczy (10%),
 - CS-AW3 – gnojowica bydlęca + gnojówka bydlęca (4,3%) + kiszonka z owsa i kukurydzy (11,6%).

Podczas wytwarzania biogazu zachodzą zmiany w składzie chemicznym substratów – tabela 6.8. Zmianie ulega stosunek węgla do azotu (C:N). Spowodowane jest to tym, że jest on wykorzystywany do produkcji metanu. W surowej gnojowicy stosunek węgla do azotu wynosi 6,8:1,0, a w pofermencie wynosi ok. 25,0-30,0:1,0. Taki stosunek C:N w masie pofermentacyjnej spowodowany jest tym, że dochodzi do rozkładu związków organicznych oraz wytwarzany jest metan. W takich warunkach proces immobilizacji azotu w glebie jest ograniczony, co powoduje zwiększenie dostępności azotu dla roślin oraz poferment jest również podatny na mineralizację pozostałych związków organicznych.

Tabela 6.8. Porównanie składu chemicznego nawozów naturalnych z pofermentem [Baran i in. 2010, Kowalczyk-Juśko, Szymańska 2015, Węglarzy 2010]

Substrat	Sucha masa [%]	Zawartość składników [g·kg ⁻¹ świeżej masy]			pH
		N	P	K	
Obornik	21-24	4,6	2,7-4,4	6,5-6,7	8-8,5

Gnojówka	3-5	1,2-3,5	0,1-0,2	2,8-8,0	7,5-9,0
Gnojowica	5-9,5				
Poferment	4-7	3,0-5,0	1,0-1,5	3,5-5,5	8,5

Według danych zamieszczonych w tabeli 6.8 można stwierdzić, że poferment ma dużą zawartość fosforu (P) i potasu (K). Dodatkowo, fosfor zawarty w masie pofermentacyjnej jest w formie łatwo przyswajalnej dla roślin. Ponadto masa pofermentacyjna charakteryzuje się dużą zawartością azotu w porównaniu z innymi nawozami naturalnymi. Jest to efektem koncentracji azotu podczas fermentacji metanowej w wyniku przemiany węgla w CO₂ i CH₄. Zachodzący w trakcie fermentacji rozkład związków organicznych powoduje, że zawarte w pofermencie makro- i mikroelementy występują w formach mineralnych, które są bezpośrednio dostępne dla roślin. Przez te zmiany dochodzi do zwiększenia efektywności wykorzystania składników pokarmowych z zaaplikowanej na pole masy pofermentacyjnej. Zachodząca podczas fermentacji amonifikacja powoduje, że w pofermencie zwiększa się ilość azotu w formie amonowej (N-NH₄). Udział N-NH₄ w zawartości azotu ogólnego (N_{og}) w pofermencie może wynosić nawet 90%, zaś w gnojowicy surowej około 48%. Azot w formie amonowej jest lepiej przyswajany przez rośliny. Ulega również sorpcji wymiennej w glebie oraz nie jest wymywany do wód powierzchniowych i gruntowych jak azot azotanowy (N-NO₃), dzięki czemu zmniejszeniu ulega ryzyko eutrofizacji wód. Jednak azot amonowy może przyczyniać się do zakwaszania gleby poprzez jej nitryfikację. Przy dużej zawartości azotu w formie amonowej i pH powyżej 7, azot może ulatniać się w postaci amoniaku. Amoniak może ulatniać się podczas składowania oraz stosowania na polu, dlatego też ważne jest szybkie przykrycie glebą zastosowanego na pole pofermentu.

W substratach do biogazowni występują również metale ciężkie. Pochodzą one głównie ze źródeł antropogenicznych i nie ulegają rozkładowi podczas fermentacji metanowej. Ich głównymi źródłami są dodatki do pasz zwierzęcych, odpady z przemysłu spożywczego, osad flotacyjny, pozostałości tłuszczu i ścieki domowe. Dzieli się je na dwie grupy:

- Metale ciężkie niezbędne do prawidłowego funkcjonowania organizmów żywych roślin, zwierząt oraz ludzi (w śladowych ilościach): miedź (Cu), Nikiel (Ni), cynk (Zn).
- Metale ciężkie – pierwiastki toksyczne: kadm (Cd), chrom (Cr), rtęć (Hg), ołów (Pb).

W tabeli 6.9. przedstawiono przykładowe zawartości metali ciężkich w masie pofermentacyjnej.

Tabela 6.9. Zawartość metali ciężkich w pofermencie ciekłym [Bartkowiak i in. 2017]

Nazwa	Zawartość [mg·kg⁻¹ suchej masy]
Chrom (Cr)	5,6-25
Nikiel (Ni)	3,6-17
Ołów (Pb)	3,4-21
Kadm (Cd)	0,34-1,40
Cynk (Zn)	180-860
Miedź (Cu)	32-140

W trakcie fermentacji metanowej w składzie chemicznym gnojowicy zachodzi wiele zmian. Zostają usunięte związki węgla, które mogą łatwo ulegać przemianom. Następuje również rozłożenie substancji koloidowych oraz śluzowych a związki azotu zostają przekształcone w azot amonowy. Beztlenowy rozkład powoduje zniszczenie bakterii oraz wirusów chorobotwórczych. Może też zwiększać się ilość aminokwasów i witaminy np. B₁₂. Reszta substancji biogennych takich, jak P, K, Na, Ca, Mg i mikroelementów, pozostaje bez większych zmian.

Higienizacja i stosowanie efektywnego procesu fermentacji metanowej zapewnia wytwarzanie nawozu wolnego od patogenów oraz innych zagrożeń zdrowotnych. Powstały nawóz jest płynny, jednorodny oraz łatwy w analizach pod kątem zawartości różnych składników. Fermentacja beztlenowa odchodów zwierzęcych oraz innych odpadów przyczynia się do rozłożenia substancji wywołujących odór i powoduje powstawanie prawie całkowicie wolnego od odoru nawozu, który można zaaplikować na pole a zapach nie jest uciążliwy dla okolicznych mieszkańców. Podczas fermentacji zostają też zniszczone nasiona chwastów. Wadą pofermentu jest jego wysokie uwodnienie. Zawartość wody, w zależności od wykorzystanego substratu, może wahać się od 90 do 97%. Substancja pofermentacyjna uzyskana z samej gnojowicy ma wyjątkowo dużą zawartość wody – aż 94%. Ilość wody można ograniczać poprzez zagęszczanie pozostałości, separację lub poprzez odparowanie.

Nawozowe wykorzystywanie pofermentu pochodzącego z fermentacji gnojowicy, obornika, biomasy i innych organicznych produktów ubocznych przemysłu rolnego ma bardzo dobry wpływ na właściwości fizyko-chemiczne gleb, środowisko naturalne oraz opłacalność produkcji. Za stosowaniem pofermentu przemawia wiele argumentów. Jednym z nich jest rodzaj i jakość polskich gleb. W Polsce dominują gleby lekkie o niskim pH (gleby kwaśne i silnie kwaśne). Takie gleby charakteryzują się niską sorpcją składników pokarmowych i małą retencją wodną, dlatego wymagają dostarczenia materii organicznej, która pozytywnie wpłynie na parametry decydujące o wielkości uzyskiwanych plonów. Masę pofermentacyjną można również wzbogacać poprzez dodawanie makro- lub mikroelementów, tworząc nawozy organiczno-mineralne, które mogą być dostosowane do wymagań różnorodnych roślin.

6.7. Wymagania dotyczące zagospodarowania masy pofermentacyjnej i aktualny stan prawny

Rozporządzenie z dnia 2 stycznia 2020 roku w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. 2020, poz. 10) określa, że masa, która powstaje po skończeniu procesu fermentacji beztlenowej zachodzącej w biogazowni, znajduje się w katalogu odpadów pod nazwą „przefermentowane odpady z beztlenowego rozkładu odpadów zwierzęcych” o kodzie 19 06 06. W przypadku zastosowania separacji pofermentu na frakcję ciekłą i stałą, frakcja ciekła określana jest jako „ciecze z beztlenowego rozkładu odpadów zwierzęcych i roślinnych” o kodzie 19 06 05, a frakcja stała jako 19 06 06. W związku z tym inwestor musi uzyskać pozwolenie na odzysk i wytwarzanie odpadów oraz uregulować stan formalno-prawny wytwarzania i przetwarzania odpadów zgodnie z ustawą z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach (Dz.U. z 2022 r. poz. 699, 1250, 1726, 2127, 2722 z późn. zm). W myśl tej ustawy posiadacz odpadów jest obowiązany do uzyskania zezwolenia na zbieranie odpadów lub zezwolenia na przetwarzanie odpadów, pozwolenia na wytwarzanie odpadów uwzględniającego zbieranie lub przetwarzanie odpadów lub pozwolenia zintegrowanego uwzględniającego zbieranie lub przetwarzanie odpadów, prowadzący magazynowanie odpadów, z wyjątkiem wstępnego magazynowania

odpadów przez ich wytwórcę lub zarządzający składowiskiem odpadów jest obowiązany do prowadzenia wizyjnego systemu kontroli miejsca magazynowania lub składowania odpadów (zgodnie z ust. 6b–6f, 6h i 6i oraz przepisami wydanymi na podstawie ust. 8a).

