



Agnieszka Makara¹, Zygmunt Kowalski², Katarzyna Fela¹

¹ *Instytut Chemii i Technologii Nieorganicznej*

Politechnika Krakowska,

ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

e-mail: amak@chemia.pk.edu.pl

² *Instytut Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią*

Polskiej Akademii Nauk,

ul. Wybickiego 7, 31-261 Kraków

ZAGOSPODAROWANIE SUBSTANCJI POFERMENTACYJNEJ W ASPEKTCIE BEZPIECZEŃSTWA EKOLOGICZNEGO

Streszczenie. Substancja pofermentacyjna (poferment, dygestat) to produkt uboczny powstający w biogazowniach rolniczych, w procesie beztlenowej fermentacji metanowej biomasy, w ilości 85–95% masy użytych substratów. Agrobiogazownia o mocy 1 MW wytwarza rocznie do 30 000 t pofermentu. Poferment jest najczęściej wykorzystywany jako nawóz, zawierający 2–3% azotu ogólnego. Ponieważ proces fermentacji przyczynia się do niszczenia patogenów, ich ilość w pofermencie jest zdecydowanie niższa niż w surowcu. Charakterystyka substancji pofermentacyjnej wskazuje, iż jest ona źródłem materii organicznej niezbędnej dla prawidłowego funkcjonowania środowiska glebowego oraz zawiera zmineralizowane formy makro- i mikroelementów bezpośrednio przyswajalne przez rośliny. Zagęszczony poferment jest wykorzystywany jako paliwo, czy to bezpośrednio po wysuszeniu, czy granulacji (pelety i brykiety). Pelety z pofermentu posiadają wartość opałową ok. 15 MJ/kg, przy zawartości wilgoci 9,9%. Jednak otrzymanie peletu z osadu pofermentacyjnego, ze względu na duży balast wody, nie jest łatwe. Powstający w wyniku spalania peletów popiół zawierający fosfor i potas może zostać wykorzystany w rolnictwie.

Słowa kluczowe: biogazownia, substancja pofermentacyjna, nawożenie, wykorzystanie energetyczne.

DISPOSAL OF AFTER-FERMENTATION SUBSTANCE IN THE ASPECT OF ECOLOGICAL SAFETY

Abstract. The fermentation substance (digestate) is a by-product produced in agricultural biogas plants in the process of anaerobic methane fermentation of biomass in the amount of 85–95% of the mass of substrates used. 1 MW agro biogas plant generates up to 30,000 t of digestate per year. Digestate is most commonly used as fertilizer, containing 2–3% of total nitrogen. As the fermentation process contributes to the destruction of pathogens, their amount in the fermentation is considerably lower than in the raw material. The characteristics of the digestate indicate that it is the source of organic matter necessary for the proper functioning of the soil environment and contains mineralized forms of macro and micronutrients directly absorbed by the plants. Concentrated digestate is used as fuel, either directly after drying or after granulation (pellets and briquettes). The pellets from the post-fermentation have a calorific value of about 15 MJ/kg, with a moisture content of 9.9%. However, obtaining pellets from digestate sludge, due to large water ballast is not cheap. Ash from burned pellets containing phosphorus and potassium can be used in agriculture for fertilization.

Keywords: biogas plant, digestate, fertilization, energy use.

Charakterystyka substancji pofermentacyjnej

Substancja pofermentacyjna to produkt uboczny powstający w biogazowniach rolniczych w procesie beztlenowej fermentacji metanowej masy organicznej (biomasy). Nazywana jest również pofermentem lub dygestatem. Ze względu na różnorodność surowców możliwych do zastosowania w produkcji biogazu, ich pochodzenie oraz stosowane technologie fermentacji, skład oraz właściwości fizykochemiczne pofermentu mogą być zróżnicowane. Przyjmuje się, że ilość wytwarzanej substancji pofermentacyjnej stanowi 85–95% masy użytych substratów, przy czym im więcej łatwo fermentujących substancji organicznych w surowcu, tym mniejsza jej ilość [15, 31, 33]. Poferment składa się przede wszystkim z nieprzefermentowanej pozostałości substancji organicznych, składników mineralnych (w ilościach porównywalnych do ich zawartości w substratach) i biomasy bakterii metanowych. Podstawowymi parametrami charakteryzującymi substancję pofermentacyjną są: zawartość suchej masy, odczyn, zawartość substancji organicznych, azotu, fosforu, wapnia i magnezu, a także metali ciężkich. Substancja pofermentacyjna to zawiesina wodna zawierająca 2–5% suchej masy o pH~7. W fazie ciekłej rozpuszczone są zarówno związki mineralne, jak i organiczne. Zawartość azotu ogólnego w masie pofermentacyjnej waha się od 2% do 3% świeżej masy. Ponieważ w procesie fermentacji beztlenowej azot organiczny ulega w znacz-

nym stopniu amonifikacji, jego dominująca ilość, dochodząca nawet do 85%, to azot amonowy. Wartości te mogą ulegać obniżeniu, gdyż ze wzrostem pH oraz temperatury możliwe jest uwalnianie gazowego amoniaku z roztworu [22, 15]. Główne różnice pomiędzy surową gnojowicą a pofermentem przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Typowy skład chemiczny gnojowicy i pofermentu

