

Dr hab. inż. Agnieszka Montusiewicz, prof. PL  
Wydział Inżynierii Środowiska  
Politechnika Lubelska  
Ul. Nadbystrzycka 40B  
20-618 Lublin

Lublin, dnia 15.02.2017 r.

## **Recenzja**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Sabiny Sartowskiej**

**pt.: „Wpływ parametrów technologicznych współfermentacji metanowej oraz dofermentowania na biodostępność i stabilność materii organicznej pofermentu”**

### **1. Podstawy formalne sporządzenia recenzji**

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Sabiny Sartowskiej przygotowana została na zlecenie Dziekana Wydziału Nauk o Środowisku Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, Pani dr hab. inż. Ewy Paturej, prof. zw. (pismo WNoŚ-DZ.53.4.2016 z dnia 19.12.2016 r.), na podstawie przedłożonego maszynopisu pracy. Główne kryterium oceny stanowiły wymogi stawiane rozprawom doktorskim zawarte w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jednolity Dz.U. 2014, poz. 1852) oraz w Rozporządzeniu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 30 października 2015 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, postępowaniu habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora (Dz.U. 2015, poz. 1842).

### **2. Ocena trafności wyboru tematyki pracy**

Poszukiwanie rozwiązań technologicznych zgodnych z zasadami zrównoważonego rozwoju jest obecnie jednym z istotnych kierunków badawczych w inżynierii środowiska. Efektywne wytwarzanie energii z odpadów w procesach ich beztlenowej stabilizacji pozwala na ograniczenie negatywnego oddziaływania odpadów na środowisko, obniża zużycie paliw kopalnych i zmniejsza koszty produkcji energii, a wykorzystanie pofermentów jako nawozów organicznych lub środków poprawiających jakość gleby umożliwia odzyskiwanie wartościowych składników w nich zawartych.

Współfermentacja metanowa, polegająca na symultanicznym beztlenowym rozkładzie odpadów organicznych o zróżnicowanym składzie, umożliwia intensyfikację produkcji biogazu będącego nośnikiem energii bez konieczności rozbudowy istniejących obiektów i stanowi korzystną alternatywę dla fermentacji monosubstratowej z uwagi na eliminację problemów z nią związanych. Do tej pory badania współfermentacji prowadzone były głównie w kierunku optymalizacji warunków wytwarzania biogazu z odpadów. W tym celu stosowano taki dobór proporcji i rodzaju substratów, by zapewnić ich synergizm, równowagę makro- i mikro-pierwiastków, rozcieńczenie substancji inhibujących lub

toksycznych we wsadzie oraz odpowiednie jego uwodnienie, a także by zwiększyć obciążenie reaktorów ładunkiem związków organicznych. Obecnie optymalizacja procesu prowadzona jest również pod kątem uzyskania pofermentu o jakości umożliwiającej jego przyrodnicze wykorzystanie. Jest to szczególnie istotne w przypadku fermentacji wielosubstratowej, gdy wzrasta ryzyko wytworzenia produktu niestabilnego, o wysokim stężeniu labilnej materii organicznej. Produkt taki nie powinien być stosowany jako nawóz organiczny z uwagi na możliwą immobilizację azotu i wyczerpanie tlenu w środowisku glebowym. W układach wielosubstratowych, w których składnikami wsadu są odchody zwierzęce, problemem może być również przekroczenie dopuszczalnych poziomów patogenów w pofermencie.

Stabilność i biodostępność związków organicznych można oceniać wykorzystując testy respirometryczne (AT4), a ich potencjał biogazowy stosując testy beztlenowe (GP21). Analiza korelacyjna wyników testów AT4 i GP21 była do tej pory wykorzystywana przez badaczy jako narzędzie do oceny substratów, ale jej wykorzystanie przez Doktorantkę do oceny pofermentów jest podejściem nowatorskim. Pomysł ten wykorzystali również badacze z Francji w najnowszej, opublikowanej w 2017 r. pracy, dotyczącej oceny jakości pofermentów pochodzących z systemów opartych na substratach, takich jak: osady ściekowe, odchody zwierzęce, odpady zielone, frakcja organiczna odpadów komunalnych oraz odpady z przetwórstwa żywności (Bioresour. Technol. 231 (2017) 65-74).