W myśl tej ustawy masa pofermentacyjna jest odpadem, ale według ustawy z dnia 10 lipca 2007 r. istnieje też druga możliwość wykorzystania pofermentu - jako nawozu organicznego lub organicznego środka poprawiającego właściwości gleby. Ustawa ta określa, że poferment być wykorzystywany na użytek własny lub podlegać obrotowi handlowemu (czyli zbywania odpłatnego lub nieodpłatnego pofermentu podmiotom trzecim) po złożeniu wniosku i uzyskaniu pozwolenia ministra właściwego do spraw rolnictwa (art. 2, ust. 1, pkt. 13 oraz art. 4 ust. 2 ustawy o nawozach i nawożeniu). Po uzyskaniu pozwolenia poferment wytwarzany jako odpad (o kodach 19 06 05 i 19 06 06) traci status odpadu (art. 14 ustawy z dnia 14 grudnia 2012 o odpadach (Dz.U. z 2022 r. poz. 699)).

Poferment może być poddawany procesowi unieszkodliwiania, jednak zalecane jest przeprowadzanie procesu odzysku. Jako odzysk zgodnie z ustawą o odpadach określa się „jakikolwiek proces, którego głównym wynikiem jest to, aby odpady służyły użytecznemu zastosowaniu przez zastąpienie innych materiałów, które w przeciwnym wypadku zostałyby użyte do spełnienia danej funkcji, lub w wyniku którego odpady są przygotowywane do spełnienia takiej funkcji w danym zakładzie lub ogólnie w gospodarstwie”. Metody odzysku w przypadku substancji organicznej to:

- Proces R3 – „recykling lub odzysk substancji organicznych, które są stosowane jako rozpuszczalniki (w tym kompostownie i inne biologiczne procesy przekształcania)”,
- Proces R10 – „obróbka na powierzchni ziemi przynosząca korzyści dla rolnictwa lub poprawę stanu środowiska”.

Najczęściej stosowanym sposobem zagospodarowania pofermentu jest odzysk metodą R10. Zgodnie z Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 roku w sprawie procesu odzysku R10 (Dz. U. 2015, poz. 132), proces ten umożliwia odzyskiwanie masy pofermentacyjnej metodą R10. Ciecze z beztlenowego rozkładu odpadów zwierzęcych i roślinnych mają kod 19 06 05, natomiast przefermentowane odpady z beztlenowego rozkładu odpadów zwierzęcych i roślinnych mają kod 19 06 06.

Odpady o kodach 19 06 05 i 19 06 06, aby zostały zastosowane do użyźniania gleby muszą spełnić wiele wymogów:

1. Jeżeli w procesie beztlenowego rozkładu przetwarzane były między innymi odpady, powstałe odpady mogą być stosowane tylko przy łącznym spełnieniu następujących warunków:

a) w odniesieniu do odpadów:

- są spełnione wymagania jak dla nawozów określone w przepisach ustawy z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu oraz wymagania dotyczące dopuszczalnych wartości zanieczyszczeń określonych dla nawozów (art. 10 pkt 5 i art. 11 pkt 5 tej ustawy),
- materiał po procesie fermentacji produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego spełnia wymagania określone w przepisach rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 z dnia 21 października 2009 r. określającego przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi i uchylającego rozporządzenie (WE) nr 1774/2002 (rozporządzenie o produktach ubocznych pochodzenia zwierzęcego),

b) w odniesieniu do gleb, na których odpady mają być stosowane:

- ilość metali ciężkich w wierzchniej warstwie gruntu (do głębokości 0–25 cm) nie przekracza wartości dopuszczalnych określonych dla stosowania komunalnych osadów ściekowych w przepisach wydanych na podstawie art. 96 ust. 13 ustawy z dnia 14 grudnia 2012 r. o odpadach,
- odpady są stosowane w taki sposób i w takiej ilości, aby ich stosowanie nie spowodowało pogorszenia jakości gleby, ziemi oraz wód powierzchniowych i podziemnych nawet przy długotrwałym stosowaniu, w szczególności nie spowodowało szkody w środowisku w rozumieniu przepisów ustawy z dnia 13 kwietnia 2007 r. o zapobieganiu szkodom w środowisku i ich naprawie,
- są spełnione wymagania dotyczące szczegółowego sposobu stosowania nawozów określone w przepisach wydanych na podstawie art. 22 pkt 1 ustawy z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu,
- odpady są stosowane równomiernie na powierzchni gleby do głębokości 30 cm i są przykryte glebą lub są z nią wymieszane – przy czym posiadacz odpadów dysponuje wynikami badań potwierdzającymi jakość odpadów i jakość gleb, na których odpady mają być stosowane, wykonanych przez laboratorium, o którym mowa w art. 147a ust. 1 pkt 1 lub ust. 1a ustawy z dnia 27 kwietnia 2001 r. – Prawo ochrony środowiska

2. Jeżeli w procesie beztlenowego rozkładu przetwarzane były wyłącznie biomasa, o której mowa w art. 2 pkt 6 ustawy z dnia 14 grudnia 2014 r. o odpadach, lub produkty uboczne pochodzenia zwierzęcego, o których mowa w art. 2 pkt 9 tej ustawy, bez dodatku odpadów, powstałe odpady mogą być stosowane tylko przy łącznym spełnieniu następujących warunków:

a) materiał po procesie fermentacji produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego spełnia wymagania określone w przepisach rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 z dnia 21 października 2009 r. określającego przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego, nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi i uchylającego rozporządzenie (WE) nr 1774/2002 (rozporządzenie o produktach ubocznych pochodzenia zwierzęcego);

b) są spełnione wymagania jak dla nawozów naturalnych określone w przepisach ustawy z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu oraz wymagania dotyczące dopuszczalnych wartości zanieczyszczeń określonych dla nawozów w przepisach wydanych na podstawie art. 10 pkt 5 i art. 11 pkt 5 tej ustawy, a także są spełnione wymagania dotyczące szczegółowego sposobu stosowania nawozów określone w przepisach wydanych na podstawie art. 22 pkt 1 tej ustawy;

c) odpady są stosowane równomiernie na powierzchni gleby do głębokości 30 cm

Masa pofermentacyjna powinna być stosowana w takich dawkach, aby nie spowodować przekroczenia dopuszczalnych wartości metali ciężkich w glebie (Cr, Pb, Zn, Hg, Cu, Cd, Ni) określonych w rozporządzeniu Ministra Środowiska z 6 lutego 2015 roku w sprawie komunalnych osadów ściekowych, nawet przy długotrwałym stosowaniu. Dodatkowo musi spełniać zasady dla nawozów naturalnych określonych w ustawie z dnia 10 lipca 2007 roku o nawozach i nawożeniu. W przypadku stosowania ubocznych produktów pochodzenia zwierzęcego (uppz) do produkcji biogazu wymagane jest objęcie nadzorem przez Powiatowego Lekarza Weterynarii właściwego terytorialnie dla miejsca prowadzenia działalności. Biogazownia przetwarzająca takie produkty podlega zatwierdzeniu w myśl art. 24 rozporządzenia Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 z dnia 21 października 2009 roku określającego przepisy sanitarne dotyczące produktów ubocznych pochodzenia zwierzęcego nieprzeznaczonych do spożycia przez ludzi, i uchylające rozporządzenie (WE) nr