Wyszczególnienie	Sucha masa [%]	N całkow. [%]	NH ₄ -N [%]	pH
Gnojowica bydłowa	6,0	6,5	5,0	2,8
Gnojowica świńska	4,0	7,0	5,0	3,8
Poferment	2,8	7,5	5,0	4,0

Podczas fermentacji, mineralizacji ulegają także związki fosforu. W pofermencie występuje on w postaci jonu PO₄³⁻, a jego zawartość stanowi 86% fosforu ogólnego i sięga kilkunastu g/kg suchej masy. Fosforany(V) obecne w pofermencie, ze względu na obecność innych jonów, jak np. Ca²⁺, Mg²⁺, NH₄⁺, znajdują się w fazie stałej, tworząc nierozpuszczalne w wodzie związki typu struwitu (MgNH₄PO₄) lub fosforanu(V) wapnia (np. hydroksopapatyt, Ca₅(PO₄)₃OH) [14, 16, 17].

Spośród mikrośladników, substancja pofermentacyjna zawiera najwięcej żelaza, a także Cu, Mn oraz Zn. Stężenia tych pierwiastków w pofermencie są nieznacznie niższe od tych charakteryzujących substraty poddawane fermentacji [23, 21]. Zawartość całkowitego węgla organicznego (OWO) w pofermencie wynosi od kilku do kilkudziesięciu g/dm³, zaś biochemiczne zapotrzebowanie na tlen (BZT₅) dla tego odpadu nie przekracza zwykle 7 g/dm³. Ponieważ głównym produktem fermentacji biomasy jest metan, jego generowanie skutkuje obniżeniem stosunku zawartości węgla i azotu w porównaniu do użytego surowca, co jest korzystne w aspekcie wykorzystania pofermentu do celów nawozowych [5, 27, 15]. W tabeli 2 podano ilości biogazu i pofermentu produkowanych z różnych substratów [31].

Proces fermentacji nie tylko powoduje zmiany składu surowca, ale także ma wpływ na jego właściwości fizyczne. Obserwowane jest zmniejszenie lepkości pofermentu w stosunku do lepkości surowca. Jest to efektem zmniejszenia zawartości suchej masy, a ponadto pojawienia się w masie pofermentacyjnej pęcherzyków gazów – CO₂ i CH₄ [15]. Ponadto istotna, zwłaszcza w aspekcie późniejszego wykorzystania tej substancji, jest jej charakterystyka higieniczno-sanitarna, określenie obecności bakterii chorobotwórczych z rodzaju *Salmonella*

oraz liczebności żywych jaj pasożytów jelitowych, takich jak: *Ascaris sp.*, *Trichuris sp.*, *Toxocara sp.* [27, 2, 25].

Tabela 2. Ilości biogazu oraz pofermentu uzyskiwanego z gnojowicy i innych substratów

Substraty do procesu fermentacji metanowej	Składniki pofermentu i wskaźniki procesu					
	Sucha masa [%]	Substancja organiczna w suchej masie [%]	Ilość biogazu [Nm ³]		Zawartość CH ₄ w biogazie [%]	Ilość pofermentu [m ³ /t substratu]
			Z 1 kg suchej substancji organicznej	Z 1 t świeżej masy substratu		
gnojowica bydłęca	8	86	0,280	0,224	55	0,977
gnojowica świńska	6	80	0,400	0,192	60	0,977
obornik	25	80	0,450	0,900	55	0,885
Kiszonka z kukurydzy	32	95	0,520	1,980	53	0,760
Ziarno zboża	86	98	0,700	5,900	55	0,247

Ponieważ proces fermentacji przyczynia się do niszczenia patogenów, ich ilość w masie pofermentacyjnej jest zdecydowanie niższa niż w surowcu. Stopień redukcji zależy tutaj od czasu retencji oraz temperatury procesu. Całkowite usunięcie bakterii, wirusów oraz pasożytów jest możliwe w przypadku procesów termofilnych [4, 2, 23].

Przetwarzanie i zastosowanie substancji pofermentacyjnej

W UE fermentacja beztlenowa nie zmienia prawnej definicji gnojowicy zwierzęcej; jest ona w przetworzonej formie określana jako odpad, a możliwymi metodami jej usuwania jest użycie jej jako nawozu dla roślin. Fakt, że poferment ma wyższe pH, a także większy jest w nim udział azotu w formie zmineralizowanej, stwarza ryzyko emisji amoniaku. Dlatego też bardzo ważne jest dla pofermentu użycie technologii, które zapobiegają emisji amoniaku, np. składowania zawiesiny w zamkniętych zbiornikach szlamu i iniekcji dogłębowej lub systemu układania w warstwy, możliwie połączonego z zakwaszaniem [8]. Ilość substancji pofermentacyjnej, generowanej w biogazowni, zależy

od wielkości zakładu i może dochodzić nawet do kilkudziesięciu tysięcy ton rocznie. Tak duża ilość odpadu może nastęrczać kłopoty związane z jego zagospodarowaniem.

