

MARTA MARSZAŁEK, MARCIN BANACH, ZYGMUNT KOWALSKI*

UTYLIZACJA GNOJOWICY NA DRODZE FERMENTACJI METANOWEJ I TLENOWEJ – PRODUKCJA BIOGAZU I KOMPOSTU

UTILIZATION OF PIG SLURRY BY ANAEROBIC AND AEROBIC DIGESTION – PRODUCTION OF BIOGAS AND COMPOST

Streszczenie

Intensywny chów zwierząt gospodarskich jest jednym z głównych źródeł zanieczyszczeń środowiska przyrodniczego odchodami. Płynny lub półpłynny odpad z przemysłowej hodowli trzody chlewnej, czyli tzw. gnojowica, stanowi wartościowy nawóz, jednak jej nieprawidłowe magazynowanie, wylewanie i utylizowanie może przyczyniać się do skażenia gleb, wód i powietrza. W artykule przedstawiono metody utylizacji gnojowicy świńskiej na drodze fermentacji metanowej i tlenowej.

Słowa kluczowe: gnojowica, utylizacja, fermentacja metanowa, biogaz, kompost

Abstract

Intensive livestock production is one of the main sources of environmental pollution with excrements. Liquid or semi-fluid waste from industrial pig farming called slurry is a valuable fertilizer, but its incorrect storage, spilling and utilizing may contribute to contamination of soil, water and air. The paper presents methods for utilization of pig slurry by anaerobic and aerobic digestion.

Keywords: pig slurry, utilization, anaerobic digestion, biogas, compost

* Mgr inż. Marta Marszałek, dr inż. Marcin Banach, prof. dr hab. inż. Zygmunt Kowalski, Instytut Chemii i Technologii Nieorganicznej, Wydział Inżynierii i Technologii Chemicznej, Politechnika Krakowska.

1. Wstęp

Dynamiczny wzrost i duża koncentracja hodowli trzody chlewnej wiąże się z powstawaniem znacznej ilości odchodów, co stwarza potencjalne zagrożenie dla środowiska naturalnego. Skazaeniu mogą ulec gleby, wody (powierzchniowe, gruntowe i opadowe) oraz powietrze. Odpady z produkcji zwierzęcej są przede wszystkim źródłem uciążliwości zapachowej dla mieszkańców sąsiadujących z fermami trzody chlewnej. Ponadto mogą powodować przesylenie wód oraz gleb związkami fosforu i azotu, eutrofizację wód powierzchniowych, a także zanieczyszczenie atmosfery amoniakiem i gazami cieplarnianymi (metan, dwutlenek węgla, tlenek azotu(I) i siarkowodór) [1–5].

Za najbardziej niekorzystny dla otoczenia uznawany jest bezściółkowy chów trzody chlewnej, generujący powstawanie dużych ilości gnojowicy, którą należy zagospodarować w taki sposób, aby nie naruszać równowagi w przyrodzie. Gnojowica zaliczana jest do płynnych lub półpłynnych nawozów organicznych pochodzenia zwierzęcego, które można zastosować na użytkach rolnych oraz do nawożenia użytków zielonych. Stanowi ona mieszaninę kału, moczu, resztek karmy oraz wody stosowanej głównie do celów higieniczno-porządkowych w pomieszczeniach chlewni. Skład gnojowicy waha się w stosunkowo szerokich granicach i zależy od wielu czynników, w szczególności od rodzaju i wieku zwierząt, systemu ich żywienia i utrzymania oraz ilości zużywanej wody. Gnojowica na ogół zawiera 8–10% suchej masy, przy czym do 8% suchej masy klasyfikowana jest jako rozcieńczona, natomiast powyżej 8% jako gęsta. Jest ona także ważnym źródłem azotu, fosforu, potasu, wapnia oraz innych składników nawozowych, które mogą być wykorzystane w produkcji rolnej. Średnia zawartość głównych składników pokarmowych w gnojowicy trzody chlewnej kształtuje się na poziomie: azot 0,41%, fosfor 0,15%, potas 0,19%, magnez 0,04%, wapń 0,13% [2–7]. Ilość powstającej w gospodarstwie gnojowicy zależy od ilości wydalanych przez zwierzęta odchodów i od rozcieńczenia wodą. Szacuje się, że ilość wydalanego kału i moczu od jednej sztuki dorosłej wynosi średnio 45 kg na dobę. Standardowe zużycie wody do utrzymania higieny pomieszczeń inwentarskich nie powinno przekraczać 10 dm³ dziennie. Łącznie uzyskuje się około 55 kg gnojowicy na dobę, co w przeliczeniu na 1 rok daje około 20 m³ gnojowicy od jednej dorosłej sztuki. Wzrost produkcji gnojowicy w Polsce notuje się od lat siedemdziesiątych XX wieku, ponieważ od tego okresu rozpowszechnił się bezściółkowy system hodowli trzody chlewnej [6].

Gnojowica wymaga odpowiedniego wykorzystania lub unieszkodliwienia zgodnie z obowiązującymi przepisami. Obecnie do najważniejszych i najbardziej zasadnych kierunków zagospodarowania gnojowicy zalicza się jej agrotechniczne użycie jako nawozu naturalnego, fermentację beztlenową prowadzącą do pozyskania biogazu oraz produkcję kompostu [5].

Ze względu na zawartość składników pokarmowych wykorzystywanych przez rośliny, przede wszystkim łatwo dostępnego azotu, fosforu i potasu gnojowica jako pełnowartościowy nawóz organiczny pozwala ograniczyć stosowanie nawozów mineralnych na użytkach rolnych. Składniki nawozowe w gnojowicy występują zarówno w formach organicznych jak i mineralnych, rozpuszczalnych w wodzie i dlatego są dobrze przyswajane przez rośliny. Racjonalne rolnicze zastosowanie gnojowicy wiąże się z określeniem wielkości dawki dostosowanej do wymagań nawozowych uprawianej rośliny, a następnie równomiernym jej rozprowadzeniem na polu. Nawóz ten powinno się aplikować w okresach intensywnej wegetacji roślin, to jest zazwyczaj wiosną lub jesienią, zachowując jednocześnie zasadę nie przekraczania rocznej dawki 170 kg azotu całkowitego na 1 hektar użytków rolnych, co odpowiada 45 m³ gnojowicy na hektar [2,5–7].