Przyrodnicze wykorzystanie pofermentów bogatych w związki lignocelulozowe powinno być poprzedzone ich obróbką, przy czym obróbka ta może dotyczyć jedynie fazy stałej (po separacji fazy ciekłej) lub pofermentu jako całości (bez separacji faz). Jest to nowy kierunek badawczy, a prace z tego zakresu są rzadko spotykane w literaturze przedmiotu. W ostatnim pięcioleciu w renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym opublikowano jedynie kilka artykułów prezentujących wyniki badań dotyczących obróbki mechanicznej, termicznej, chemicznej oraz enzymatycznej pofermentów i/lub ich fazy stałej (Bioresour. Technol. 178 (2015) 194-200; Waste Manage 48 (2016) 209-217; Bioresour. Technol. 102 (2011) 2026-2032; J. Environ. Chem. Eng. 4 (2016) 4801-4807; Fuel Process. Technol. 137 (2015) 359-365). Wśród nich nie ma doniesień dotyczących dofermentowania pofermentów w warunkach psychrofilowych. W tym kontekście tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Sabiny Sartowskiej wpisuje się w priorytetowy nurt badań dotyczących współfermentacji, zagospodarowania pofermentów i zrównoważonej gospodarki odpadami.

W mojej ocenie problematyka pracy jest aktualna i istotna z punktu widzenia inżynierii środowiska.

### **3. Ocena struktury pracy**

Recenzowana praca doktorska liczy 99 stron, a jej struktura jest typowa dla rozpraw naukowych o charakterze eksperymentalnym. Dysertację rozpoczyna spis treści oraz streszczenie w języku polskim i angielskim, uzupełnione słowami kluczowymi. W krótkim wstępie Doktorantka przedstawia zarys problematyki wytwarzania biogazu z odpadów, podkreślając znaczenie jakości pofermentu, w tym jego stabilności i potencjału nawozowego jako parametrów kluczowych z uwagi na możliwości przyrodniczego wykorzystania.



Pozostała część pracy obejmuje 6 rozdziałów merytorycznych. Po przeglądzie literatury, przedstawiono cel i zakres pracy, metodykę badań, a następnie wyniki badań, ich dyskusję i podsumowanie. Nietypowym podejściem jest zestawienie najważniejszych osiągnięć pracy w rozdziale *Podsumowanie*, bez ich wyodrębnienia w formie wniosków. W mojej opinii takie wyodrębnienie, odnoszące się szczególnie do tezy pracy, stanowiłoby jej ważny walor i podkreślenie osiągnięć badawczych Doktorantki. Pracę zamyka spis literatury oraz spis tabel i rysunków.

Rozdział 1 - *Część teoretyczna* - obejmuje 17 stron (co stanowi ok. 17% objętości pracy) i przedstawia krótką charakterystykę biomasy wykorzystywanej do produkcji biogazu oraz pofermentu, w tym surowców roślinnych i ich kiszonek, odpadów z przemysłu rolno-spożywczego, frakcji organicznej odpadów komunalnych, komunalnych osadów ściekowych oraz odchodów zwierzęcych. W tej części pracy omówiono również podstawy współfermentacji i problemy procesowe z nią związane, oraz metody oceny przydatności pofermentów do ich przyrodniczego wykorzystania. Rozdział kończy uzasadnienie podjęcia tematu badań oraz sformułowanie hipotez badawczych.

W rozdziale 2 przedstawiono zwięźle *Cel i zakres pracy*. Rozdział 3 obejmuje *Metodykę badań*, tj. opis stanowiska badawczego, charakterystykę surowców stosowanych jako substraty w procesie współfermentacji mezofilowej, sposób organizacji badań oraz metody analityczne, obliczeniowe i statystyczne wykorzystane w pracy.

Najobszerniejszą część pracy (ok. 39% jej objętości) stanowi rozdział 4 - *Wyniki badań*, w którym w sposób uporządkowany przedstawiono rezultaty eksperymentów współfermentacji metanowej oraz dofermentowania pofermentów przy zastosowaniu wsadów dwu-, trój- i czteroskładnikowych. Rozdział ten uzupełnia analiza właściwości pofermentów.

*Dyskusję* wyników badań przedstawiono w rozdziale 5, liczącym 13 stron. Merytoryczną część dysertacji zamyka jednostronicowy rozdział *Podsumowanie*. Jak wcześniej wspomniano, w pracy nie zamieszczono odrębnego rozdziału prezentującego wnioski.

Pracę kończy *Spis literatury* (rozdział 7) obejmujący 99 pozycji, głównie anglojęzycznych, przedstawionych w porządku alfabetycznym (74 pochodzą z ostatniego dziesięciolecia), oraz *Spis tabel* (rozdział 8) i *Spis rysunków* (rozdział 9) z podaniem numeracji stron, na których się znajdują.