Zgodnie z obowiązującym prawem [28, 24] poferment klasyfikowany jest jako odpad pod nazwą „przefermentowane odpady z beztlenowego rozkładu odpadów zwierzęcych i roślinnych”. Według tej ustawy metodami odzysku o znaczeniu aplikacyjnym dla takiego odpadu są: recykling lub odzysk substancji organicznych, (w tym kompostowanie i inne biologiczne procesy przekształcania); obróbka na powierzchni ziemi przynosząca korzyści dla rolnictwa lub poprawę stanu środowiska lub po przeprowadzeniu separacji pofermentu i wysuszeniu frakcji stałej wykorzystanie głównie jako paliwa lub innego środka wytwarzania energii. Procesy te dobierane są zależnie od składu pofermentu oraz charakterystyki i usytuowania geograficznego obszaru jego zastosowania [4, 12].

Charakterystyka substancji pofermentacyjnej wskazuje, iż jest ona źródłem materii organicznej niezbędnej dla prawidłowego funkcjonowania środowiska glebowego oraz zawiera zmineralizowane formy pierwiastków, makro- i mikroelementów bezpośrednio przyswajalne przez rośliny i dlatego najczęściej stosowanym sposobem utylizacji pulpy pofermentacyjnej jest jej wykorzystanie jako substytutu nawozu [9, 11, 15]. W tabeli 3 porównano wartości nawozowe gnojowicy i pofermentu, a zawartości składników nawozowych w różnych typach pofermentu zamieszczono – w tabeli 4 [32, 33].

Tabela 3. Wartość nawozowa gnojowicy i pofermentu

Substrat	Sucha masa [%]	Składniki odżywcze w świeżej masie [kg/m ³]				pH
		N	NH ₃ -N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
Gnojowica	7,5	3,5	2,5	2,5	3,5	7,2
Poferment	6,3	4,4	2,6	1,9	5,0	8,5

Poferment można stosować bezpośrednio, aplikując na pola uprawne, po rozdzieleniu na frakcje lub przetworzeniu na nawozy organiczno-mineralne. Rozwiązanie to wydaje się bezproblemowe, jednak w rzeczywistości, ze względu na obostrzenia narzucone przez ustawodawcę dotyczące dawek, terminów i sposobów aplikacji tego typu nawozów, powoduje wtórne komplikacje związane z koniecznością magazynowania dużych ilości pofermentu, czy to w zbiornikach, czy w lagunach [28].

Ze względu na potrzebę zmniejszenia objętości zbiorników do przechowywania pofermentu stosuje się jego frakcjonowanie na fazę stałą (gęstwą) i ciekłą (odciek), obie możliwe do wykorzystania jako nawóz. Dodatkowymi

korzysciami z tego procesu jest polepszenie właściwości nawozowych pofermentu oraz redukcja kosztów transportu bionawozu do miejsca przeznaczenia, aplikacji.

Tabela 4. Zawartość składników nawozowych w różnych typach pofermentu

Skład substratów	Udział [%]	Składniki odżywcze w pofermencie [kg/m ³]				SM - sucha masa [%]
		N	NH ₃ -N	P ₂ O ₅	K ₂ O	
Kiszonka z kukurydzy, 35% SM + gnojowica bydłęca, 8% SM	70 30	5,8	3,8	2,3	9,1	9,0
Kiszonka z kukurydzy, 35% SM + gnojowica świńska, 6% SM	40 60	5,5	3,6	2,6	5,2	6,3
Kiszonka z kukurydzy, 35% SM + gnojowica świńska, 6% SM + ziarno pszenicy, 86,6% SM	85 10 5	7,5	4,9	3,6	10,1	10,5
Kiszonka z kukurydzy, 35% SM + gnojowica bydłęca, 8% SM + kiszonka z traw, 25% SM	40 55 5	5,5	3,6	2,1	8,1	7,5
Gnojowica bydłęca, 8% SM	100	5,0	3,3	1,8	6,5	5,1

Rozdział frakcji odbywa się metodami fizycznymi (sedymentacja, suszenie w szklarniach, filtracja membranowa), mechanicznymi (wirówki, prasy) lub termiczno-ciśnieniowymi (odparowanie) [15, 3, 17]. Odciek zawierający ok. 2% suchej masy, a także znaczne ilości pierwiastków niezbędnych dla prawidłowego rozwoju roślin (N, P, K) w formie jonowej, łatwo przez nie przyswajalnej, wykorzystywany jest w deszczowniach do nawadniania pól, nawadniania przyzmk kompostowych lub jako nawóz. Może być on również traktowany jako ciecz technologiczna stosowana do rozcieńczania substratów w procesach fermentacji lub jako odpad kierowany do oczyszczalni ścieków lub bezpośrednio do cieków wodnych [31, 4, 23].