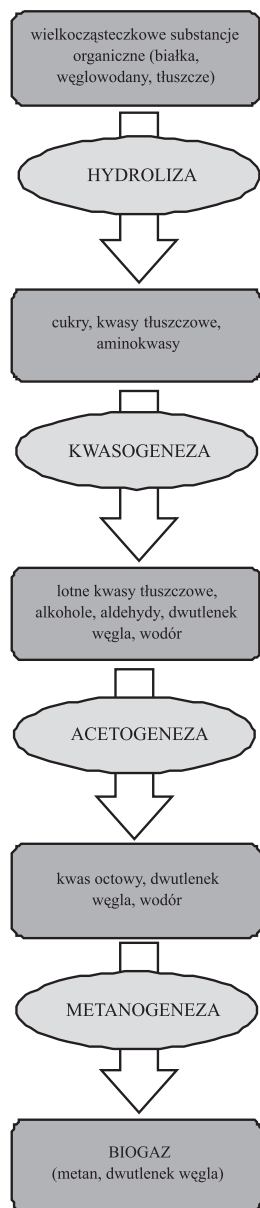
2. Fermentacja metanowa i produkcja biogazu

Niekorzystny wpływ gnojowicy na środowisko naturalne może zostać zminimalizowany w wyniku zastosowania odpowiednich sposobów jej utylizacji. Jednym z nich jest fermentacja metanowa (beztlenowa) gnojowicy w biogazowniach rolniczych.

Fermentacja metanowa (anaerobowa) jest kilkustopniowym procesem biochemicznym zachodzącym w kontrolowanych warunkach beztlenowych w wyniku działania określonego środowiska bakteryjnego (bakterie fermentacyjne rozkładają materiał biologiczny do kwasów, alkoholi, wodoru i dwutlenku węgla; bakterie kwasotwórcze rozkładają alkohole i kwasy do kwasu octowego, wodoru i dwutlenku węgla; bakterie metanowe przerabiają kwas octowy, wodór i dwutlenek węgla do metanu) [5,8–11]. W procesie fermentacji metanowej, zobrazowanej schematycznie na rysunku 1 można wyróżnić cztery główne fazy: hydrolizę (uwolnienie wielocząstkowych związków organicznych), kwasogenezę inaczej zwaną fazą zakwaszania, kwaśną bądź też acidogenną (produkcja kwasów organicznych), acetogenezę zwaną także fazą acetogenną lub octanogenną (przetwarzanie lotnych kwasów tłuszczowych do kwasu octowego), metanogenezę zwaną fazą metanogenną (produkcja metanu) [8–12].

Produktem fermentacji jest biogaz – roztwór gazowy składający się głównie z metanu i dwutlenku węgla oraz przefermentowany odpad. Zawartość poszczególnych składników w biogazie jest zmienna (metan 40–80%, dwutlenek węgla 20–60%, siarkowodór 0,1–5,5%, azot do 3% oraz małe ilości wodoru, tlenu i tlenku węgla) i zależy od procesu technologicznego zastosowanego w biogazowni oraz użytego materiału wsadowego [5,8–12]. W procesie fermentacji beztlenowej oprócz metanu powstaje również substancja przefermentowana, którą można zastosować do nawożenia pól. W przefermentowanej masie ulegają zniszczeniu nasiona chwastów oraz eliminowane są czynniki chorobotwórcze zawarte w odchodach zwierząt, dlatego jest ona cennym nawozem organicznym [12, 14].

Na wydajność procesu fermentacji mają wpływ zarówno czynniki fizyczne (temperatura, mieszanie, światło) jak i chemiczne (pH, potencjał redox, stosunek węgla do azotu, tlen). W zależności od temperatury fermentację metanową można podzielić na psychrofilną (4–30°C), mezofilną (31–40°C) oraz termofilną (50–60°C), przy czym w praktyce komory fermentacyjne najczęściej przystosowane są do pracy w warunkach temperatur mezofilnych. Mieszanie zapobiega tworzeniu się osadu i kożucha oraz zapewnia jednorodność temperatury w całej masie zbiornika. Warunki świetlne w trakcie procesu fermentacji powinny być ustabilizowane, gdyż nagła zmiana oświetlenia w komorze fermentacyjnej może spowodować spowolnienie, a nawet zatrzymanie produkcji biogazu. Bakterie beztlenowe wywołujące fermentację metanową wymagają odczynu obojętnego (pH około 7), ponieważ przy pH niższym od 6 i wyższym od 8 proces szybko zanika. Co więcej do produkcji metanu bakterie wymagają bardzo niskiego potencjału redox (250 mV lub niższego), który jest tworzony przez pary metanu, dwutlenku węgla, wodoru oraz proton wodorowy. Jeżeli w fermentującym substracie znajdują się inne pary buforowe (np. powietrze) powodujące podwyższenie potencjału redox, to aktywność bakterii metanowych spada. Aby rosnąć i rozmnażać się, populacja bakterii wymaga także odpowiedniej ilości pożywki, dlatego stosunek C/N nie powinien przekraczać 100/3. Ogromne znaczenie w procesie fermentacji metanowej gnojowicy ma jej właściwe przygotowanie przed załadowaniem do komory fermentacyjnej, które powinno być możliwie krótkie. Czynnikiem powodującym przerwanie procesu fermentacji metanowej jest pojawienie się w zbiorniku najmniejszych nawet śladów tlenu [5, 8, 12, 14].



Rys. 1. Schemat fermentacji beztlenowej [10]

Fig. 1. Scheme of the anaerobic digestion [10]

Badania nad procesem fermentacji metanowej w warunkach mezofilnych (36°C) oraz dużego stężenia azotu amonowego gnojowicy pochodzącej z bezściółkowej hodowli trzody chlewnej przeprowadzili między innymi Bohdziewicz i Kuglarz [7]. Proces fermentacji beztlenowej realizowali w bioreaktorze o pojemności roboczej 3 dm³ dla następujących wartości hydraulicznego czasu zatrzymania (HRT): 15, 18, 20, 23, 25, 30, 35 oraz 40 dni. Na podstawie dokonanych eksperymentów stwierdzili, iż fermentacja metanowa analizowanej gnojowicy w warunkach dużego stężenia azotu amonowego (5760÷6390 mg NH₄/dm³) okazała

się procesem efektywnym dla HRT w zakresie od 25 do 35 dni. Największą ilość biogazu na poziomie $0,86 \text{ dm}^3/(\text{dm}^3 \times \text{d})$ oraz stopień usunięcia suchej masy organicznej 45,2% uzyskali dla HRT równego 30 dni. W przypadku prowadzenia fermentacji beztlenowej dla wartości HRT poniżej 25 dni odnotowali znaczne zmniejszenie dobowej produkcji biogazu oraz stopnia redukcji suchej masy organicznej [7].