#### **4. Ocena merytoryczna**

Przedmiotem badań, będących podstawą do przygotowania rozprawy doktorskiej mgr inż. Sabiny Sartowskiej, była mezofilowa współfermentacja metanowa wsadów dwu-, trój- i czteroskładnikowych prowadzona w zróżnicowanych warunkach operacyjnych (OLR 2 i 3 kg smo/m<sup>3</sup>d, HRT 45, 60 dób) oraz dofermentowanie uzyskanych pofermentów w warunkach psychrofilowych w czasie 120 dób. Badania dotyczyły oceny wpływu składu wsadów oraz parametrów operacyjnych współfermentacji na wydajność biogazu i biologiczną stabilność pofermentów oraz pozostałości po dofermentowaniu. Efektywność współfermentacji



metanowej oceniano w oparciu o produkcję biogazu, moduł przefermentowania i stabilność pofermentów. Biodostępność oraz stabilność pofermentów określano wykorzystując testy respirometryczne i beztlenowe (AT4, GP21). Analizowano także odczyn, zasadowość oraz stężenia rozpuszczonych związków organicznych, lotnych kwasów tłuszczowych, azotu amonowego i fosforu ogólnego w cieczy nadosadowej pofermentów. Efektywność dofermentowania oceniano w oparciu o procentowy ubytek suchej masy organicznej oraz aktywność biologiczną i potencjał biogazowy pozostałości po dofermentowaniu pofermentów. Analizowano także odczyn, zasadowość oraz stężenia rozpuszczonych związków organicznych, lotnych kwasów tłuszczowych, azotu amonowego i fosforu ogólnego w cieczy nadosadowej pozostałości po dofermentowaniu pofermentów. Wysoko oceniam wybór przedmiotu badań, kompleksowe podejście do problematyki współfermentacji odpadów oraz sposób oceny uzyskanych efektów.

Należy podkreślić, że tytuł pracy, jej cel oraz hipotezy badawcze zostały trafnie sformułowane, a przyjęty zakres umożliwił realizację wskazanego przez Autorkę celu.

Wstęp wprowadza czytelnika w problematykę pracy, ale pojawia się w nim istotna nieścisłość lub skrót myślowy. Proszę o wyjaśnienie, co Autorka miała na myśli pisząc, że „fermentacja metanowa minimalizuje przetrwanie patogenów” (str. 8).

Przegląd literatury stanowi logiczne wprowadzenie do zagadnień, będących przedmiotem pracy, choć luki badawcze z zakresu omawianej problematyki nie zostały tu jasno zaakcentowane. Istotnym elementem jest ostatni akapit, uzasadniający celowość podjęcia tematyki badań i zawierający hipotezy badawcze.

W tej części pracy pojawiają się pewne nieścisłości i błędy, stąd zamieszczone poniżej szczegółowe uwagi. Potencjał biogazowy frakcji organicznej odpadów komunalnych podano cytując nieco archaiczne źródło z 1993 r., zamiast oprzeć się na aktualnych wynikach badań w tym zakresie (Waste Manage 33 (2013) 1626-1632; Waste Manage 36 (2015) 147-155). Podana przez Autorkę wartość średniej produkcji metanu z osadów ściekowych  $590 \text{ dm}^3/\text{kg smo}$  jest zbyt wysoka i dotyczy raczej produkcji biogazu (str. 16). Charakterystyka frakcji organicznej odpadów komunalnych oraz osadów ściekowych jest znacznie skromniejsza w porównaniu z innym substratami i nie obejmuje istotnych danych dotyczących zawartości suchej masy, suchej masy organicznej czy proporcji C/N. Nie wspomniano również, że fermentowane mogą być osady wstępne i wtórne, znacznie różniące się podatnością na rozkład w warunkach beztlenowych. Ciekawe dane przedstawione w tabeli 11, dotyczące zróżnicowania składników mineralnych w odpadach z hodowli zwierząt, nie zostały skomentowane w aspekcie przyrodniczego wykorzystania pofermentów. Na str. 19 podano niewłaściwą jednostkę masowego natężenia przepływu i zbyt wysoką wartość proporcji C/N = 20-70, a na str. 22 – zbyt wysoką wartość zasadowości. Autorka porusza problematykę wstępnej obróbki substratów, ale jako przykład podaje jedynie zastosowanie mikrofal. Szkoda, że nie wspomniano o metodach obróbki termochemicznej i mechanicznej (Bioresour. Technol. 130 (2013) 187-197; Renew Energy 83 (2015) 474-482). Akapit drugi zamieszczony na str. 24 wydaje się być wyrwany z kontekstu i nie ma logicznego powiązania z akapitem go poprzedzającym.