Oddzielona faza stała składająca się ze strukturalnych części materii organicznej, głównie celulozy i ligniny, zawierająca znaczne ilości związków mineralnych (80–85% P i 20–25% N pochodzących z pofermentu), może być

składowana, stosowana jako nawóz czy poddana suszeniu i stanowić substrat do produkcji peletów i brykietów do celów grzewczych, być wykorzystywana jako ściółka dla zwierząt gospodarczych lub białkowy dodatek do pasz [13, 4, 23].

Zagęszczona frakcja pozostałości pofermentacyjnej, zawierająca azot i fosfor wydzielona w separatorze rozdzielającym odgazowaną biomasę na frakcję stałą i ciekłą, po dalszym zagęszczeniu poprzez dodanie dolomitu lub mikroelementów może stanowić nawóz w postaci sypkiej [15].

Bardzo dobrym sposobem na poprawę jakości nawozu przed bezpośrednim zastosowaniem na polach jest jego kompostowanie (autotermiczny i termofilowy rozkład bioodpadów). Wszelkie wahania parametrów podczas pracy biogazowni rolniczej mogą skutkować powstawaniem osadów pofermentacyjnych zawierających niecałkowicie przetworzoną materię organiczną. Nieprzetworzony poferment często charakteryzuje się nieprzyjemnym zapachem, a wprowadzenie go do środowiska może powodować zanieczyszczenie gleby dużą ilością bakterii fermentacji metanowej. Dzięki kompostowaniu przy udziale mikro- i makroorganizmów w obecności tlenu materiał ulega stabilizacji oraz następuje likwidacja patogenów, głównie w fazie termofilnej procesu [6, 4].

Zagęszczona masa pofermentacyjna może być także wykorzystywana na cele energetyczne – bezpośrednio jako wysuszona frakcja bądź poddana granulacji do postaci peletów lub sprasowana pod zwiększonym ciśnieniem jako brykiet [10, 13]. Właściwości powstałego biopaliwa będą warunkowane charakterystyką surowca użytego do produkcji biogazu, zaś opłacalność procesu zależeć będzie m.in. od rodzaju biogazowni, jej lokalizacji, mocy itp. Pelety grzewcze otrzymane z pofermentu posiadają wysoką wartość opałową, ok. 15 MJ/kg, przy zawartości wilgoci 9,9%. Jednak otrzymanie peletu z osadu pofermentacyjnego, ze względu na duży balast wody, nie jest łatwe, wiąże się z wieloma problemami dotyczącymi odwadniania, jak i suszenia materiału [7]. Powstający w wyniku spalania popiół, zawierający skoncentrowane składniki o znaczeniu nawozowym, m.in. fosfor i potas, może zostać wykorzystany rolniczo [4, 23].

Poza wykorzystaniem osadu pofermentacyjnego z biogazowni w rolnictwie oraz energetyce, znaczny udział ogólnego zagospodarowania, bo aż 18%, stanowi składowanie. Ponieważ takie rozwiązanie nie wykorzystuje potencjału nawozowego ani też energetycznego pofermentu, nie jest ono zalecane. Ponadto obowiązujące przepisy zakazujące składowania odpadów o zawartości >5% OWO lub charakteryzujące się 8% stratą prażenia zmuszają do poszukiwania alternatywnych rozwiązań [4, 20]. Obiecującą metodą produkcji biopaliw wydaje się biologiczne suszenie, proces samoczynnego usuwania wody z materiału przy jednoczesnym zachowaniu jego wartości energetycznej. Proces jest skutkiem rozkładu łatwo degradowalnej substancji organicznej, zachodzącego z wydzielaniem ciepła. Efektem tego jest odparowanie wody oraz stabilizacja odpadu. Badania przeprowadzone na mieszaninie masy pofermentacyjnej

z Grupowej Oczyszczalni Ścieków w Łodzi ze stałą frakcją organiczną odpadów komunalnych o modelowym składzie dowodzą, że otrzymany produkt końcowy jest dobrym, możliwym do składowania biopaliwem, którego wartość opałowa wynosi 13,6 kJ/g, zaś ciepło spalania 14,85 kJ/g [7].

Wykorzystanie energetyczne pofermentu

Zagospodarowanie pofermentu jako nawozu wymaga od 1000 do 5000 ha dla biogazowni o mocy 1 MW. Zachodzi przy tym konieczność magazynowania pofermentu przez około 6 miesięcy w lagunach przykrytych geomembraną lub w specjalnych zbiornikach żelbetonowych, ponieważ nadal zachodzą procesy fermentacyjne. Przechowywanie uwodnionego pofermentu wymaga dodatkowych dużych nakładów inwestycyjnych na wykonanie zbiorników żelbetonowych lub zabezpieczenie dodatkowych terenów na laguny.