Substratem szczególnie nadającym się do procesu fermentacji metanowej, a tym samym do produkcji biogazu mogą być odpady organiczne powstające w produkcji zwierzęcej (gnojowica, obornik, gnojówka), osady ściekowe, odpady z produkcji rolnej (np. odpady zbożowe, odpady z pasz), celowo hodowane rośliny energetyczne (np. kukurydza, sorgo, amarantus, trawa sudańska, burak pastewny, burak cukrowy, pszenżyto, pszenica, jęczmień, rzepak, lucerna, ziemniak), surowce z przemysłu spożywczego (np. wyłoki owoców, odpady browarniane, rzeźnicze i z gorzelnii, melasa, pióra, odpadowe tłuszcze) i inne. Doskonałym substratem jest gnojowica, ponieważ posiada dużą zawartość wody, dużą pojemność buforową oraz szeroką gamę składników odżywczych niezbędnych dla bakterii beztlenowych [7–13].

Badania przeprowadzone w laboratorium Katedry Inżynierii Ochrony Środowiska Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie wykazały, iż dobrym substratem w procesie fermentacji metanowej jest mieszanka składająca się z kiszonki kukurydzy oraz gnojowicy świńskiej, z niewielkim udziałem poprodukcyjnych odpadów młynskich. Pozwala ona na uzyskanie biogazu, w którym udział metanu stanowi ponad 60%. Na podstawie przeprowadzonych eksperymentów udowodniono także, iż najwyższą intensywnością wytwarzania biogazu (najwyższa całkowita ilość otrzymanego biogazu oraz najlepszy skład jakościowy) charakteryzowały się te warianty technologiczne, w których wagowy stosunek kiszonki kukurydzy do gnojowicy zawierał się w przedziale od 1:1 do 2:1 [15].

W celu zwiększenia produkcji metanu w procesie fermentacji beztlenowej Campos, Palatsi i Flotats [13] testowali jako mieszanki substratowe gnojowicę świńską zmieszaną z wytlótkami z gruszek oraz gnojowicę świńską zmieszaną z ziemią bielącą pochodzącą z rafinacji oleju. Fermentacja gnojowicy i ziemi bielącej w warunkach mezofilnych dała 2,4 razy więcej metanu niż w przypadku fermentacji samej gnojowicy. Głównym efektem dodatku wytlózków z gruszek był wzrost zawartości materii organicznej [13].

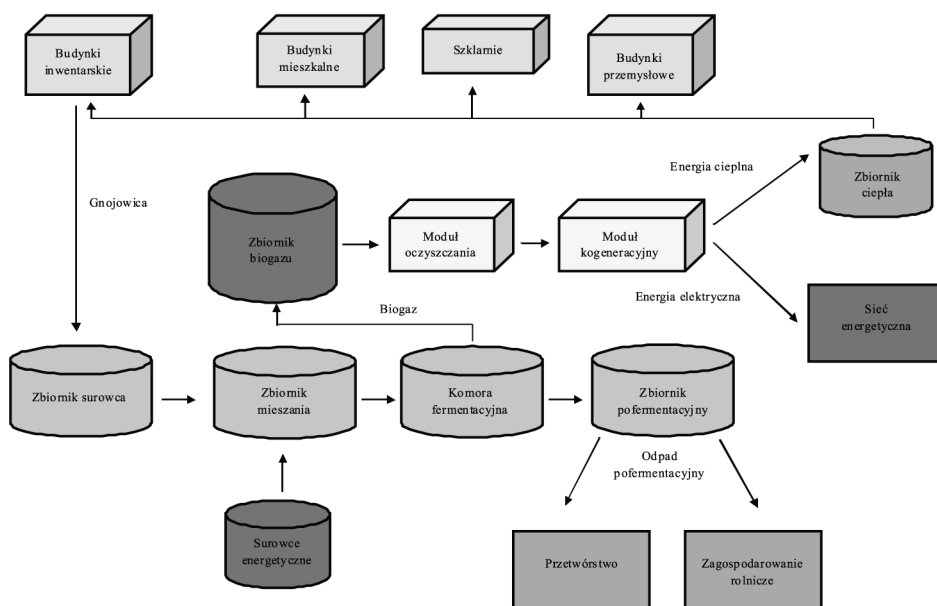
Czas fermentacji w procesie beztlenowym zależy od pochodzenia gnojowicy i dla gnojowicy od trzody chlewnej wynosi 10–15 dni. Uzysk biogazu na 1 świnie na dzień wynosi $0,2\text{--}0,3 \text{ m}^3$. Wartość opałowa biogazu z fermentacji metanowej odchodów zwierzęcych wynosi $21\text{--}23 \text{ MJ/m}^3$ [12].

2.1. Ogólny schemat instalacji do produkcji biogazu

Biogaz można uzyskiwać w małych jednostkach działających w skali gospodarstwa lub w dużych jednostkach scentralizowanych. Biogazownie scentralizowane są przede wszystkim rozwijane w Danii i Szwecji, a ich główną zaletą jest możliwość jednoczesnego przerabiania różnych rodzajów odpadów. Wypiecjalizowane zakłady produkcji biogazu wykorzystują jako substrat gnojowicę lub obornik zmieszane z innymi odpadami organicznymi. Obecnie w Europie pracuje ponad 65 dużych biogazowni, z czego aż 22 w Szwecji. Krajem, który szczególnie inwestuje w biogazownie (indywidualne i scentralizowane) są Niemcy, które ponad 23% wytworzonego obornika zużywają do produkcji biogazu. W Niemczech pod koniec

2005 roku działało około 2600 zakładów, z czego 90% stanowiły biogazownie rolnicze. Dla porównania w Polsce funkcjonuje obecnie jedna biogazownia rolnicza [16].

Zarówno biogazownie scentralizowane jak i indywidualne charakteryzują się podobnym ciągiem technologicznym. Głównymi elementami instalacji do produkcji biogazu z gnojowicy są: budynek inwentarski (chlewnia), zbiornik surowca, komora fermentacyjna, zbiornik biogazu, instalacja zasilająca komorę fermentacyjną, instalacja grzewcza, instalacja gazowa wraz z urządzeniami do oczyszczania gazu, urządzenia do produkcji energii elektrycznej i/lub ciepła, zbiornik na masę pofermentacyjną. Ogólny schemat biogazowni rolniczej przedstawiono na rysunku 2 [5, 8, 12].