Opis metodyki badań w pkt. 3.1, 3.3 i 3.4 stanowi w mojej ocenie najłabszą część pracy. W pkt. 3.1 podano wymiary i kubaturę reaktora, ale nie podano jego objętości czynnej. Nie sprecyzowano temperatury, w jakiej prowadzono eksperymenty współfermentacji, podając jedynie informację o warunkach mezofilowych. Czy temperaturę współfermentacji utrzymywano na stałym poziomie we wszystkich eksperymentach? Brak również informacji, w jakiej temperaturze pracowały reaktory dofermentowania, wiadomo tylko, że były nieogrzewane. Zawory zamontowane w części pokrywowej zbiornika to raczej zawory odcinające, a nie zwrotne. Bardzo wartościowym byłoby przygotowanie schematu współpracy reaktorów współfermentacji i dofermentowania. Jeśli wszystkie miały taką samą kubaturę (rozumiem, że brak różnic w budowie oznacza brak różnic kubaturowych), to uzyskanie czasu dofermentowania 120 dni i zachowanie układu przepływowego wymagało zastosowania oprócz reaktora współfermentacji dwóch lub trzech reaktorów dofermentowania połączonych szeregowo. Proszę o wyjaśnienie, z jaką częstotliwością zasilano reaktory wsadem i odprowadzano poferment (dla reaktorów współfermentacji i dofermentowania) i jaka była objętość wsadu kierowanego do tych reaktorów.

Punkt 3.2 przygotowano właściwie. Jedyna uwaga dotyczy tytułu tabeli 14, gdyż nie wszystkie przedstawione w niej odpady można zaliczyć do odpadów przemysłu rolno-spożywczego. W pkt. 3.3 bardzo wartościowym jest klarowny opis typu wsadów i tabelaryczne zestawienie składu wsadów oraz parametrów technologicznych współfermentacji metanowej. Wprowadzone symbole znacznie ułatwiają analizę wyników badań. W tej części zabrakło jednak szeregu istotnych informacji. Proszę o wyjaśnienie, w jaki sposób uzyskano wydłużenie HRT przy zwiększonym OLR i czym kierowała się Autorka wybierając dla wsadu czteroskładnikowego obciążenie na poziomie  $3 \text{ kg smo/m}^3\text{d}$ , a nie wartość niższą. Informacja dotycząca całkowitego czasu prowadzenia eksperymentu współfermentacji, różnego dla wsadów dwu- trój- i czteroskładnikowych, powinna znaleźć się w części metodycznej, a nie w rozdziale dotyczącym wyników. Autorka pisze, że „próbki pofermentów pobierano z reaktora trzy razy w tygodniu”. Czy ma na myśli częstotliwość poboru prób do analizy? Brakuje szczegółowych informacji dotyczących organizacji eksperymentów dofermentowania.

Punkt 3.4 zatytułowany „charakterystyka wsadów, pofermentów oraz pozostałości po dofermentowaniu” zawiera inną treść, dotyczącą metod analitycznych wykorzystanych w pracy. Natomiast charakterystykę wsadów zamieszczono w części wynikowej, zamiast w części metodycznej. Metody obliczeniowe (pkt. 3.5) i statystyczne (pkt. 3.6) wykorzystane w pracy przedstawiono w sposób klarowny.

Dobór metod badawczych, analitycznych i statystycznych oceniam jako właściwy i wystarczający do realizacji celów pracy.

Najmocniejszą stroną dysertacji jest rozdział poświęcony wynikom badań. Forma prezentacji jest bardzo czytelna, opis wyników jasny i uporządkowany, a analiza korelacyjna w odniesieniu do pofermentów i pozostałości po dofermentowaniu – nowatorska. Bardzo wartościowe i cenne jest zestawienie zbiorczych wyników w Tabelach 19 oraz 20. Ta część dysertacji robi bardzo dobre wrażenie, a nieliczne uwagi mają raczej charakter wskazówek na



przyszłość. Przedstawiono je poniżej. W opisie wyników analizy statystycznej lepiej używać frazy, która świadczy o kierunku zmian - np. „wystąpił statystycznie istotny wzrost (lub spadek)” zamiast „wystąpiła statystycznie istotna różnica”. Wskazanim byłoby także unikać powielania danych w tekście i tabelach (np. str. 45, 46, 49, 59) oraz powtarzania informacji zawartych w opisie metodyki. Podsumowanie części wynikowej, ukazujące rozwiązanie technologiczne najbardziej obiecujące z punktu widzenia przyrodniczego wykorzystania pofermentów, stanowiłoby cenną przesłankę do aplikacji wyników badań.