Prowadzone są badania mające na celu znalezienie alternatywnych metod wykorzystania pofermentu wg propozycji zakładającej rozfrakcjonowanie pofermentu na frakcję ciekłą i stałą. Według tej koncepcji:

- frakcja ciekła zostałaby zawrócona do komory fermentacyjnej po uprzedniej denitryfikacji (znaczne ograniczenie zużywanej wody) lub użyta jako nawóz ciekły,
- frakcja stała po wstępnym odwodnieniu mechanicznym zostałaby osuszona metodami termicznymi i zgranulowana (magazynowanie długoterminowe, możliwość użycia do celów energetycznych – biopaliwo stałe – lub nawozowych).

Przygotowana i zgranulowana frakcja stała zostałaby wykorzystana do celów energetycznych, wytwarzania paliw II generacji (poprzez zgazowanie lub pirolizę), lub jako paliwo do współspalania (popiół użyty jako nawóz).

Odwadnianie pofermentu metodami mechanicznymi (taśmowa prasa filtracyjna, wirówka dekantacyjna) pozwala osiągnąć maksymalną zawartość suchej masy sięgającą około 30%. Metody mechaniczne nie pozwalają na usunięcie wilgoci związanej. Z 1 t pofermentu można uzyskać po odwodnieniu i osuszeniu około 1350 MJ energii. Przy wykorzystaniu najbardziej sprawnej suszarni do odparowania 700 kg wody potrzeba 1692 MJ, co daje ujemny bilans energetyczny na osuszanie pofermentu (wymagane byłoby bardziej sprawne osuszanie pofermentu). Spalenie osuszonego pofermentu daje około 70% energii potrzebnej na osuszenie. W biogazowniach występuje nadmiar ciepła z kogeneracji, który może zostać wykorzystany do instalacji osuszania pofermentu, ale w pierwszej kolejności do podgrzewania komór fermentacyjnych. Dzięki odwadnianiu możliwy jest recykling wody procesowej.

Wytwarzany nawóz stały, w postaci wysuszonego pofermentu, można magazynować lub wykorzystać do celów energetycznych. Duża zawartość po-

piołu w pofermencie eliminuje możliwość jego spalania bezpośredniego w kotłach rusztowych (najbardziej rozpowszechnionych w energetyce zawodowej) ze względu na możliwość wystąpienia problemów ze szlakowaniem, oraz zgazowania w reaktorach ze złożem stałym. Istnieje natomiast możliwość współspalania lub zgazowania. Możliwe jest też bezpośrednie jego użycie w reaktorach zgazowania lub spalania w złożu fluidalnym, gdzie problemy ze szlakowaniem nie występują. W tabeli 5 zamieszczono wyniki badań karbonizatu oraz przetwarzania pirolitycznego pofermentu.

Tabela 5. Wyniki badań karbonizatu z przetwarzania pirolitycznego pofermentu

Próbka	Wilgotność [%]	Ciepło spalania [GJ/t]	Wartość opałowa [GJ/t]	Węgiel związany [% s.m.]	Części lotne [% s.m.]	Popiół [% s.m.]
Poferment przed pirolizą	7,95	16,820	15,288	14,67	58,60	26,72
	7,81	16,895	15,384	14,65	58,45	26,90
	7,79	16,860	15,356	14,78	58,98	26,25
Poferment po procesie pirolizy	3,25	14,049	13,513	30,26	20,09	49,64
	3,28	14,091	13,549	30,21	20,32	49,47
	3,29	14,040	13,497	30,34	20,12	49,54

Zagęszczona do zawartości 15–20% suchej masy masa pofermentacyjna może być także stosowana do produkcji peletów do celów grzewczych, które przy wilgotności 9,9% mają wartość opałową 15 MJ/kg. Nadwyżka energii cieplnej z biogazowni może być stosowana do suszenia frakcji stałej pofermentu, umożliwiając uzyskanie produktu o dobrych parametrach fizycznych i zwiększonej koncentracji składników pokarmowych. Granulacja z kolei frakcji stałej oraz zastosowanie dodatków mineralnych pozwalają otrzymywać granulaty znajdujące zastosowanie w produkcji rolnej i ogrodnictwa.

Aspekty środowiskowe stosowania substancji pofermentacyjnej

Najczęstszym sposobem utylizacji substancji pofermentacyjnej jest jej użycie jako substytutu nawozu. W porównaniu z nieprzefermentowaną (surową) gnojowicą, będącą obecnie podstawowym substratem wykorzystywanym w biogazowniach rolniczych, zawiera ona składniki pokarmowe w formach mineralnych pozwalających na lepsze wykorzystanie ich przez rośliny. Istotnym parametrem charakteryzującym te substancje jest stosunek węgla do azotu, decy-

dujący o szybkości mineralizacji (rozkładu) substancji organicznych. Dla gnojowicy stosunek ten wynosi 6,8:1, zaś dla pofermentu mieści się w zakresie od 15:1 do 25:1 i w konsekwencji współczynnik wykorzystania substancji organicznej z gnojowicy, kształtujący się na poziomie 48%, po procesie fermentacji wzrasta do 75–80% dla otrzymanego pofermentu. Ponadto duży udział azotu amonowego (do 90%) w azocie ogólnym, podczas gdy w surowcu udział ten jest zdecydowanie mniejszy (dla gnojowicy wynosi ok. 48,8%, zaś dla obornika 10–15%), czyni go produktem o szybkim działaniu plonotwórczym [5, 29, 11]. Taka charakterystyka chemiczna substancji pofermentacyjnej nie tylko uzasadnia jej nawozowe wykorzystanie, ale także ma korzystny wpływ na środowisko. Azot obecny w nawozie w formie amonowej ulega w glebie tzw. sorpcji wymiennej, przez co jest mniej podatny na wymywanie do wód, w przeciwieństwie do azotu azotanowego [12].