Rys. 2. Schemat biogazowni rolniczej [5, 8, 12]

Fig. 2. Flowsheet of the agricultural biogas plant [5, 8, 12]

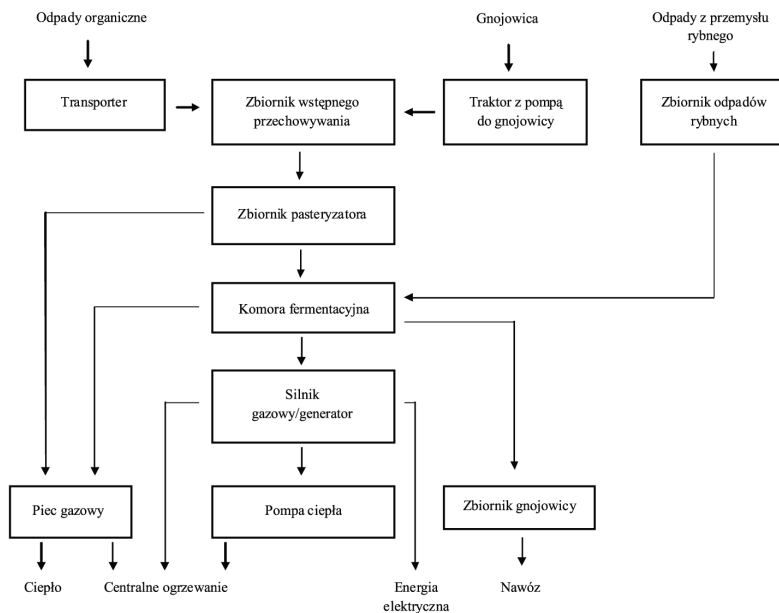
2.2. System NaWaRo produkcji biogazu

System produkcji biogazu „NaWaRo” wdrażany w Niemczech wykorzystuje głównie kiszonki z roślin (kukurydza), a także gnojowicę oraz ziarna zbóż. Biogazownia według tego projektu składa się z komory fermentacyjnej i pofermentacyjnej oraz modułu kogeneracyjnego. Kosubstraty zgromadzone są uprzednio w zbiornikach wstępnych (gnojowica), a kiszonki po rozdrobieniu i homogenizacji stają się wkładem energetycznym do instalacji biogazowej. Nośnikiem energetycznym jest biometan. Udział kiszonek zależy od stężenia suchej masy w fermentorze. I tak na przykład dla biogazowni o mocy 500 kWe, przy zaaplikowaniu 55 ton gnojowicy świńskiej na dobę wymagane jest użycie 22 ton kiszonki na dobę. Użycie takich ilości substratów umożliwia uzyskanie biogazu o zawartości 53,66% biometanu. Utrzymanie właściwego stężenia wsadu w przestrzeni fermentora zapewniają miesza-

dła mechaniczne. Osad pofermentacyjny jest transportowany do komory pofermentacyjnej, w której zachodzi proces wygaszania fermentacji i odgazowania osadu. W dalszym etapie osad ten wykorzystywany jest jako nawóz rolniczy. Wyprodukowany biometan, po oczyszczeniu ze związków siarki (siarkowodoru), jest kierowany do modułu kogeneracyjnego, w którym energia chemiczna biogazu ulega konwersji na energię elektryczną oraz ciepłą. Modułem kogeneracyjnym jest silnik gazowy napędzający turbinę. Część wyprodukowanej energii jest przeznaczona na pokrycie własnych potrzeb, natomiast nadwyżka jest sprzedawana odbiorcom zewnętrznym. Podczas prac naprawczych i konserwujących (np. wymiana oleju, wymiana filtrów), gdy instalacja kogeneracyjna nie pracuje, urządzeniem spalającym biogaz jest pochodnia gazowa. Dodatkowo elektrociepłownia biogazowa zaopatrzona jest w urządzenia i podzespoły zapewniające bezpieczną eksploatację (system detekcji biogazu, niezależne systemy zabezpieczeń poziomów oraz ciśnień), a także zdalny monitoring (automatyka sterująca i kontrolująca) [8].

2.3. Pierwsza duńska biogazownia scentralizowana – Vester Hjermitslev

Biogazownia Vester Hjermitslev (rys. 3) została wybudowana w 1984 roku i była pierwszą centralną biogazownią w Danii. Aktualnie instalacja zasilana jest odpadami z kilku gospodarstw hodowlanych. Substratem do otrzymywania biogazu jest gnojowica mieszana z odpadami z przemysłu rybnego, paszowego oraz z garbarni. Proces zachodzi w warunkach mezofilnych, a przefermentowana biomasa poddawana jest higienizacji przez 4,5 godziny w temperaturze 57°C. Wyprodukowany biogaz spalany jest w dwóch układach kogeneracyjnych o mocy elektrycznej 770 kW i 840 kW, natomiast odpad pofermentacyjny zużywany jest do nawożenia pól. W zakładzie funkcjonuje również kocioł gazowy o mocy 250 kW. Podstawowe dane dotyczące biogazowni Vester Hjermitslev przedstawiono w tabeli 1 [5, 16, 17].



Rys. 3. Schemat biogazowni Vester Hjerimitslev [5, 17]

Fig. 3. Flowsheet of the Vester Hjerimitslev biogas plant [5, 17]

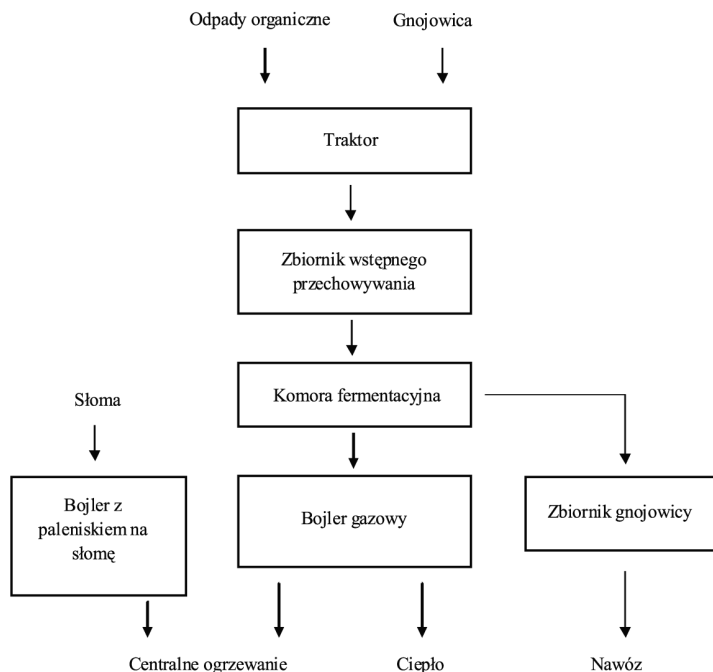
Tabela 1

Podstawowe dane dotyczące biogazowni Vester Hjerimitslev [5, 16, 17]