1774/2002 (rozporządzenie o produktach ubocznych pochodzenia zwierzęcego), które uzyskuje jedynie po spełnieniu wymogów określonych w rozporządzeniu 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. Warunki jakie muszą spełniać biogazownie przekształcające uboczne produkty pochodzenia zwierzęcego i produkty pochodne zawarte są w załączniku V rozporządzenia (UE) nr 142/2011 i określają m.in. w jakich przypadkach są wymagane urządzenia do pasteryzacji lub oczyszczania wyposażone w instalacje oraz systemy do monitorowania i rejestracji temperatury, a także wskazują odległość w jakiej musi znajdować się biogazownia od miejsc utrzymywania zwierząt, aby wykluczyć zagrożenie przenoszenia chorób zakaźnych, w przypadku gdy nie wykorzystuje ona tylko i wyłącznie obornika, mleka lub siary pochodzących od tych zwierząt. Co więcej, w każdym przypadku konieczne jest zapewnienie całkowitego, fizycznego oddzielenia wytwórni biogazu od zwierząt, ich paszy i ściółki, w razie potrzeby również za pomocą ogrodzenia. Wymogi higieniczne dotyczące wytwórni biogazu określone w rozdziale II załącznika, odnoszą się do warunków jakie musi spełnić podmiot w zakresie: procedur i dokumentacji dotyczącej czyszczenia pomieszczeń zakładu, mycia i odkażania pojemników, kontenerów i pojazdów służących do przewożenia nieprzetworzonego materiału, regularnej kalibracji urządzeń, utrzymywaniu instalacji w dobrym stanie technicznym, a także wdrożenia i dokumentowania programu zwalczania szkodników (szczurów, ptaków, owadów i innych). Ponadto, wskazane wymogi higieniczne w zakresie środowiska i wyposażenia muszą być ujęte w harmonogramie i kontrolowane przez podmiot, a wyniki tych inspekcji udokumentowane. Produkty uboczne pochodzenia zwierzęcego należy przekształcać jak najszybciej po ich przybyciu do biogazowni lub odpowiednio przechowywać do momentu rozpoczęcia obróbki, w celu wyeliminowania ewentualnego zagrożenia.

W zakresie przekształcania ubocznych produktów pochodzenia zwierzęcego w biogaz, dopuszczalne są parametry, szczegółowo określone w sekcji 1, pkt 1 rozdziału III załącznika, odnoszące się m.in. do maksymalnej wielkości cząstek wprowadzanych surowców, minimalnej temperatury materiału czy minimalnego czasu obróbki. Ponadto, właściwy organ może zezwolić na stosowanie alternatywnych parametrów przekształcania, pod warunkiem, że wnioskujący o stosowanie takich parametrów wykaże, iż zapewniają one odpowiednie ograniczenie zagrożenia biologicznego, i spełni wymogi wskazane w sekcji 2, rozdziału III załącznika w zakresie niezbędnej walidacji lub innych wymogów gwarantujących uzyskanie równoważnego skutku dotyczącego zmniejszenia ilości czynników chorobotwórczych w odniesieniu do poszczególnych materiałów. Szczegóły dotyczące właściwych parametrów procesu wykorzystywanych w wytwórni biogazu, a także innych krytycznych punktów kontroli, muszą być rejestrowane i przechowywane, tak umożliwiło to monitorowanie działalności zakładu, a dokumentację w tym zakresie należy udostępniać na żądanie właściwego organu. Ponadto, informacje dotyczące procesu dozwolonego w ramach alternatywnych parametrów przekształcania muszą być udostępniane na żądanie Komisji Europejskiej.

Czynności wykonywane na pozostałościach fermentacyjnych oraz ich przechowywanie muszą odbywać się w danej wytwórni biogazu w taki sposób, aby zapobiec powtórnemu zanieczyszczeniu. Każda wytwórnia biogazu musi dysponować własnym laboratorium lub

korzystać z laboratorium zewnętrznego. Laboratorium musi być odpowiednio wyposażone do celów przeprowadzania niezbędnych analiz i zostać zatwierdzone przez właściwy organ, względnie być akredytowane zgodnie z uznanymi normami międzynarodowymi lub podlegać regularnym kontrolom przeprowadzanym przez właściwy organ. W ramach przeprowadzanych analiz, w sekcji 3 rozdziału III załącznika zawarte są normy, dotyczące obecności bakterii: *Escherichia coli*, *Enterococcaceae* oraz *Salmonella*, jakie muszą spełniać pozostałości fermentacyjne na poszczególnych etapach procesu. Pozostałości fermentacyjne, które nie spełniają tych wymagań, należy poddać powtórnemu przekształcaniu, a w przypadku wyników niezgodnych dla *Salmonella* poddać odpowiednim czynnościom lub usunąć zgodnie z instrukcjami właściwego organu.

Wymogi zawarte w ustawie z dnia 10 lipca 2007 roku o nawozach i nawożeniu (Dz. U. nr 147, poz. 1033) ograniczają dawki azotu wprowadzanego w nawozach naturalnych w ciągu roku do 170 kg N/ha. Umożliwia to obliczenie maksymalnej dawki substancji pofermentacyjnej na jednostkę powierzchni. W celu spełnienia tego wymogu, w odpadzie pofermentacyjnym należy określić ilość azotu. Rozporządzenie w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 18 czerwca 2008 r. w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu Dz. U. nr 119, poz. 765 z póź. zm.) nałożyło dodatkowo obowiązek przeprowadzania badań nawozów organicznych pod kątem ich przydatności do nawożenia gleb i roślin. Szczególną kontrolą objęta jest też zawartość suchej masy, azotu, materii organicznej (węgla), składników pokarmowych i metali ciężkich w pofermencie. Zanieczyszczenia w takiej masie nie mogą też przekraczać wymagań określonych dla nawozów organicznych. Dodatkowo należy też określić stosunek C:N oraz sprawdzić obecność szkodliwych związków organicznych oraz patogenów. Badania powinny być wykonywane przez co najmniej jeden sezon wegetacyjny. Nie są jednak wymagane, jeśli w wyniku analiz fizycznych, fizyko-chemicznych, chemicznych, biologicznych oraz na podstawie użytej technologii produkcji lub informacji o zastosowanych surowcach stwierdzono, że poferment będzie przydatny w nawożeniu lub rekultywacji gleb. Po uzyskaniu pozytywnej opinii wydanej przez jednostkę uprawnioną do badań, masa pofermentacyjna może być wprowadzana do obrotu w postaci nawozu organicznego (czyli sama masa pofermentacyjna), nawozu organiczno-mineralnego (poferment z dodatkiem np. nawozu mineralnego) lub jako środek wspomagający uprawę roślin.

Masa pofermentacyjna musi też spełniać wymogi jakościowe określone w ustawie o nawozach i nawożeniu (przedstawione w tabeli 6.10).

Tabela 6.10. Wymagania jakościowe dla nawozów organicznych, organiczno-mineralnych płynnych i stałych [Szymańska 2011]

	Nawozy stałe		Nawozy płynne	
	organiczne	organiczno-mineralne	organiczne	organiczno-mineralne
Zawartość materii organicznej [%]	30	20	-	-
Zawartość azotu	0,3	1	0,08	0,5

całkowitego [%]				
Zawartość fosforu [% P₂O₅]	0,2	0,5	0,05	0,2
Zawartość potasu [% K₂O]	0,2	1	0,12	0,5

Ustawa o nawozach i nawożeniu zabrania stosowania nawozów na glebach zalanych wodą, przykrytych śniegiem, zamrzniętych do głębokości 30 cm oraz podczas opadów deszczu. Nie można stosować nawozów w postaci płynnej na glebach bez okrywy roślinnej położonych na stokach o nachyleniu większym niż 10% oraz podczas wegetacji roślin przeznaczonych do bezpośredniego spożycia przez ludzi.

W rozporządzeniu Rady Ministrów z dnia 12 lutego 2020 r. w sprawie przyjęcia "Programu działań mających na celu zmniejszenie zanieczyszczenia wód azotanami pochodzącymi ze źródeł rolniczych oraz zapobieganie dalszemu zanieczyszczeniu" - tzw. program azotanowy (Dz.U. 2020 r. poz. 243) znajdują się zalecenia odnośnie stosowania nawozów. Wynika z niego, że nawozy na gruntach ornych stosuje się 1 marca do 30 listopada (w przypadku niekorzystnych warunków pogodowych). Rolnik sam określa warunki pogodowe i potrzebę stosowania nawozów w terminie późniejszym niż 31 października (przepisy nie wymagają specjalnego dokumentowania takich przypadków). Terminy te można stosować w przypadku wykorzystywania masy pofermentacyjnej. W związku z tym należy zapewnić odpowiednią przestrzeń magazynową, aby można było gromadzić poferment. Potrzeby magazynowe wzrastają wraz z utrzymywaniem się pokrywy śniegowej oraz zamrzniętej gleby w listopadzie bądź marcu.

Odzysk metodą R3 (kompostowanie) to rozkład selektywnie zebranych odpadów. Jest on bardzo dobrym sposobem na zwiększenie wartości nawozowej pofermentu przed bezpośrednim zastosowaniem na pole. Proces ten zachodzi w warunkach tlenowych, dlatego ważne jest odpowiednie napowietrzanie materiału. Najczęściej stosuje się kompostowanie pryzmowe. Masa pofermentacyjna po separacji może być mieszana z innymi organicznymi odpadami. Uzyskiwany w ten sposób kompost ma lepszą jakość a dodatkowo zostają zagospodarowane odpady nieprzydatne w produkcji biogazu. Najczęściej takie rozwiązanie stosuje się dla biogazowni pracujących na odpadach komunalnych.