Powstawanie pofermentu w procesie produkcji biogazu w indywidualnym gospodarstwie rolnym jest zatem wartością dodaną tej technologii. Pozwala na uzdatnienie nawozów naturalnych stosowanych jako surowce w procesie (obornik, gnojowica) oraz zmniejsza zapotrzebowanie na nawozy mineralne, a to z kolei skutkuje obniżeniem kosztów prowadzenia produkcji roślinnej w gospodarstwie [29, 12].

Ważnym efektem stosowania nawożenia substancją pofermentacyjną jest również ograniczenie emisji gazów cieplarnianych [19]. Przy tradycyjnym gospodarowaniu obornikiem i gnojowicą dochodzi bowiem do ich emisji. Spośród gazów cieplarnianych na uwagę zasługuje tu przede wszystkim metan. Niebezpieczeństwo emisji tego gazu jest ważne, ponieważ jest on 21-krotnie bardziej szkodliwy dla środowiska naturalnego niż dwutlenek węgla, powodując nasilenie efektu cieplarnianego. Problem dotyczy zarówno składowania, jak i rolniczego wykorzystania odchodów zwierzęcych. Składowany obornik i magazynowana gnojowica przy braku efektywnego napowietrzania (w warunkach beztlenowych) mogą być źródłem silnych emisji metanu, wytwarzanego przez bakterie mezofilowe lub termofilowe. Nieprawidłowe użycie gnojowicy lub obornika jako nawozu, zwłaszcza w warunkach głębokiego przykrycia go zwiążą, wilgotną glebą odcinającą dostęp powietrza, może być także źródłem emisji tego gazu [26]. Poza metanem ważnym gazem cieplarnianym emitowanym przez gnojowicę jest podtlenek azotu. Procesami odpowiedzialnymi za jego powstawanie są mikrobiologiczna nitryfikacja i denitryfikacja azotu, które zachodzą podczas magazynowania gnojowicy [18, 26].

Emisja gazów cieplarnianych do atmosfery zachodzi także w przypadku stosowania nawozów mineralnych (zwłaszcza azotowych i fosforowych). Przy intensywnym nawożeniu upraw rolnych nawozami sztucznymi w europejskich warunkach klimatycznych występuje tzw. emisja glebowa NO_x z niewykorzystanych przez rośliny związków azotu. Należy także zwrócić uwagę na emisję związaną z procesem wytwarzania nawozów sztucznych. Zastąpienie więc

nawozów naturalnych, gnojowicy i obornika, jak i mineralnych pofermentem pozwala w znacznym stopniu zmniejszyć emisję gazów cieplarnianych do atmosfery [30, 1].

Dużym problemem wsi i gospodarstw rolnych jest fetor gnojowicy, obornika i odchodów zwierzęcych, zarówno składowanych, jak i wywożonych na pola jako nawóz, który może unosić się w okolicy przez wiele dni.

Do najważniejszych związków odpowiedzialnych za tworzenie odorów podczas chowu zwierząt gospodarskich zalicza się amoniak, siarkowodór, diacetyl, p-krezol, indol, fenole, merkaptany, skatole, aminy, siarczki metylu. Dlatego też emisja odorów nie tylko pogarsza dobrostan ludzi, ale jest też poważnym zagrożeniem dla ich zdrowia. Fermentacja metanowa wymienionych odpadów pozwala zredukować emisję tych gazów, neutralizując zarazem ich uciążliwość. Jeśli biogazownia jest właściwie zaprojektowana i eksploatowana, surowiec zostaje do końca „przefermentowany”, otrzymany wówczas poferment ma mało wyczuwalny, słaby, neutralny zapach (może to być zapach ziemi, humusu). Redukcja odorów o ponad 80% w stosunku do nieprzefermentowanych nawozów naturalnych jest istotna dla magazynowania pofermentu oraz przy jego aplikowaniu na pola [26].

Poferment jest lepszym nawozem niż gnojowica czy obornik nie tylko dlatego, że nie emituje praktycznie odorów i daje plony o 20% większe, ale również z tego powodu, że nie ma w nim nasion chwastów. Ma to znaczenie ekonomiczne, gdyż pozwala zmniejszyć zużycie chemicznych środków chwastobójczych i herbicydów [12].