Gnojowica	41 ton/dzień
Pozostała biomasa	13 ton/dzień
Produkcja biogazu	1 ml Nm ³ /rok
Pojemność komory fermentacyjnej	1500 m ³
Temperatura procesu	37°C

2.4. Biogazownia Davinde (Dania)

Duńska biogazownia Davinde (rys. 4) uruchomiona została w 1988 roku. Jest to mała scentralizowana instalacja, której właścicielami jest 11 rolników, spośród których, sześciu jest dostawcą gnojowicy (trzech świńskiej i trzech bydłowej). Biogazownia wykorzystuje również słomę oraz odpady z przemysłu rybnego. Proces produkcji biogazu przebiega w warunkach mezofilnych w instalacji jednoetapowej, pozbawionej węzła higienizacji oraz układu kogeneracyjnego. Biogaz spalany jest w kotle gazowym, a uzyskane ciepło wykorzystywane jest w procesie produkcyjnym. Odpad pofermentacyjny stanowi cenny nawóz. Podstawowe dane dotyczące biogazowni Davinde przedstawiono w tabeli 2 [5, 16, 17].



Rys. 4. Schemat biogazowni Davinde [5, 17]

Fig. 4. Flowsheet of the Davinde biogas plant [5, 17]

Tabela 2

Podstawowe dane dotyczące biogazowni Davinde [5, 16, 17]

Gnojowica	25 ton/dzień
Pozostała biomasa	3 tony/dzień
Produkcja biogazu	0,3 ml Nm ³ /rok
Pojemność komory fermentacyjnej	750 m ³
Temperatura procesu	36°C

2.5. Biogazownia z komorą fermentacyjną o pojemności 25 m³ według projektu IBMER

Gnojowica z budynku inwentarskiego sływa grawitacyjnie kanałem do zbiornika gnojowicy świeżej, w którym jest mieszana przy użyciu pompy, a następnie transportowana przewodem zasilającym do komory fermentacyjnej, zasilanej raz dziennie dobową produkcją gnojowicy. Proces fermentacji w komorze przebiega w sposób ciągły, przy cyklicznym zasilaniu porcjami świeżej gnojowicy. Komora fermentacyjna wyposażona jest w rurociągi przelewowy i spustowy, które zapewniają odprowadzenie do zbiornika gnojowicy przefermentowanej, tej samej ilości gnojowicy przefermentowanej, jaka została dolana. W ciągu

dobę zawartość komory mieszana jest za pomocą mieszadła trzy razy po 10 minut. Mieszanie i transport gnojowicy wymagają zastosowania drugiej pompy. Obecność dwóch pomp w układzie daje możliwość odprowadzenia gnojowicy przez zawór trójdrożny do wozu asenizacyjnego. Gaz z komory fermentacyjnej przesyłany jest rurociągiem wyposażonym w bezpiecznik cieczowy, przerywacz płomienia, odwadniacz i odsiarczalniki do zbiornika gazu. Bezpiecznik cieczowy chroni instalację gazową przed nadmiernym wzrostem ciśnienia poprzez odprowadzenie nadmiaru gazu do atmosfery. Dodatkowo uniemożliwia przedostanie się powietrza do rurociągu, a jego konstrukcja pozwala na regulowanie ciśnienia gazu. Przerywacz płomienia zabezpiecza się przed cofnięciem się płomienia, natomiast odwadniacz i odsiarczalniki służą do oczyszczania gazu. Proces odsiarczania polega na przepuszczeniu gazu przez masę odsiarczającą, której głównym komponentem jest ruda darniowa. Ilość powstałego gazu mierzona jest za pomocą licznika gazu. Gaz magazynowany jest w zbiorniku stalowym dzwonowym, a następnie kierowany jest do kotła, który pracuje w dwóch systemach (na energię elektryczną oraz na biogaz). Do utrzymania w komorze fermentacyjnej temperatury około 35°C stosowana jest ciepła woda doprowadzana rurami stalowymi z kotła do nagrzewnicy komory. W wyniku fermentacji metanowej gnojowicy w biogazowni o pojemności komory 25 m³ według projektu IBMER powstaje około 25 m³ gazu dziennie o wartości opałowej 20–26 MJ/m³, który może zostać zużyty na podgrzanie komór fermentacyjnych oraz do celów bytowych w gospodarstwie domowym. Z kolei przefermentowana masa gnojowicy może zostać zastosowana jako nawóz [5].

2.6. Technologia produkcji biogazu i kompostu w biogazowni z komorą fermentacyjną o pojemności 100 m³ według projektu IBMER

Gnojowica z budynku inwentarskiego sływa grawitacyjnie kanałem do zbiornika wstępnego, w którym jest mieszana przy użyciu pompy wirowej, a następnie transportowana rurociągiem zasilającym do komory fermentacyjnej, zasilanej raz dziennie dobową produkcją gnojowicy. Komora fermentacyjna wyposażona jest w rurociąg przelewowy, który zapewnia odprowadzenie do zbiornika magazynującego, takiej samej ilości gnojowicy przefermentowanej, jaka została dolana. W ciągu doby zawartość komory mieszana jest za pomocą mieszadła hydraulicznego trzy razy po 10 minut. Pompa układu mieszania (typu UM 200–125) zasysa gnojowicę z dolnej części komory i tłoczy ją do części górnej. Aby zapobiec gromadzeniu się osadów na dnie komory istnieje możliwość przetłaczania jej do górnej części komory. Gaz z komory fermentacyjnej przesyłany jest rurociągiem wyposażonym w bezpiecznik cieczowy, przerywacz płomienia, odwadniacz i dwa odsiarczalniki do zbiornika gazu. Oczyszczanie gazu odbywa się w dwóch odsiarczalnikach pracujących szeregowo i polega na przepuszczeniu gazu przez masę odsiarczającą, umieszczoną na półkach odsiarczalników. Ilość powstałego gazu mierzona jest za pomocą licznika gazu. Gaz magazynowany jest w zbiorniku dzwonowym, a następnie kierowany jest do kotła wodnego, który pracuje w dwóch systemach (na energię elektryczną oraz na biogaz). Do podgrzania gnojowicy do około 35°C stosowana jest ciepła woda doprowadzana rurami stalowymi z kotła do nagrzewnicy komory. Stałą temperaturę gnojowicy w komorze uzyskuje się dzięki zastosowaniu termostatu. Poddając utylizacji 5 m³ gnojowicy w instalacji zawierającej komorę fermentacyjną o pojemności 100 m³ można uzyskać w ciągu doby około 70 m³ biogazu [5].