Dyskusja zaprezentowana przez Doktorantkę jest logiczna i poparta argumentami bazującymi na wynikach prezentowanych w literaturze przedmiotu. Jednak Autorce nie do końca udało się powiązać wyniki innych badaczy z wynikami badań własnych. Część dyskusji dotycząca pofermentu, który może być wykorzystywany jako paliwo, w mojej ocenie powinna znaleźć się w rozdziale 1.3, gdyż nie dotyczy zagadnień prezentowanych w części badawczej pracy.

Podsumowanie zawiera wykaz najważniejszych osiągnięć pracy oraz elementy wniosków. Uważam jednak, że w rozprawie doktorskiej wnioski odnoszące się do hipotez badawczych powinny zostać wyodrębnione.

Podsumowując ocenę merytoryczną pracy stwierdzam, że uwagi zamieszczone powyżej nie wpływają na ogólną, pozytywną opinię rozprawy doktorskiej mgr inż. Sabiny Sartowskiej. Dysertacja zawiera obszerny materiał eksperymentalny, uporządkowany i zaprezentowany w sposób jasny i klarowny. Należy podkreślić duży nakład pracy i czasu związany z przeprowadzeniem badań, a także ich aplikacyjny charakter.

## **5. Uwagi redakcyjne**

Praca jest starannie przygotowana pod względem redakcyjnym. Liczba błędów edycyjnych i językowych jest niewielka, jednak Autorka nie ustrzegła się drobnych błędów interpunkcyjnych, typograficznych (błędy literowe - str. 11, 23, 37, 75; tzw. „sieroty” na końcu wiersza - str. 50, 65), a także nieścisłości terminologicznych i skrótów myślowych – przykładowo we frazach: „biogaz po osuszeniu, oczyszczeniu i zagęszczeniu metanu” (str.8), „w buraku o podwyższonej masie zależność buraka do liści wynosi 1:0,3-0,4” (str. 11), „dostępność substratu do fermentacji metanowej wymaga przechowywania” (str.11), „lotne substancje stałe” (str. 22), „potencjał metanowy wynika ze składników organicznych w kale i moczu” (str.17).

Na podkreślenie zasługuje bardzo staranna prezentacja wyników w formie graficznej i tabelarycznej. Rysunki i tabele są czytelne, a ich tytuły precyzyjnie sformułowane (wyjątek stanowi tytuł tabeli 14). Za szczególnie wartościową uważam graficzną prezentację wyników analizy korelacyjnej (rys. 48, 49, 50, 51, 52, 53 i 54). Z wyjątkową starannością przygotowano również spis literatury oraz spis rysunków i tabel.

## **6. Podsumowanie i wnioski końcowe**

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi wartościowe opracowanie naukowe, a wyniki badań w sposób znaczący poszerzają stan wiedzy dotyczącej wpływu składu wsadów

oraz parametrów technologicznych współfermentacji metanowej (OLR i HRT) na wydajność biogazu i biologiczną stabilność pofermentów oraz pozostałości po dofermentowaniu.

Na szczególnie podkreślenie zasługuje:

- wybór problematyki, która wpisuje się w priorytetowy nurt badań dotyczących współfermentacji, zagospodarowania pofermentów i zrównoważonej gospodarki odpadami,
- nowatorskie podejście polegające na zastosowaniu analizy korelacyjnej wyników testów respirometrycznych i beztlenowych do oceny stabilności i biodegradowalności pofermentów oraz pozostałości po dofermentowaniu,
- kompleksowość badań, która umożliwiła dokonanie oceny biologicznej stabilności pofermentów generowanych w procesie współfermentacji oraz pozostałości po ich dofermentowaniu w zależności od składu wsadów i parametrów technologicznych współfermentacji,
- znaczący potencjał aplikacyjny wyników.

Stwierdzam, że mgr inż. Sabina Sartowska spełnia kryteria określone w Ustawie o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (tekst jednolity Dz.U. 2014 poz. 1852) dla kandydatów ubiegających się o nadanie stopnia naukowego doktora. Doktorantka przedstawiła oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wykazała wpływ składu wsadów oraz parametrów technologicznych współfermentacji metanowej (OLR i HRT) na wydajność biogazu i biologiczną stabilność pofermentów oraz pozostałości po dofermentowaniu.

Wnoszę zatem do Rady Wydziału Nauk o Środowisku Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie ***o dopuszczenie mgr inż. Sabiny Sartowskiej do dalszych etapów postępowania kwalifikacyjnego o nadanie stopnia naukowego doktora nauk technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska.***

Agnieszka Montusiewicz