Substancja pofermentacyjna pochodząca z agrobiogazowni może być dobrym nawozem pod warunkiem, że będzie prawidłowo zagospodarowana. Jeżeli nie będzie takiej możliwości to poferment stanie się obciążeniem, a jego przechowywanie, wywóz, rozlewanie i wykonywanie analiz glebowych spowoduje podniesienie kosztów działania biogazowni i mikrobiogazowni.

7.PRZYKŁADY MIKROBIOGAZOWNI W POLSCE. DOBRE PRAKTYKI

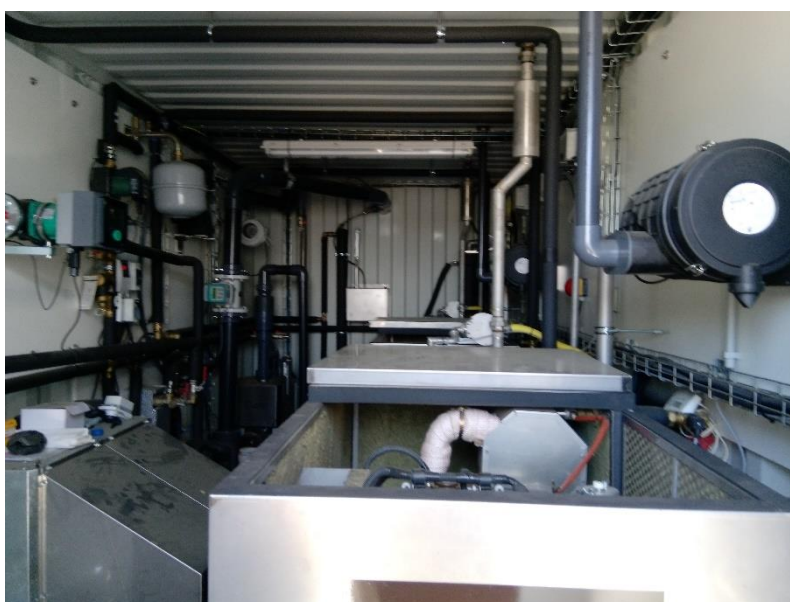
7.1 Mikrobiogazownia w Ciemnoszyjach

Jest to mikrobiogazownia (fot. 7.1 – 7.2) o mocy 40 kW według technologii belgijskiej firmy Bioelectric NV.

Substratem jest w 100% gnojowica bydłęca. W gospodarstwie znajduje się średnio 200 DJP krów mlecznych. Proces fermentacji mezofilnej substratu - gnojowicy pochodzenia zwierzęcego. Technologia ta jest przystosowana do substratu o zawartości suchej masy do 12% i suchej masy organicznej minimum 7%. Wyprodukowana energia służy na sprzedaż oraz do zasilania obiektu obory, wyposażonej m.in. w 2 roboty udojowe.



Fot. 7.1. Widok mikrobiogazowni w Ciemnoszyjach z komorą fermentacyjną z biogazem [materiały własne]



Fot. 7.2. Widok wnętrza – urządzenia mikrobiogazowni [materiały własne]

7.2 Dobre praktyki

7.2.1 Wykorzystanie nawozu naturalnego na potrzeby produkcji biogazu

Pozyskany biogaz może być zagospodarowany na potrzeby energetyczne w gospodarstwie np. podgrzewanie pomieszczeń inwentarskich, dosuszanie płodów rolnych, dosuszanie ziół, szklarnie na produkcję warzyw, na potrzeby bytowe centralnego ogrzewania.

Dodatkowo może być również wykorzystany poprzez sprężanie do dystrybucji i wykorzystania na obszarach wiejskich, pozbawionych dostępu do sieci przesyłu gazu. Proponowane rozwiązania dla mikrobiogazowni zalecane są dla gospodarstw rodzinnych i farmerskich o wielkości od 100 do 500 DJP.

7.2.2 Wykorzystanie pofermentu z nawozu naturalnego na potrzeby kompostowania

Substrat przefermentowany może być przeznaczony na kompost, szczegóły technologiczne opisano w rozdziale 6.

7.2.3 Wykorzystanie pofermentu z nawozu naturalnego na ściółkowanie lub na ekologiczny nawóz

Poddawanie substratu pofermentacyjnego separacji pozwala na uzyskanie substratu stałego o zawartości suchej masy 32% i substratu płynnego (ciekłego) o zawartości 5%.

Substrat stały może być poddany granulacji w celu pozyskania nawozu ekologicznego, natomiast substrat płynny może być zazwyczaj wykorzystywany na bezpośrednie zagospodarowanie rolnicze lub do kompostowania (według technologii opisanej w rozdziale 6). Według badań ITP-PIB odseparowany substrat pofermentacyjny może być również przeznaczony na ściółkę.

Wyżej wymienione dobre praktyki służą zrównoważonej produkcji rolnej, która spełnia wymagania ochrony środowiska, przy zapewnieniu opłacalności produkcji i zmniejszeniu uciążliwości pracy obsługi.

PODSUMOWANIE

Produkcja biogazu z nawozów zwierzęcych i innych surowców oraz wykorzystanie masy pofermentacyjnej powstającej podczas tego procesu ma wiele zalet m.in.:

- Ludzkość ma do swojej dyspozycji około 5 miliardów hektarów ziemi uprawnej wraz z pastwiskami. Dla celów energetycznych można wykorzystać prawie 2,4 miliarda hektarów ziemi.
- Instalacja biogazowa, w tym mikrobiogazowa nie stanowi zagrożenia dla środowiska.
- Masa pofermentacyjna stanowi pełnowartościowy nawóz.
- Przetwarzanie nawozów naturalnych np. gnojowicy prowadzi do redukcji uciążliwych zapachów.
- Pozostałość pofermentacyjna jest mniej uciążliwa dla środowiska naturalnego niż nawóz naturalny ze względu na niższe wskaźniki np. BZT₅ (o 60-80%) i ChZT (o 50-60%).
- Przefermentowana masa swoim składem chemicznym i właściwościami fizycznymi nie stanowi zagrożenia sanitarnego dla przyległych pól i okolic mieszkalnych, gdyż redukuje do minimum ilość patogenów i zarazków chorobotwórczych.
- Zmniejszenie ryzyka zanieczyszczenia wód gruntowych i powierzchniowych, głównie związkami azotu i fosforu oraz zarazkami, które występują w odchodach zwierzęcych (zmniejszenie eutrofizacji wód).
- Zniszczenie nasion chwastów, co ma istotny wpływ na zużycie chemicznych środków ochrony roślin.
- Masa pofermentacyjna nie poddawana obróbce podlega takim ograniczeniom jak magazynowanie gnojowicy surowej (zbiorniki zamknięte, laguny przykryte).
- Masa pofermentacyjna poddawana obróbce jest przechowywana zgodnie z daną technologią.
- Gospodarka masą pofermentacyjną podlega takim samym zasadom formalno-prawnym jak nawóz naturalny.
- Biogazownia i mikrobiogazownia powinna być monitorowana pod względem sanitarnym w zakresie gospodarki pozostałością pofermentacyjną.

Substrat pochodzący z biogazowni rolniczej i mikrobiogazowni powinien być traktowany jako ulepszony nawóz naturalny o poprawionych właściwościach nawozowych i oddziaływaniu na środowisko, a nie jako odpad.

Instalacje biogazowe, w tym mikrobiogazownie mogą mieć następujące wielkości:

- biogazownia z komorą fermentacyjną żelbetonową o pojemności 100 m³ przeznaczoną dla gospodarstw o obsadzie ok. 100 DJP i wielokrotność;
- biogazownia z komorą fermentacyjną żelbetonową o pojemności 100, 200, 500 m³ i ich wielokrotność.

Instalacje te przeznaczone są dla gospodarstw o obsadzie 100 do 500 DJP odpowiednio do wielkości komory i mocy elektrycznej z uwzględnieniem mikrobiogazowni.

Produktem takich instalacji jest wysokowartościowy nawóz, który w porównaniu z powszechnie stosowaną surową gnojowicą:

- jest mniej agresywny wobec roślin;
- zawiera azot w formie lepiej przyswajalnej przez rośliny (azot amonowy);
- ma wysoką zawartość zmineralizowanego fosforu, potasu;
- posiada lepsze właściwości hydrauliczne (płynność);

- posiada zredukowaną objętość (koszty transportu);
- odznacza się lepszym wykorzystaniem składników przez rośliny.

