

RECENZJA

rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Agnieszki Żak
pt.: „Ocena efektywności współfermentacji w układzie dwustopniowym z wykorzystaniem
zmodyfikowanego modelu ADM1”
przygotowanej pod kierunkiem naukowym Promotora dr hab. Agnieszki Montusiewicz, prof. PL
oraz Promotora pomocniczego dr inż. Magdaleny Lebiockiej

Podstawą formalną przygotowania recenzji była uchwała Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki na Wydziale Inżynierii Środowiska z dnia 15.05.2023 r. przekazana pismem Przewodniczącej Dyscypliny prof. dr hab. Małgorzaty Pawłowskiej z dnia 22.05.2023 roku (Ś-86/2023).

1. Znaczenie podjętej tematyki badawczej

Fermentacja beztlenowa polega na mikrobiologicznej konwersji materii organicznej do biogazu zawierającego metan i ditlenek węgla oraz stabilnego produktu ubocznego zwanego pofermentem. W ten sposób z biomasy odpadowej można wytwarzać energię elektryczną i/lub ciepłą, a opcjonalnie po wzbogaceniu biogazu również biopaliwa. Fermentacja należy do procesów mało stabilnych. Nieodpowiedni skład substratu, niewłaściwe warunki eksploatacji a zwłaszcza przeciążenie komór fermentacyjnych mogą być powodem wystąpienia zakłóceń prowadzących do spadku produkcji biogazu. Przy dużej różnorodności substratów i kosubstratów oraz tendencji do intensyfikacji fermentacji, empiryczne wyznaczenie optymalnych parametrów procesu wymaga długotrwałych i kosztownych badań. W takim przypadku szczególnie przydatne są metody symulacyjne, których rozwój zależy od dostępności odpowiednio skonstruowanych modeli.

2. Struktura rozprawy

Rozprawa doktorska mgr inż. Agnieszki Żak pt. „Ocena efektywności współfermentacji w układzie dwustopniowym z wykorzystaniem zmodyfikowanego modelu ADM1” liczy 156 stron wraz z zawartymi w pracy 22 rysunkami, 31 tabelami oraz 8 załącznikami. Zasadniczą

część pracy tworzy dziewięć rozdziałów: Wstęp (1), po którym następuje Cel i zakres pracy (2), a w dalszej kolejności Przegląd piśmiennictwa (3). Część badawczą stanowi Metodyka badań (4) oraz Wyniki badań (5). W kolejnym rozdziale Dyskusja wyników (6), Doktorantka wyniki badań własnych porównuje z wynikami innych autorów, co pozwala jej zakończyć pracę rozdziałem Wnioski (7). Następne dwa rozdziały stanowią Streszczenie w języku polskim (8) i angielskim (9). Po nich następuje Piśmiennictwo, które stanowi wykaz publikacji zawierający 198 pozycji, gdzie większość stanowią artykuły naukowe publikowane w ostatnim dziesięcioleciu. Dodatkowo umieszczono spis wykorzystanych w pracy źródeł internetowych. Pracę kończy spis rysunków, tabel i załączników.

Rozprawa została przygotowana w bardzo staranny sposób. Język jest jasny i komunikatywny. Odpowiednia struktura rozdziałów spełnia wszystkie wymogi formalne stawiane pracom doktorskim.

3. Ocena merytoryczna pracy

Wstęp. We wstępie nakreślono problematykę procesu fermentacji metanowej, a także sytuację dotyczącą stanu biogazowni w Polsce, sposoby intensyfikacji produkcji biogazu oraz opisano model ADM1.

Cel i zakres pracy. Celem pracy było poszerzenie wiedzy na temat prowadzenia procesów beztlenowych w układach dwustopniowych zasilanych mieszaninami wielosubstratowymi. Zaproponowano autorski sposób dozowania substratów, do komór fermentacji, różniących się kinetyką hydrolizy, który miał na celu poprawę stabilizacji procesu oraz zwiększenie produkcji biogazu. W tej części określono zakres badań oraz przedstawiono tezy rozprawy.

Stwierdzam, że cele pracy sformułowano poprawnie, wyraźnie wytyczając kierunek badań, a zakres badań i analiz symulacyjnych jest adekwatny do przyjętych celów pracy i jednoznacznie określa jej strukturę.

Przegląd piśmiennictwa. Informacje zaczerpnięte z literatury podzielono na 5 rozdziałów, w których kolejno scharakteryzowano proces fermentacji metanowej, metody prowadzące do zwiększenia wydajności produkcji biogazu, nakreślono sytuację rynku biogazowego w Polsce, następnie przedstawiono model ADM1 i zakończono wyjaśnieniem zasadności wykorzystania narzędzi symulacyjnych do modelowania procesów beztlenowych oraz opisem autorskiego sposobu dozowania substratu do komór fermentacji.