Podsumowanie

Substancja pofermentacyjna (poferment, dygestat) to produkt uboczny powstający w biogazowniach rolniczych w procesie beztlenowej fermentacji metanowej biomasy w ilości 85–95% masy użytych substratów. Ze względu na swoje właściwości z powodzeniem może być stosowana jako wartościowy i tani nawóz łączący pozytywne cechy nawozów naturalnych (źródło materii organicznej), jak i mineralnych (źródło makro- i mikroelementów w formach mineralnych). Wykorzystanie go na gruntach rolnych pozytywnie wpływa na wielkość uzyskiwanych plonów i jednocześnie poprawia bilans materii organicznej w glebie.

Biogazownie, wykorzystując do produkcji biogazu produkty uboczne z przetwórstwa rolno-spożywczego czy odchody zwierzęce, mogą nie tylko służyć pozyskiwaniu energii elektrycznej i ciepłej, ale także zmniejszyć zagrożenia związane z oddziaływaniem tych substancji na środowisko. Agrobiogazownia o mocy 1 MW wytwarza rocznie do 30 000 t pofermentu. Zagęszczony poferment jest wykorzystywany jako paliwo, czy to bezpośrednio po

wysuszeniu, czy po granulacji (pelety i brykiety). Pelety z pofermentu posiadają wartość opałową ok. 15 MJ/kg, przy zawartości wilgoci 9,9%. Jednak otrzymanie peletu z osadu pofermentacyjnego, ze względu na duży balast wody, nie jest łatwe. Powstający w wyniku spalania peletów popiół zawierający fosfor i potas może zostać wykorzystany rolniczo. W porównaniu z surową gnojowicą, będącą obecnie podstawowym substratem wykorzystywanym w biogazowniach rolniczych, otrzymywanie pofermentu eliminuje patogeny, eliminuje praktycznie emisję odorów i gazów cieplarnianych, zmniejsza ryzyko zanieczyszczenia wód gruntowych i powierzchniowych. Tym samym efekty ekologiczne produkcji i stosowania pofermentu są znaczące.

Literatura

- [1] Askri A., Laville P., Trémier A., Houot S., *Influence of origin and post-treatment on greenhouse gas emissions after anaerobic digestate application to soil*, Waste Biomass Valorization, 2, 7, 2016, s. 293–306, DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s12649-015-9452-6>
- [2] Babae A., Shayegan J., Roshani A., *Anaerobic slurry co-digestion of poultry manure and straw: effect of organic loading and temperature*, Journal of Environmental Health Sciences & Engineering, 15, 11, 2013, s. 1–6, DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/2052-336X-11-15>
- [3] Baryła-Paśnik M., Piekarski W., Piecak A., *Logistyka dystrybucji i magazynowania odpadów pofermentacyjnych pod kątem kosztów wytwarzania bionawozu*, Logistyka, 6, CD 1, 2014, s. 30–33.
- [4] Czekala W., Pilarski K., Dach J., Janczak D., *Analiza możliwości zagospodarowania pofermentu z biogazowni*, Technika Rolnicza Ogrodnicza Leśna, 4, 2012, s. 13–15.
- [5] Czuba R., *Nawożenie mineralne roślin*, Wyd. ZCh Police SA, 1996.
- [6] Deng L., Zhen P., Chen Z., & Mahmood, Q., *Improvement in post-treatment of digested swine wastewater*, Bioresource Technology, 99, 8, 2008, s. 3136–3145, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2007.05.061>
- [7] Domińczyk-Kuderko A., Krzystek L., Ledakowicz S., Pogoda M., *Biologiczne suszenie mieszaniny masy pofermentacyjnej z biogazowni i organicznej frakcji stałych odpadów komunalnych*, Inżynieria i Aparatura Chemiczna, 4, 2015, s. 150–151.
- [8] Foged H.L., Frandsen T.Q., Christensen M.T., Poulsen M., *Livestock manure to energy*, Status. Technologies and Innovation in Denmark, Agro Business Park A/S, 2012.