Rozwój Odnawialnych Źródeł Energii (OZE), w tym produkcja biogazu, wymaga od nauki i praktyki doskonalenia procesu technologicznego jak również elementów technicznych. Głównym celem prac badawczych w tym obszarze jest rozwój innowacyjnych instalacji biogazowych i elementów infrastruktury technicznej przygotowania oraz zagospodarowania substratów. Przedstawiono analizy elementów i informacje z zakresu mikrobiogazowni jak również zagospodarowania pofermentu, a także racjonalnego wykorzystania masy pofermentacyjnej w postaci stałej i ciekłej. Ponadto nie bez znaczenia dla rolnictwa i ochrony środowiska są możliwości utylizacji odpadów z produkcji rolniczej oraz przetwórstwa rolno-spożywczego. Przedstawione w pracy rezultaty i propozycje rozwiązań pozyskania biogazu np. z obornika i substratów o dużej zawartości suchej masy (powyżej 20%), mogą umożliwić intensyfikację działań w tym zakresie.

Ważnym elementem działań w procesie produkcji energii z biogazu jest również zagospodarowanie masy pofermentacyjnej na potrzeby produkcji rolnej. Przedstawiono w pracy szereg elementów procesu produkcji biogazu, jego oczyszczania i zagospodarowania, a także racjonalny dobór substratów do fermentacji metanowej. W pracy omówiono również elementy technologiczne i rozwiązania techniczne procesu fermentacji oraz zagospodarowania masy pofermentacyjnej, takie jak np. separację czy kompostowanie z możliwością granulacji.

Wybór proporcji pomiędzy ciepłem, a energią elektryczną zależy od lokalnych potrzeb inwestora, a także potencjalnych odbiorców energii elektrycznej i cieplnej.

Jednym z najbardziej uciążliwych dla środowiska sektorów produkcji rolnej jest intensywny chów zwierząt, będący odpowiedzią na wzrastającą konsumpcję mięsa we współczesnych społeczeństwach oraz efektem specjalizacji w rolnictwie. Wiąże się to z koniecznością przeznaczania coraz większych obszarów rolnych na paszę dla zwierząt oraz produkcją ogromnych ilości gnojowicy, stanowiącej znaczne obciążenie dla środowiska.

Produkcja i wykorzystanie energii pochodzenia rolniczego to szansa na dywersyfikację i wzrost przychodów rolniczych oraz bezpieczeństwa energetycznego wsi, a także poprawa ochrony środowiska na terenach rolniczych.

Rozważając możliwość wykorzystania na cele energetyczne biomasy pochodzenia rolniczego należy mieć na uwadze długoterminowe perspektywy i zadania stawiane przed rolnictwem.

BIBLIOGRAFIA

Dot. rozdz. (1-4), (6-7)

- Alburqueque J. A., Fuente C., Ferrer–Costa A., Carrasco L., Cegarra J., Abad M., Bernal M. P. 2012. Assessment of the fertilizer potential of digestates from farm and agroindustrial residues, *Biomass and bioenergy*, 40: 181-189.
- Baadstorp L. 2011. Biogaz w sektorze produkcji trzody chlewnej – doświadczenie duńskie, *Trzoda Chlewna*, Wielkopolskie Wydawnictwo Rolnicze, Poznań, 4: 56-60.
- Baran S., Łabętowicz J., Krzywy E. 2011. *Przyrodnicze wykorzystanie odpadów*. Wyd. I. Warszawa, ss. 323.
- Borowski S., Domański J. 2009. Ocena procesu kofermentacji mieszaniny pomiotu kurzego, organicznej biomasy roślinnej i osadów ściekowych, *Ekologia i Technika*, Bydgoskie Towarzystwo Naukowe, Bydgoszcz, 4: 183-186.
- Borusiewicz A., Romaniuk W., Domasiewicz, Borek K., Marczuk T. 2017. Analiza Potrzeb Techniczno- Technologicznych oraz propozycje rozwiązań w produkcji biogazu w gospodarstwach rodzinnych i farmerskich, WSA Łomża: ss. 139.
- Butlewski K. 2012. Perspektywy rozwoju rolniczych elektrociepłowni biogazowych w Polsce i Europie, *Problemy Inżynierii Rolniczej*, ITP w Falentach, Poznań, 76: 137-147.
- Cebula J., Latocha L. 2005. Biogazownie rolnicze elementem gospodarczego wykorzystania pozostałości z produkcji rolniczej oraz rozwoju rozproszonej energii odnawialnej. Materiały konferencyjne. Mikołów.
- Cong Xiao, Yunqian Ma, Dandan Ji, Lihua Zang. 2017. Review of desulfurization process for biogas purification. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 100 012177.
- Czekała W., Pilarski K., Dach J., Janczak D., Szymańska M. 2012. Analiza możliwości zagospodarowania pofermentu z biogazowni, *Technika Rolnicza, Ogrodnicza, Leśna, Przemysłowy Instytut Maszyn Rolniczych*, Poznań, 4.
- Dach J. 2010. Rynek biogazowni w Polsce – ocena i perspektywy. *Czysta Energia* Nr 5/2010 (105): 38-42.
- Fugol M. 2013. Ocena przydatności wybranych substratów pochodzenia rolniczego i przemysłowego do pozyskiwania biogazu na przykładzie wybranego powiatu rolniczego. Rozprawa doktorska. Wrocław.
- Ginałski Z. 2011. Substraty dla biogazowni rolniczych. [on-line] [Dostęp 17.01.2014] Dostępny w internecie: www.cdr.gov.pl/pol/OZE/substraty.pdf
- Głaszczka A., Wardal W. J., Romaniuk W., Domasiewicz T. 2010. *Biogazownie rolnicze*. Warszawa. Wydaw. Multico Oficyna Wydawnicza. ISBN 978-83-7073-432-9: ss. 76.
- Głodek E., Garus T., Janecka L., Kalinowski W., Kościanowski J., Werszler A. 2007. Wprowadzenie; Podstawy w zakresie wiedzy o fermentacji metanowej; Charekterystyka elementów ciągu technologicznego; Zalety wykorzystania biogazu. W: *Pozyskiwanie i energetyczne wykorzystanie biogazu rolniczego*, Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych, Opole: 11-17, 18-32, 33-42, 43-44.
- GUS 2022. *Energia 2022*. <https://stat.gov.pl/obszary-tematyczne/srodowisko-energia/energia/energia-2022,1,10.html> [Dostęp 4.01.20223]
- Gutmański I. i inni. 1991 *Produkcja buraka cukrowego*. Praca zbiorowa. Wydaw. PWRiL, Poznań: ss. 704.