2.7. Trendy w rozwoju technologii budowy biogazowni rolniczych

Istnieje wyraźna tendencja do budowania coraz większych obiektów z założeniem współfermentacji odpadów komunalnych i rolniczych. W celu intensyfikacji produkcji biogazu dąży się do jak największej automatyzacji procesu fermentacji beztlenowej. Kolejny zauważalny trend w przypadku biogazowni to zgodne z zasadami zrównoważonego rozwoju jak najlepsze zagospodarowanie wszystkich strumieni produktów i półproduktów. Przykładem bezodpadowej technologii może być BIOREK, gdzie minimalizację odpadów stałych osiąga się poprzez dwustopniową fermentację, a z półproduktów są separowane i koncentrowane substancje użyteczne. Nadmiar wody procesowej w instalacji jest uzdatniany do wody pitnej w procesie odwróconej osmozy.

Istotny postęp dokonuje się także w dziedzinie wykorzystania wytworzonego biogazu. Jest on najczęściej konwertowany na energię cieplną i elektryczną w silnikach spalinowych, niekiedy jest również konwertowany chemicznie do postaci paliwa ciekłego – biometanolu, który może stanowić biokomponent do paliw silnikowych. Warty odnotowania jest także kierunek polegający na opracowywaniu technologii łączących w sobie zarówno fermentację beztlenową jak i tlenową (kompostowanie) [10].

2.8. Korzyści wynikające z zastosowania procesu fermentacji metanowej w rolnictwie

Proces fermentacji beztlenowej gnojowicy świńskiej oraz innych odpadów pochodzenia rolniczego posiada szereg zalet. Główne atuty tego procesu to utylizacja gnojowicy (także gnojówki, obornika i innych odpadów), uzyskanie energii (elektrycznej i cieplnej), uzyskanie wartościowego nawozu organicznego (azot, fosfor i potas występują w postaci łatwo przyswajalnej dla roślin), ograniczenie emisji metanu, dwutlenku węgla i amoniaku do atmosfery, higienizacja odchodów zwierzęcych (redukcja do minimum ilości bakterii chorobotwórczych, likwidacja przykrego zapachu), zmniejszenie eutrofizacji rzek i jezior [5, 12].

3. Kompostowanie i produkcja kompostu

Produkcja kompostu jest kolejnym etapem w procesie zagospodarowania gnojowicy w celu jej bardziej intensywnego wykorzystania. Kompostowanie jest przyjazną dla środowiska i ekonomiczną alternatywą dla innych metod utylizacji odpadów organicznych. Kompostowanie przekształca aktywne składniki odpadów organicznych w stabilny produkt, który może być stosowany jako źródło substancji odżywczych dla roślin oraz jako substancja poprawiająca żyzność i właściwości fizyczne gleb oraz zwiększająca zawartość materii organicznej w glebie. Podczas aplikowania kompostu ważne jest, aby był to produkt dojrzały i stabilny, ponieważ niedojrzały kompost może niekorzystnie wpłynąć na środowisko i wywołać fitotoksyczność roślin [1, 18–20].

Kompostowanie to proces biologicznego rozkładu materii organicznej, w którym kluczową rolę odgrywają bakterie tlenowe. Proces ten prowadzi do zniszczenia patogenów, przekształcenia azotu z formy amonowej do stabilnej formy organicznej oraz zmniejszenia ilości odpadów. Większość zmian, które mają miejsce podczas kompostowania, jak również jakość produktu końcowego oraz szybkość procesu determinuje flora bakteryjna. Mikroorganizmy wytwarzają hydrolityczne enzymy zewnątrzkomórkowe, które rozkładają duże nie-

rozpuszczalne związki organiczne do mniejszych, rozpuszczalnych w wodzie fragmentów. Na przebieg procesu kompostowania oraz właściwości otrzymanego produktu końcowego wpływają również następujące parametry: wilgotność, temperatura, zawartość tlenu, pH, stosunek C/N, wielkość cząstek, stopień upakowania [1, 21, 22]. Najważniejszym wskaźnikiem efektywności procesu kompostowania jest temperatura, która z kolei jest zależna od szybkości napowietrzania (zwykle odbywa się ono za pomocą pomp). Najlepszy zakres temperatur dla kompostowania to 55–65°C, gdyż w tym przedziale temperatur ginie większość drobnoustrojów chorobotwórczych i nasion roślin. Ta temperatura jest także najlepsza dla bakterii termofilnych, które najszybciej rozkładają biomasę. Zalecane jest, aby temperatura w trakcie procesu kompostowania nie przekroczyła 65°C, gdyż powyżej tej wartości nastąpi śmierć większości mikroorganizmów i proces zostanie zahamowany. Na temperaturę osiągniętą w przemyśle kompostowej ma wpływ ilość tlenu dostępna dla mikroorganizmów [1].

Obróbka tlenowa gnojowicy świńskiej, stosowana jest w celu obniżenia emisji odorów, a w niektórych przypadkach w celu redukcji zawartości azotu. Ciekłe odchody trzody chlewnej są kompostowane poprzez napowietrzanie (ciekłe kompostowanie) lub mieszanie z odpowiednią ilością ściółki. Mieszanina taka kompostowana może być w kopcach lub beczkach [21].

Przefermentowana gnojowica może być mieszana z pociętą słomą pokombajnową, torfem i innymi odpadami rolniczymi, a następnie kierowana do otwartej komory gnojowej zraszanej świeżą gnojowicą, w której przebywa około trzech miesięcy. W pierwszym stadium procesu kompostowania, w wyniku zaszczepienia bakteriami metanowymi z przetworzonej w biogazowni gnojowicy, zachodzą przede wszystkim procesy beztlenowe. Następuje szybki rozkład cukrów złożonych i lipidów do związków prostych i ich mineralizacja. W dalszym etapie kompostowana masa jest napowietrzana. W masie słomy rozpoczyna się proces fermentacji tlenowej, temperatura wzrasta do około 50–60°C. Pod koniec procesu temperatura spada. Wówczas należy powstałą masę wymieszać i ułożyć na płycie kompostowej, gdzie cała masa jest dodatkowo napowietrzana za pomocą dmuchawy. Tak kompostowana masa przechowywana jest przez okres około jednego miesiąca [5].