- [9] Fuchs J.G., Baier U., Berner A., Mayer J., Schleiss K., *Effects of digestate on the environment and on plant production - results of a research project*, In Proceedings of ECN/ORBIT e.V. Workshop 2008 The future for Anaerobic Digestion of Organic Waste in Europe, Weimar, Germany, 2008.
- [10] Khanal S.K., *Anaerobic biotechnology for bioenergy production: principles and applications*, Blackwell Pub. Co, 2008.
- [11] Koszel M., Lorencowicz E., *Agricultural use of biogas digestate as a replacement fertilizers*, Agriculture and Agricultural Science Procedia, 7, 2015, s. 119–124, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aaspro.2015.12.004>
- [12] Kowalczyk-Juśko A., Szymańska M., *Poferment nawozem dla rolnictwa*, Wyd. Fundacja na rzecz Rozwoju Polskiego Rolnictwa, Warszawa, 2015.
- [13] Kratzeisen M., Starcevic N., Martinov M., Maurer C., Müller J., *Applicability of biogas digestate as solid fuel*, Fuel, 89, 2010, 2544–2548.
- [14] Lin H., Gan J., Rajendran A., Reis C.E.R., Hu B., *Phosphorus removal and recovery from digestate after biogas production*, [w:] Biernat K. (red.), *Biofuels – Status and Perspective*, 2015, s. 517–546, DOI: <http://dx.doi.org/10.5772/60474>
- [15] Łucka I.A., Kołodziej A.U., Szymańska M., Pilarski K., *Rolnicze wykorzystanie masy pofermentacyjnej z biogazowni rolniczej*, [w:] Jasiulewicz M. (red.), *Wykorzystanie biomasy w energetyce, aspekty ekonomiczne i ekologiczne*, Polskie Towarzystwo Ekonomiczne, Koszalin, 2011, s. 277–304.
- [16] Makara A., *Przetwarzanie gnojowicy świńskiej i jej separacja metodą filtracyjną*, Wydawnictwo IGSMiE PAN, Studia, Rozprawy, Monografie, 199, Kraków 2016.
- [17] Makara A., Kowalski Z., *Innovative bio-products for agriculture, Pigmanure utilization and treatment*, New York, Nova Science Publisher, 2016.
- [18] Mantovi P., Fumagalli L., Beretta G.P., i in., *Nitrate leaching through the unsaturated zone following pig slurry applications*, Journal of Hydrology, 316, 2005, 195–212.
- [19] Marañón E., Salter A., Castrillón L., Heaven S., & Fernández-Nava Y., *Reducing the environmental impact of methane emissions from dairy farms by anaerobic digestion of cattle waste*, Waste Management, 34, 2011, 1745–1751, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.wasman.2011.03.015>
- [20] Paavola T., Rintala J., *Effects of storage on characteristics and hygienic quality of digestates from four co-digestion concepts of manure and bio-waste*, Bioresource Technology, 99, 2008, 7041–7050, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biortech.2008.01.005>

- [21] Palm O., *The quality of liquid and solid digestate from biogas plants and its application in agriculture*, In Proceedings of ECN/ORBIT e.V. Workshop 2008, The future for Anaerobic Digestion of Organic Waste in Europe, Weimar, Germany, 2008.
- [22] Parkin G. F., Owen W.F., *Fundamentals of anaerobic digestion of wastewater sludge's*, Journal of Environmental Engineering, 1986, 867–920, DOI: [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(1986\)112:5\(867\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(1986)112:5(867))
- [23] Pontus K., *Osad pofermentacyjny oraz jego wykorzystanie*, *Ekoenergetyka- biogaz*; [w:] Cenian A., Gołaszewski J., Noch T. (red.), *Badania, technologie, prawo i ekonomika w rejonie Morza Bałtyckiego*, s. 108–117, Wydanie w ramach Bałtyckiego Forum Biogazu IV, Gdańsk, 2014.
- [24] Rozporządzenie Ministra Środowiska z 9 grudnia 2014 r. w sprawie katalogu odpadów.
- [25] Sahlström L., *A review of survival of pathogenic bacteria in organic waste used in biogas plants*, *Bioresource Technology*, 87, 2003, s. 161–166, DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524\(02\)00168-2](http://dx.doi.org/10.1016/S0960-8524(02)00168-2)
- [26] Smurzyńska A., Dach J., Dworecki Z., Czekala W., *Emisje gazowe podczas gospodarki gnojowicą*, *Inżynieria i Ochrona Środowiska*, 1, 19, 2016, s. 109–125,
- [27] Ton V.D., Duy N.V., *Studying on pig manure treatment to minimize environmental pollution and use bioenergy*, *International Journal of Environmental and Rural Development*, 1-2, 2010, s. 73–77.
- [28] Ustawa o nawozach i nawożeniu 10 lipca 2007, Dz.U. 2007, Nr 147, poz. 1033.
- [29] Vaneeckhaute C., Meers E., Michels E., Buysse J., Tack F.M.G., *Ecological and economic benefits of the application of bio-based mineral fertilizers in modern agriculture*, *Biomass and Bioenergy*, 49, 2013, s. 239–248, DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2012.12.036>
- [30] Walsh J.J., Jones D.L., Edwards-Jones G., Williams A.P., *Replacing inorganic fertilizer with anaerobic digestate may maintain agricultural productivity at less environmental cost*, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 175, 2012, s. 840–845, DOI: <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.201200214>
- [31] Węglarzy K., Podkówa W (red.) *Agro biogazownia*, Wyd. Zakład Doświadczalny Instytutu Zootechniki PIB, Grodziec Śląski, 2010.
- [32] Węglarzy K., Stekla J., *Agrobiogazownie w ochronie środowiska naturalnego*, *Wiadomości Zootechniczne*. XLVII, 3, 262, 2009, s. 59–67.
- [33] Węglarzy K., Skrzyżala I., Pellar A., *Agricultural biogas plant in Kostkowice*, First experiences. *Journal of Research and Applications in Agricultural Engineering*, 56, 4, 2011, 189-192.