- Kim B. W., Chang H. N. 1991. Removal of hydrogen sulfide by *Chlorobium thiosulfatophilum* in immobilized-cell and sulfur-settling free-cell recycle reactors [J]. *Biotechnol Prog*, 1991, 7(6): 495-500.
- Kowalczyk–Juśko A., Szymańska M. 2015. Poferment nawozem dla rolnictwa. Warszawa. MRiRW, FDPA, ss. 60.
- Kowalczyk–Juśko A., Wojciechowski A. 2013. Pozostałość pofermentacyjna – możliwości zagospodarowania, *Czysta Energia*, ABRYŚ, Poznań, 3: 32-34.
- Kowalczyk–Juśko A., 2010a: Odchody [z ferm] przynoszą dochody, *Agroenergetyka*, Agencja Promocji Rolnictwa i Agrobiznesu, Osielsko, 2: 6-7.
- Kowalczyk–Juśko A. 2010b: Pozostałość po fermentacji beztlenowej, źródło przychodu czy kłopot?, *Agroenergetyka*, Agencja Promocji Rolnictwa i Agrobiznesu, Osielsko, 3: 36-40.
- Kowalczyk–Juśko A. 2014 *Biogazownie Szansą dla rolnictwa i środowiska*. Wydaw. Fundacja na rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa FDPA ISBN 978-83-937363-0-0: ss. 88
- Kuczyńska I., Nogal A., Pomykała R. 2011. Odpady w produkcji biogazu. Cz. II [on-line]. Dostępny: <http://e.czytelnia.abrys.pl/?mode=tekst&id=13590>
- KWS Lochow Polska Sp. Z o. o. 2012. Uprawa kukurydzy – poradnik [on-line] Dostępny w Internecie:http://www.kws.pl/aw/KWS/poland/Firma/Aktualno_347_ci/Artikel/~dwuw/Nowy_poradnik_KWS_Uprawa_kukurydzy/
- KWS Lochow Polska Sp. Z o. o. Żyto hybrydowe KWS LOCHOW jako substrat do produkcji biogazu. Folder [on-line] Dostępny w internecie: <http://www.kws-lochow.pl/uploads/media/zyto-hybrydowe-substrat-do-produkcji-biogazu.pdf>
- Ledakowicz S., Krzystek L., 2005: Wykorzystanie fermentacji metanowej w utylizacji odpadów przemysłu rolno-spożywczego, *Biotechnologia*, Instytut Chemii Bioorganicznej PAN, Poznań, 3: 166-175.
- Marcato C. E., Pinelli E., Pouech P., Winterton P., Guisresse M. 2008. Particle size and metal distributions in anaerobically digested pig slurry, *Bioresource Technology*, 99: 2340-2348.
- Minister Klimatu i Środowiska, Obwieszczenie z dnia 2 marca 2021 r. Polityka energetyczna Państwa do 2040r. , M.P. z 2021 r. poz. 264.
- Myczko A., Myczko R., Kołodziejczyk T., Golimowska R., Lenarczyk J., Janas Z., Kliber A., Karłowski J., Dolska M. 2011. Budowa i eksploatacja biogazowi rolniczych. Poradnik dla inwestorów zainteresowanych budową biogazowi rolniczych. Pr. Zbior. Red. A Myczko. Falenty. Wydaw. ITP. ISBN 978-83-62416-23-3: ss. 142.
- NFOŚiGW. Agroenergia. <https://www.gov.pl/web/nfosigw/agroenergia-2021> [Dostęp 05.01.2023 r.]
- Oniszk A. 2000. Wykorzystanie ścieków i odpadów rolniczych do produkcji biogazu, *Zeszyty Edukacyjne*, Instytut Melioracji i Użytków Zielonych, 6: 111-116.
- Palm O. 2008. The quality of liquid and solid digestate from biogas plants and its application In agriculture. In ECN/ORBIT e.V., Workshop 2008: The future for Anaerobic Digestion of Organic Waste In Europe. Pres. Nr 20.
- Pasyniuk P. 2012. Szacowanie wartości “biogazowej” surowców. W: *Biogaz rolniczy – odmawiane źródło energii – teoria i praktyczne zastosowanie*, Podkówka W., Podkówka Z., Kowalczyk–Juśko A., Powszechnie Wydawnictwo Leśne, Warszawa: 119-229.
- Plan Strategiczny dla Wspólnej Polityki Rolnej na lata 2023-2027. <https://www.gov.pl/web/wprpo2020/zatwierdzony-przez-komisje-europejska-plan-strategiczny-dla-wspolnej-polityki-rolnej-na-lata-2023-2027> [Dostęp 9.01.2023 r.]

- Podkówka W. 2010. Agrobiogazownia w gospodarstwie rolnym; Oddziaływanie agrobiogazowni na środowisko; Biogaz z substratów rolniczych; Biologiczne podstawy powstawania biogazu; Biogaz – paliwo ekologiczne. W: Agrobiogazownia, oprac. zbior. pod red. Węglarzy K. i Podkówki W., Zakład Doświadczalny Instytutu Zootechniki PIB, Grodziec Śląski: 13-17, 18-19, 20-22, 33-37: 38-40.
- Podkówka W. 2007: Biomasa – substrat do produkcji biogazów, Wieś Jutra, Wyd. Wieś Jutra, Warszawa, 11: 37-39.
- Podkówka Z. 2012. Substancja pofermentacyjna. W: Biogaz rolniczy – odmawiane źródło energii – teoria i praktyczne zastosowanie, Podkówka W., Podkówka Z., Kowalczyk–Juško A., Powszechnie Wydawnictwo Leśne, Warszawa: 112-117.
- Podkówka Z. 2010. Właściwości substancji pofermentacyjnej; Substraty do produkcji biogazu. W: Agrobiogazownia, oprac. zbior. pod red. Węglarzy K. i Podkówki W., Zakład Doświadczalny Instytutu Zootechniki PIB, Grodziec Śląski: 48-53, 54-77.
- Podkówka Z., Podkówka W. 2009. Biogaz rolniczy – odnawialne źródło energii, Przegląd Hodowlany, Polskie Towarzystwo Zootechniczne, Warszawa, 1: 30-33.
- Podkówka Z., Podkówka W. 2010. Substraty dla biogazowni rolniczych. Warszawa. Wydaw. Agro Serwis, Biznes-Press Sp. z o. o. ISBN 8392796616: ss. 72.
- Podkówka W., Podkówka Z., Kowalczyk–Juško A., Pasyniuk P. 2012. Biogaz rolniczy. Odnawialne źródło energii. Teoria. Praktyka. Zastosowanie. Wydaw. PWRiL. ISBN 978-83-09-01089-0.
- Romaniuk W. 1999. Utylizacja gnojowicy i pozyskiwanie energii w biogazowniach rolniczych, Wieś Jutra, Wydawnictwo Wieś Jutra, Warszawa, 1: 15-17.
- Romaniuk W. 2004: Metody unieszkodliwiania gnojowicy. W: Ekologiczne systemy gospodarki obornikiem i gnojowicą, oprac. red. Bień E., Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa, Warszawa: 33-49.
- Romaniuk W., Fiedorowicz G., Gancarz F., Głaszczka A., Godlewski J., Myczko A., Rogiński W., Rogulska M., Romaniuk P., Śledziński T., Wardal W., Wierzbicki K. 1995. Gospodarka gnojowicą i obornikiem. Warszawa. Wydaw. Hortpress Sp. z o. o. ISBN 83-904433-09: ss. 189.
- Romaniuk W. 2005. Magazynowanie nawozu naturalnego. Poradnik. Warszawa: Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa; Duńskie Służby Doradztwa Rolniczego; ISBN 83-89806-03-7 Wydanie II: ss. 81
- Romaniuk W., Głaszczka A., Biskupska K. 2012. Analiza rozwiązań instalacji biogazowych dla gospodarstw rodzinnych i farmerskich. Falenty. Wydaw. ITP. ISBN 978-83-62416-53-0 ss.94
- Rozporządzenie Ministra Klimatu z dnia 2 stycznia 2020 roku w sprawie katalogu odpadów (Dz. U. 2020, poz. 10).
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z 9 września 2002 roku w sprawie standardów jakości gleby oraz standardów jakości ziemi.
- Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju wsi z dnia 20 lipca 2018 roku w sprawie szczegółowego sposobu stosowania nawozów oraz prowadzenia szkoleń z zakresu ich stosowania (Dz. U. 2018 poz. 1438).
- Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Rozwoju Wsi z dnia 21 grudnia 2009 roku w sprawie wykonania niektórych przepisów ustawy o nawozach i nawożeniu (Dz. U. nr 224, poz 1804).
- Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady (WE) nr 1069/2009 z dnia 21 października 2009 roku.