3.1. Przykład kompleksowego zagospodarowania gnojowicy w biogazowni rolniczej z komponentem kompostowni

Przykładem rozwiązania kwestii kompleksowej utylizacji gnojowicy jest biogazownia rolnicza wraz z komponentem kompostowni zrealizowana w gospodarstwie A. Bartnickiego w Duchnowie. Ściany biogazowni i kompostowni wykonane są z elementów betonowych drobnowymiarowych, opartych na fundamentach wzniesionych na palach. Przednia ściana komór skonstruowana jest z drewnianych belek, które można rozebrać, co umożliwi wjazd ciągnika wraz z przyczepą i ładowarką do wnętrza komory podczas rozładunku. Dno komór na całej swej długości posiada kanalik ściekowy połączony z umiejscowionym poza komorami zbiornikiem, w którym gromadzi się odciek gnojowy. W obydwu komorach można pomieścić około 900 m³ masy kompostowej, przy czym wymiary jednej komory są następujące: długość 25 m, szerokość 6 m, wysokość 3 m. Po trzech miesiącach fermentacji w komorach kompostowania, wykonanych w kształcie silosu zagłębionego o około jeden metr w stosunku do poziomu terenu kompostowana masa poddawana jest dalszej obróbce na płycie kompostowej zaopatrzonej w kanał, do którego tłoczone jest powietrze przy pomocy wentylato-

ra. Przy przeładunku z komór fermentacyjnych masa mieszana jest z korą i trocinami oraz innymi dodatkami, a następnie rozdrabniana. Po całkowitym załadunku płyty kompostowej masa poddawana jest napowietrzaniu przez około jeden miesiąc. Końcowy produkt kompostowania charakteryzuje się dużym stopniem biodegradacji (około 60%) i higienizacji, jest również bezpieczny dla ludzi i środowiska zarówno pod względem bakteriologicznym, jak i chemicznym. Masa organiczna po kompostowaniu ma wilgotność ponad 60%, dlatego należy ją osuszyć do około 40%. Suszenie prowadzi się na słońcu (przy sprzyjającej pogodzie) bądź w suszarni podłogowej z nawiewem ciepłego powietrza. Następnie wysuszona masa poddawana jest przesianiu w celu eliminacji zanieczyszczeń mechanicznych oraz rozdrobnieniu. Tak przygotowana masa jest kluczowym składnikiem nawozu, na bazie którego opracowano dwie mieszanki nawozowe: BIOKOM-1 o pH=7,5 przeznaczony do nawożenia warzyw, upraw polnych, działkowych, w szklarniach i tunelach oraz BIOKOM-2 o pH = 5,5 mający zastosowanie w uprawach roślin iglastych. Skład ilościowy obu mieszanek nawozowych przedstawiono w tabeli 3 [5].

Tabela 3

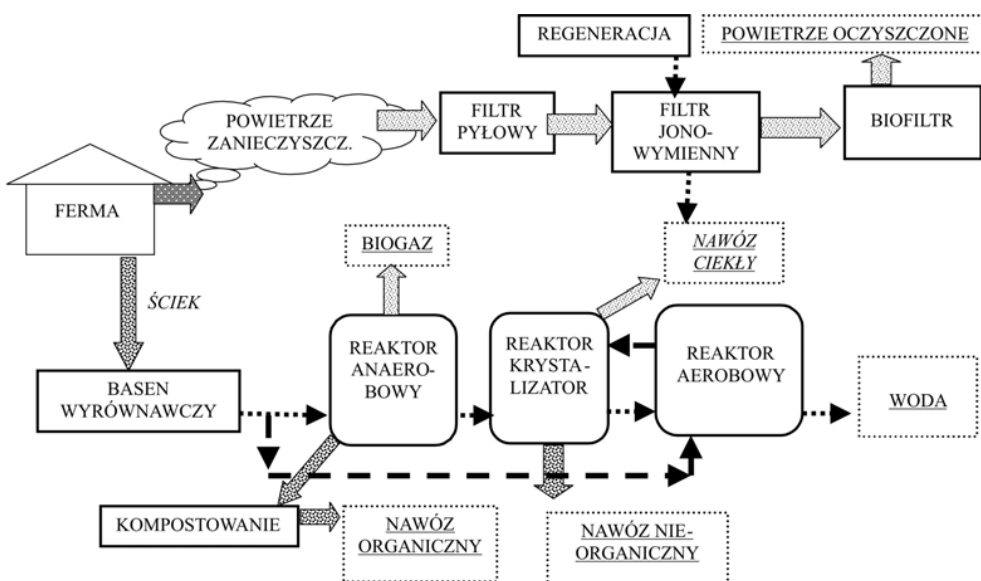
Skład ilościowy mieszanek nawozowych BIOKOM-1 i BIOKOM-2 [5]

BIOKOM-1		BIOKOM-2	
Składnik	Proporcje objętościowe (%)	Składnik	Proporcje objętościowe (%)
Kompost	60	Kompost	30
Torf	10	Torf	50
Kora drzew iglastych	10	Kora drzew iglastych	10
Pomiot kurzy	10	Magnezyt	5
Dolomit	10	Siarczan amonu	5

4. Zintegrowana technologia oczyszczania ciekłych odpadów z hodowli trzody chlewnej

Zintegrowana technologia przetwarzania ciekłych odpadów z chowu trzody chlewnej na produkty nie zagrażające w sposób bezpośredni środowisku to wspólny projekt realizowany przez Instytut Technologii Nieorganicznej i Nawozów Mineralnych Politechniki Wrocławskiej oraz podobne ośrodki, a także przedsiębiorstwa komercyjne z Hiszpanii, Holandii, Wielkiej Brytanii, Rosji i Francji. Celem owego projektu jest opracowanie i wdrożenie technologii kompleksowej obróbki ścieków z ferm trzody chlewnej, która przyczyni się do zmniejszenia zanieczyszczenia gleb i wód oraz do istotnych oszczędności energii dzięki produkcji nawozów nieorganicznych i organicznych oraz biogazu. Zadaniem zintegrowanej technologii jest wydzielenie istotnych składników w postaci produktów pozwalających nie tylko na bezpieczne użytkowanie ich na miejscu, ale także na ich transport na większe odległości. Zintegrowana technologia oczyszczania gnojowicy, przedstawiona w sposób schematyczny na rysunku 5 składa się z procesów i operacji jednostkowych znanych przede

wszystkim z dziedziny oczyszczania ścieków i gazów, a także unieszkodliwiania odpadów stałych. Technologia ta polega na sprzężeniu i wzajemnej współpracy procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych, takich jak mechaniczne oczyszczanie ścieków, kompostowanie, fermentacja beztlenowa, obróbka chemiczna ścieków, biochemiczna przeróbka tlenowa, filtracja, procesy jonowymienne, oczyszczanie biologiczne gazów procesowych itp. Zintegrowana technologia zagospodarowania ciekłych odpadów z przemysłowej hodowli trzody chlewnej powinna być wprowadzana przede wszystkim na obszarach wysokiej koncentracji produkcji zwierzęcej [2].