- Rozporządzenie Ministra Środowiska z 6 lutego 2015 roku w sprawie komunalnych osadów ściekowych.
- Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 stycznia 2015 roku w sprawie procesu odzysku R10 (Dz. U. 2015, poz. 132).
- Rozporządzenie Ministra Rolnictwa i Gospodarki Żywnościowej z dnia 7 października 1997 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle rolnicze i ich usytuowanie (Dz. U. Nr 132 poz. 877 z późn. zm.)
- Sadecka Z., Suchowska-Kisielewicz M. 2016. Możliwość wykorzystania substratów organicznych w procesie fermentacji. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 18: 400-413.
- Szlachta J. 1999. Biogaz jako paliwo pozyskiwane w procesie utylizacji odchodów zwierzęcych. W: *Niekonwencjonalne źródła energii*, pr. zbior. pod red. Szlachty J., Wyd. AR, Wrocław: 98-108.
- Szulc R. 2011. Zagospodarowanie i postępowanie z odchodami w chowie świń, *Trzoda chlewna*, Wielkopolskie Wyd. Rolnicze, Poznań, 2: 61-62.
- Szulc W. 2004: Właściwości buforowe gleb. W: *Chemia rolna – podstawy teoretyczne i praktyczne*, pod red. Ramus E., Warszawa: 174-178.
- Szymańska M. 2013. Masa pofermentacyjna – uciążliwy odpad czy przydatny nawóz?, *Farmer*, 3: 87-91.
- Szymańska M. 2011. Przetwarzanie odpadów organicznych przy zastosowaniu fermentacji metanowej oraz zagospodarowanie powstającej masy pofermentacyjnej. W: *Przyrodnicze wykorzystanie odpadów*, pod. red. Baran S., Łabętowicz J., Krzywy E., Powszechnie Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Warszawa: 292-309.
- Syed M, Soreanu G, Falletta P. i in. 2006. Removal of hydrogen sulfide from gas streams using biological processes--A review [J]. *Canadian Biosystems Engineering*, 48: 1.
- Ustawa z dnia 30 sierpnia 2002 r. o systemie oceny zgodności.
- Ustawa z dnia 10 lipca 2007 r. o nawozach i nawożeniu (Dz. U. nr 1147, poz. 1033).
- Ustawa z dnia 3 października 2008 r. o udostępnianiu informacji o środowisku i jego ochronie, udziale społeczeństwa w ochronie środowiska oraz o ocenach oddziaływania na środowisko (Dz.U. 2008 nr 199 poz. 1227).
- Ustawa z dnia 14 grudnia 2012 r.(Dz. U. z 2013 r. poz. 21) o odpadach.
- Ustawy z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (tekst uaktualniony Dz.U. 2022 poz. 1378, 1383).
- Żarczyński A., Rosiak K., Anielak P., Ziemiński K., Wolf W. 2015. Praktyczne metody usuwania siarkowodoru z biogazu. II. Zastosowanie roztworów sorpcyjnych i metod biologicznych. *Acta Innovations*, nr 15/2015: 57-71.
- Wałowski G., Borek K., Romaniuk W., Wardal W.J., Borusiewicz A. 2019. Nowoczesne systemy pozyskania energii- biogazu, *WSA Łomża*, ss.116
- Węglarzy K., 2010. Wstęp. W: *Agrobiogazownia*, oprac. zbior. pod red. Węglarzy K. i PodkóWKi W., Zakład Doświadczalny Instytutu Zootechniki PIB, Grodziec Śląski: 11-12.
- Węglarzy K., Nowak A., Bereza M., Pellar A., Skrzyżata I., Stekla J., 2010. Rozwiązanie architektoniczno-konstrukcyjno-technologiczne „Agrobiogazowni” w Kostkowicach. W: *Agrobiogazownia*, oprac. zbior. pod red. Węglarzy K. i PodkóWKi W., Zakład Doświadczalny Instytutu Zootechniki PIB, Grodziec Śląski: 91-117.
- <https://www.kowr.gov.pl/odnawialne-zrodla-energii/biogaz-rolniczy/wytworcy-biogazu-rolniczego/rejestr-wytworcow-biogazu-rolniczego> [Dostęp: 15.07.2022 r.]

http://www.energiaodnawialna.net/index.php?option=com_content&view=article&id=312&Itemid=79 [Dostęp: 15.07.2022 r.]
<http://www.joskin.com> [Dostęp: 15.07.2022 r.]
http://www.inzynierbudownictwa.pl/images/magda/magda_4/biogazownia_przemyslaw.jpg
[Dostęp: 15.07.2022 r.]
<http://www.pichonindustries.fr/pl>, [Dostęp: 15.07.2022 r.]
<https://www.kowr.gov.pl/odnawialne-zrodla-energii/biogaz-rolniczy/mikroinstalacje> [Dostęp 04.01.2023 r.]
<https://bip.kowr.gov.pl/uploads/pliki/oze/biogaz/l%20p%C3%B3%C5%82roczne%202022%20r.%20-%20Zbiorczy%20raport%20wytw%C3%B3rc%C3%B3w%20e.e%20w%20mikroinstalacji.pdf>
Dostęp 04.01.2023 r.]

Dot. rozdz. 5

AR Biogas System, 2019. Micro-Biogas-Plant, Arno Reiter, Markus Kaufmann, March 17th, 2019, A-3435 Erpersdorf, Donaugasse 3, 1-13

ARR, 2014. Informacja o działalności przedsiębiorstw energetycznych zajmujących się wytwarzaniem biogazu rolniczego w latach 2011-2013, , <http://www.arr.gov.pl/dane-za-2011-rok>

Asam Z.-ul-Z., Poulsen T.G., Nizami A.-S., Rafique R., Kiely G., Murphy J.D., 2010. How can we improve biomethane production per unit of feedstock in biogas plants? Applied Energy 88 (2011) 2013–2018, <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2010.12.036>

Baltic Green Belt, 2020. <http://balticgreenbelt.org.pl/>, dostęp 30.09.2012.

Bonin S., 2008. Mikroorganizmy immobilizowane, Agro Przemysł, 6, s. 20-22 http://www.jrdh.asdf.kierunekagro.pl/Resources/art/1692/bmp_4924062ba5548.pdf (dostęp od 29.10.2021).

Brandenburg H., 2002. Zarządzanie projektami. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Katowicach. Katowice. ISBN 83-7246-078-7.

Buraczewski G., 1991. Ustalenie optymalnych parametrów fermentacji metanowej, Rozprawy naukowe i monografie, Wydawnictwo SGGW, Warszawa.

Chrząstek J., 2016. Prezentacja najlepszych praktyk w zakresie produkcji i wykorzystania biogazu w Polsce. STRABAG Umwelttechnik GmbH, Inżynieria i budowa instalacji ochrony środowiska. http://www.pom-biogas.eu/sites/default/files/chrzastek_gdansk_30_wrzesien_2016.pdf

Curkowski A., Onkisz-Popławska A., Mroczkowski P., Zowski M., Wiśniewski G., 2011. Przewodnik dla inwestorów zainteresowanych budową biogazowni rolniczych. Pracę wykonano na zamówienie Ministerstwa Gospodarki w Instytucie Energetyki Odnawialnej, Warszawa.

Dębska B., 2004. Właściwości substancji humusowych gleby nawożonej gnojowicą, Rozprawa nr 110, Akademia Techniczno-Rolnicza, Bydgoszcz, 112.

Flizikowski J., Bieliński K., 2000. Projektowanie środowiskowych procesów energii. Wydawnictwo ATR, Bydgoszcz.

FNR, 2005. Fachagentur Nachwachsenderohstoffe. Handreichung Biogasgewinnung und –nutzung Ergebnisse des Biogas-Messeprogramms (Wyniki monitoringu biogazowni). Institut für Energetik und Umwelt gGmbH; Bundesforschungsanstalt für Landwirtschaft,

- Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Fachagentur Nachwachsendenrohstoffe.V.: Gülzow. ISBN 3-00-0143333-5.
- Fotyma M., Mercik S., 1995. Chemia Rolna, Wydawnictwo Naukowe PWN.
- Gołaszewski J., 2011. Wykorzystanie substratów pochodzenia rolniczego w biogazowniach w Polsce. Postępy Nauk Rolniczych nr2/2011, 69–94.
- He C., Qi B., Jiao Y., Zhang Q., Ma X., Li G., Jing Y., Jiang J., Zhang Z., 2020. Potentials of biohydrogen and bio-methane production from diseased swines. International Journal of Hydrogen Energy, Volume 45, Issue 59, 4 December 2020, 34473-34482, <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.08.215>
<https://biogaz.egie.pl> (dostęp od 29.10.2021).
- Hus S., 1995. Chemia wody, ścieków i gnojowicy, Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Wrocław.
- Jadczyzyn T., 2009. Planowanie nawożenia w gospodarstwie z wykorzystaniem programu NawSald, Studia i raporty IUNG-PIB, Systemy wspomaganie decyzji w zrównoważonej produkcji roślinnej, 16, 14.
- Jędrzak A., 2001. Biologiczne przetwarzanie odpadów. Przegląd Komunalny, Wydawca ABRYS Sp. z o.o., 6, s. 89-92.
- Jochimsen H., 2006. Betriebszweigabrechnung für Biogasanlagen, Arbeiten der DLG, Bd.200, Velags DLG, Frankfurt am Main.
- Kaparaju P., Serrano M., Thomsen A.B., Kongjan P., Angelidaki I., 2009. Bioethanol, biohydrogen and biogas production from wheat straw in a biorefinery concept. Bioresource Technology 100, 2562–2568, DOI: 10.1016/j.biortech.2008.11.011
- Klimek K., Kapłan M., Syrotyuk S., Konieczny R., Anders D., Dybek B., Karwacka A., Wałowski G., 2021. Production of Agricultural Biogas with the Use of a Hydrodynamic Mixing System of a Polydisperse Substrate in a Reactor with an Adhesive Bed. Energies, 14, 3538. <https://doi.org/10.3390/en14123538>;
- Kosewska K., Kamiński J.R., 2008. Analiza ekonomiczna budowy i eksploatacji biogazowni rolniczych w Polsce. Inżynieria Rolnicza 1(99)/, 189-194.
- Kowalczyk-Juśko A., 2013. Biogazownie. Szansą dla rolnictwa i środowiska, (red. A. Grzybek), Wyd. Fundacja na rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa, Publikacja przygotowana w ramach Planu działania Sekretariatu Centralnego Krajowej Sieci Obszarów Wiejskich na lata 2007-2013.
- KOWR, 2018-20212021. Zgodnie z art. 128 ust. 8 ustawy z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii (Dz. U. z 2021 r. poz. 610, z późn. zm.), informacje zgromadzone w trakcie realizacji ww. działań podlegają publikacji w Biuletynie Informacji Publicznej KOWR. Rodzaje i ilości surowców zużytych do produkcji biogazu rolniczego w poszczególnych latach – dane na dzień 31 marca 2022 r. zostały opublikowane na stronie KOWR.
- Kuczowic J., Kuczowic K., 2006. Decyzje inwestycyjne. Wydawnictwo Akademii Ekonomicznej w Katowicach. Katowice. ISBN 83-7246-812-5.
- Kutera J., 1994. Gospodarka gnojowicą, Wydawnictwo Akademii Rolniczej, Wrocław, 370.
- Kwiecińska A., 2013. Ekologiczne zagospodarowanie gnojowicy z wykorzystaniem technik membranowych. Praca realizowana w ramach pracy naukowej finansowanej ze środków na naukę w latach 2010-2012 jako projekt badawczy nr N N523 559038, Politechnika Śląska, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Zakład Chemii Środowiska i Procesów Membranowych, Gliwice.

- Li Y., Zhang R., Chen C., Liu G., He Y., Liu X., 2013. Biogas production from co-digestion of corn stover and chicken manure under anaerobic wet, hemi-solid, and solid state conditions. *Bioresource Technology* 149 (2013) 406–412, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2013.09.091>
- Liberti F., Pistolesi V., Mouftahi M., Hidouri N., Bartocci P., Massoli S., Zampilli M., Fantozzi F., 2019. An Incubation System to Enhance Biogas and Methane Production: A Case Study of an Existing Biogas Plant in Umbria, Italy. *Processes* 2019, 7, 925; <https://doi.org/10.3390/pr7120925>.
- Maćkowiak C., 2003. Gospodarowanie substancją organiczną i nawozami naturalnymi w rolnictwie, Upowszechnianie zasad dobrej praktyki rolniczej, Część 2, Puławy, Wydawca IUNG, 259-285.
- Mega Sp. z o.o., <https://megabelzyce.pl/pl> (dostęp od 29.10.2021).
- Morken J., Gjetmundsen M., Fjørtoft K., 2018. Determination of kinetic constants from the co-digestion of dairy cow slurry and municipal food waste at increasing organic loading rates. *Renewable Energy* 117, 46-51, DOI:10.1016/j.renene.2017.09.081
- MRiRW, 2004. Ministerstwo Rolnictwa i Rozwoju Wsi, Ministerstwo Środowiska, Kodeks Dobrej Praktyki Rolniczej, Wydanie III, Warszawa.
- Myczko A.; Kołodziejczyk T.; Sawiński R.; Myczko R.; Aleszczyk Ł.; Łaska-Zieja B.; Wałowski G.; Wrześcińska-Jędrusiak E., 2017. Koncepcje małych biogazowni do przerobu rolniczych pozostałości poprodukcyjnych. Aktualne problemy inżynierii biosystemów. Rozdział monografii pod redakcją Mariana Lipińskiego i Jacka Przybyła – Produkcja energii ze źródeł odnawialnych. Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, Poznań, 251-266, ISBN 978-83-7160-859-9
- Nsair A., Cinar S.Ö., Qdais H.A., Kuchta K., 2019. Optimizing the performance of a large scale biogas plant by controlling stirring process: A case study. *Energy Conversion and Management* 198, 111931, DOI : 10.1016/j.enconman.2019.111931
- Oniszk-Popławska A., Matyka M., 2012. Raport końcowy z badania dziedzinowego. „Kompleksowa ocena uwarunkowań w zakresie produkcji biogazu w województwie lubelskim”. Regionalny System Zarządzania Zmianą Gospodarczą
- Ormaechea P., Castrillón L., Suárez-Peña B., Megido L., Fernández-Nava Y., Negral L., Marañón E., Rodríguez-Iglesias J., 2018. Enhancement of biogas production from cattle manure pretreated and/or codigested at pilot-plant scale. Characterization by SEM. *Renewable Energy*, Volume 126, October 2018, Pages 897-904. <https://ideas.repec.org/a/eee/rene/v126y2018icp897-904.html>
- Piekutin J., Puchlik M., Haczykowski M., Dyczewska K., 2021. The Efficiency of the Biogas Plant Operation Depending on the Substrate Used. *Energies* 2021, 14, 3157. <https://doi.org/10.3390/en14113157>
- Podkówka W., 2006. Kukurydza jako substrat do produkcji biogazu. *Kukurydza*, 12, 26-29.
- Podkówka Z., 2015. Możliwości wykorzystania instalacji biogazowni rolniczych, Materiały z konferencji „Diagnoza stanu – Dyskusja Problemowa na temat możliwości rozwoju instalacji OZE w województwie kujawskopomorskim, Toruń.
- Podkówka Z., 2016. Biogaz z gnojowicy. IX EKO-€URO-ENERGIA, Inżynieria Odnawialnych Źródeł Energii, Monografia pod redakcją Mrozińskiego A. .Bydgoszcz, 147-165.
- Poldanor, 2020. <http://www.kzp-ptch.pl/95-aktualnosci/2314-dwadziescia-lat-doswiadczen-towarowego-producenta-trzody-chlewnej-w-polsce-poldanor-sa>, dostęp do strony 22 maj 2020 r.

- Przesmycka A., Podstawka M., 2016. Ekonomiczna efektywność inwestycji w biogazownie rolnicze. Stowarzyszenie ekonomistów rolnictwa i agrobiznesu. Roczniki Naukowe, tom XVIII, zeszyt 6, 176-182.
- Romaniuk W., Biskupska K., 2014. Biogazownia rolnicza krok po kroku. Warszawa. Hortpress. ISBN 978-83-61574-58-3, s. 3-32.
- Romaniuk W., Głaszczka A., Biskupska K., 2012. Analiza rozwiązań instalacji biogazowych dla gospodarstw rodzinnych i farmerskich. Inżynieria w rolnictwie, Monografie nr 9, Falenty, wyd. ITP, 94.
- Rusanowska P., Zieliński M., Dudek M.R., Dębowski M., 2018. Mechanical Pretreatment of Lignocellulosic Biomass for Methane Fermentation in Innovative Reactor with Cage Mixing System. Journal of Ecological Engineering Vol. 19(5), 219-224, DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/89822>
- Sadecka Z., 2016. Fermentacja metanowa. Materiały konferencyjne - Konferencja naukowo-techniczna: „Nowatorska produkcja energii w biogazowni poprzez utylizację pomiotu drobiowego z zamianą substratu roślinnego na algi”. <http://obrnemo.pl/wp-content/uploads/2016/05/Fermentacja-metanowa-prof.-Z.-Sadecka.pdf>
- Stowarzyszenie Gmin Turystycznych Pojezierza Gostynińskiego, Biogazrolniczy. <http://www.pojezierzegostyninskie.pl/pliki/file/broszura.pdf> (dostęp od 29.10.2021).
- Szlachta J., 2005. Analiza opłacalności ekonomicznej budowy kotłowni opalanych słomą oraz redukcji emisji gazów przy ich użytkowaniu. Inżynieria Rolnicza. 7, 331-338.
- Szlachta J., Dworaczyk K., 2017. Analiza porównawcza opłacalności budowy i użytkowania mikrobiogazowni rolniczej w odniesieniu do gospodarstwa o obsadzie 100 DJP. Problemy Inżynierii Rolniczej. Z. 3 (97) 83–99.
- Uddin M.A., Siddiki S.Y.A., Ahmed S.F., Rony Z.I., Chowdhury M.A.K., Mofijur M., 2021. Estimation of Sustainable Bioenergy Production from Olive Mill Solid Waste. Energies 2021, 14, 7654, <https://doi.org/10.3390/en14227654>
- Wałowski G., Borek K., Romaniuk W., Wardal W.J., Borusiewicz A., 2019. Modern systems of obtaining energy-biogas. In Monograph; Wacław, R., Ed.; Publishing House of the University of Agribusiness in Łomża: Warsaw, Poland; ISBN 978-83-947669-9-3.
- Wałowski G., Myczko A., Filipczak G., 2017. Technologie produkcji surowego gazu i biogazu w kontekście czystych technologii węglowych oraz odnawialnych źródeł energii. Przemysł chemiczny, 96 (3), 580–591.