Rys. 5. Schemat zintegrowanej technologii oczyszczania ścieków hodowlanych [2]

Fig. 5. The integrated-treatment scheme intended to purify livestock farm wastes [2]

5. Wnioski

Intensywna hodowla trzody chlewnej powoduje powstawanie dużych ilości trudnej do utylizacji gnojowicy, będącej jednym ze źródeł skażenia środowiska naturalnego. W wielu przypadkach gnojowica bywa gromadzona i składowana bez żadnych zabezpieczeń w tzw. lagunach, które w sposób bezpośredni zagrażają przyrodzie oraz są przyczyną nieprzyjemnego zapachu. Dlatego tak ważna jest racjonalna gospodarka odpadami z produkcji zwierzęcej, polegająca na odpowiednim ich usuwaniu z pomieszczeń inwentarskich, właściwym przechowywaniu, a następnie zagospodarowaniu z ewentualną utylizacją.

Technologia utylizacji gnojowicy na drodze fermentacji metanowej jest jedną z metod jej unieszkodliwiania połączoną z produkcją biogazu. Fermentacja beztlenowa jest procesem korzystnym zarówno z punktu widzenia środowiska, gdyż przefermentowana gnojowica stwarza mniejsze zagrożenie ekologiczne i sanitarne (likwidacja mikroorganizmów choro-

twórczych), ma większą wartość nawozową niż świeże odpady oraz nie wydziela nieprzyjemnych zapachów ani podczas magazynowania w zbiornikach, ani podczas aplikowania na pola. Gwarantuje uzyskanie cennego biogazu, który można wykorzystać przede wszystkim do uzyskania energii elektrycznej i ciepłej.

Drugim sposobem utylizacji gnojowicy jest produkcja kompostu. Kompostowanie to proces prowadzący do zniszczenia patogenów, przekształcenia azotu z formy amonowej do stabilnej formy organicznej oraz zmniejszenia ilości odpadów. Produktem kompostowania jest kompost, który odznacza się dużym stopniem biodegradacji i higienizacji, jest również bezpieczny dla ludzi i środowiska pod względem bakteriologicznym i chemicznym.

Literatura

- [1] Imbeah M., *Composting piggery waste: A review*, Bioresource Technology 63, 1998, 197-203.
- [2] Pawełczyk A., Muraviev D., *Zintegrowana technologia oczyszczania ciekłych odpadów z hodowli trzody chlewnej*, Przemysł Chemiczny 2003, 82/8-9, 2-4.
- [3] Rulkens W.H., Klapwijk A., Willersb H.C., *Recovery of valuable nitrogen compounds from agricultural liquid wastes: potential possibilities, bottlenecks and future technological challenges*, Environmental Pollution, 1998, 102 S1, 727-735.
- [4] Girard M., Nikiema J., Brzezinski R., Buelna G., Heitz M., *A review of the environmental pollution originating from the piggery industry and of the available mitigation technologies: towards the simultaneous biofiltration of swine slurry and methane*, Canadian Journal of Civil Engineering, 2009, 36, 1946-1957.
- [5] Romaniuk W., *Ekologiczne systemy gospodarki obornikiem i gnojowicą*, Instytut Budownictwa, Mechanizacji i Elektryfikacji Rolnictwa, Warszawa 2000.
- [6] Gorlach E., Mazur T., *Chemia rolna*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 2001.
- [7] Bohdziewicz J., Kuglarz M., *Produkty uboczne produkcji zwierzęcej jako źródło energii odnawialnej*, Proceedings of ECOpole, 2009, Vol. 3, No. 2, 421-425.
- [8] Szlachta J., *Ekspertyza: Możliwości pozyskiwania biogazu rolniczego jako odnawialnego źródła energii* (www.agengpol.pl – 25.02.2011).
- [9] Cebula J., *Biogaz – odnawialne źródło energii*, X Sympozjum Postawy proekologiczne u progu XXI wieku Sułów k/Milicza, 27 września 2008.
- [10] Piątek R., *Nowoczesne technologie energetycznego wykorzystania odpadów pochodzenia zwierzęcego*, XIX Zjazd Termodynamików Sopot 5–8.09.2005.
- [11] Początek M., Janik M., *Fermentacja metanowa. Technologie Urządzenia Przykłady*, Materiały szkoleniowe firmy EN4 S.C.
- [12] Węglarzy K., Stekla J., *Agrogazownia w ochronie środowiska rolniczego*, Wiadomości Zootechniczne, R. XLVII, 2009, 3, 59-66.
- [13] Campos E., Palatsi J., Flotats X., *Codigestion of pig slurry and organic wastes from food industry*, Proceedings of the II International Symposium on Anaerobic Digestion of Solid Waste, Barcelona Junio 1999, 192-195.

- [14] Nozhevnikova A.N., Kotsyurbenko O.R., Parshina S.N., *Anaerobic manure treatment under extreme temperature conditions*, Water Science and Technology, 1999, 40, 215-221.
- [15] Dębowski M., Zieliński M., Krzemieniewski M., *Wpływ składu jakościowego substratów oraz obciążenia komory ładunkiem związków organicznych na skład i ilość uzyskiwanego biogazu*, Środkowo-Pomorskie Towarzystwo Naukowe Ochrony Środowiska, 2009, Tom 11, 1179-1189.
- [16] Instytut Mineralnych Materiałów Budowlanych, *Pozyskiwanie i energetyczne wykorzystanie biogazu rolniczego. Część I – proces technologiczny*, Opole 2007.
- [17] Al Seadi T., *Danish Centralised Biogas Plants – Plant Descriptions*, Bioenergy Department, University of Southern Denmark, May 2000.
- [18] Huang G.F., Wu Q.T., Wong J.W.C., Nagar B.B., *Transformation of organic matter during co-composting of pig manure with sawdust*, Bioresource Technology, 2006, 97, 1834-1842.
- [19] Hsu J.H., Lo S.L., *Chemical and spectroscopic analysis of organic matter transformations during composting of pig manure*, Environmental Pollution, 1999, 104, 189-196.
- [19] Hsu J.H., Lo S.L., *Recycling of separated pig manure: characterization of maturity and chemical fractionation of elements during composting*, Water Science and Technology, 1999, 40, 121-127.
- [20] *Dokument Referencyjny o Najlepszych Dostępnych Technikach dla Intensywnego Chowu Drobiu i Świń*, Ministerstwo Środowiska, Warszawa 2005.
- [21] Ros M., Garcia C., Hernandez T., *A full-scale study of treatment of pig slurry by composting: Kinetic changes in chemical and microbial properties*, Waste Management, 2006, 26, 108-1118.