W pierwszym podrozdziale opisano etapy procesu fermentacji metanowej, następnie przedstawiono czynniki wpływające na produkcję biogazu. Wyróżniono temperaturę procesu, odczyn (pH), substancje pokarmowe, zawartość suchej masy w komorze fermentacji oraz czynniki inhibitujące, do których zaliczono stężenie siarczanów, jonu amonowego i lotnych kwasów tłuszczowych. Następnie opisano najważniejsze parametry operacyjne procesu fermentacji metanowej, takie jak obciążenie komór ładunkiem związków organicznych, hydrauliczny czas zatrzymania oraz stosunek lotnych kwasów tłuszczowych do zasadowości ogólnej.

W kolejnym podrozdziale, spośród stosowanych rozwiązań zwiększania wydajności procesu fermentacji metanowej opisano fermentację dwustopniową, współfermentację, obróbkę wstępną metodami fizycznymi, chemicznymi i biologicznymi oraz bioaugmentację z udziałem wyselekcjonowanych szczepów mikroorganizmów.

W podrozdziale 3 przedstawiono stan rozwoju biogazowni na rynku Polskim, uwzględniając liczbę instalacji, roczną ilość zużywanego substratu oraz ilość produkowanego metanu. Podrozdział zakończono charakterystyką materiałów wsadowych wykorzystanych do badań współfermentacji.

W kolejnym podrozdziale przedstawiono i scharakteryzowano model ADM1. Opisano strukturę i parametry modelu. Udokumentowano również przydatność modelu w badaniach symulacji fermentacji metanowej różnego typu substratów i ich mieszanin, w tym w obiektach w skali technicznej.

Przegląd literatury zakończono opisem modyfikacji modelu ADM1. Na potrzeby dysertacji, związki organiczne podzielono na frakcję wolno- i szybko rozkładalną oraz dodano autorski sposób zasilania substratami komór fermentacji w układzie dwustopniowym.

Po zapoznaniu się z przedstawionym przeglądem danych literaturowych, można stwierdzić, że wszystkie aspekty zagadnienia ściśle związane z przedmiotem badań własnych zostały wnikliwie rozpoznane i opisane przez Doktorantkę. Przegląd literatury oparty na aktualnych, głównie zagranicznych artykułach, jest wykonany i przedstawiony ze szczególną starannością. Świadczy to o dobrych predyspozycjach Doktorantki do pogłębiania tematu. Dokonano szczegółowej analizy dotychczasowych doniesień na podstawie szerokiego przeglądu publikacji innych autorów.

Metodyka badań. Dokładnie przedstawiono zarówno część empiryczną jak i symulacyjną procesu fermentacji metanowej w układzie dwustopniowym z wykorzystaniem modelu

ADM1xp. Opisano metody wykorzystane do interpretacji wyników badań, tj. stopień rozkładu materiału organicznego, również z uwzględnieniem uzyskanej produkcji biogazu. W części dotyczącej modelowania, precyzyjnie przedstawiono modyfikację modelu ADM1 dokonaną przez Doktorantkę oraz scharakteryzowano substraty na podstawie badań własnych i danych literaturowych, a wyniki umieszczono w tabeli 5 (str. 47). Zabrakło jednak opisanie analiz laboratoryjnych składników wymienionych w tabeli 5 tj. białka surowego, tłuszczu surowego, włókna surowego, bezazotowych substancji wyciągowych, ligniny kwaśno-detergentowej, włókien kwaśno-detergentowych oraz włókien neutralno-detergentowych, który powinien być zawarty w części dotyczącej metod analitycznych (4.1.4. Metody analityczne – analiza właściwości substratów). Ponadto, charakterystykę substratów można by było uzupełnić o zawartość celulozy oraz hemiceluloz, gdyż ich wzajemne proporcje definiują biodegradowalność substratu. Wzbogaciłoby to opis struktury związków lignocelulozowych. Ponadto przy opisie frakcji inertej (str. 49) jako jednostkę stężenia frakcji podano jednostkę masy (g ChZT), a nie stężenia (g ChZT/m³).

W podrozdziale 4.2.4 Założenia i opis badań symulacyjnych opisano oraz zilustrowano układ technologiczny fermentacji beztlenowej składający się z dwóch komór, według Autorki, „fermentacji kwasogennej (I stopnia)” oraz „komory metanogennej (II stopnia)”. Z uwagi na fakt, iż w proponowanym układzie technologicznym fermentacja kwasogenna nie jest ukierunkowana głównie na produkcję lotnych kwasów tłuszczowych oraz biowodoru proponuję zmianę nazwy układu technologicznego na „dwustopniowa fermentacja metanowa połączona w układzie szeregowym z komorą pierwotną i wtórną”.

Podsumowując stwierdzam, że przyjęta przez Doktorantkę metodyka badań jest odpowiednia do realizacji sformułowanych celów badawczych. Na uwagę zasługuje fakt, iż parametry kinetyczne procesu hydrolizy frakcji wolno- i szybko rozkładalnej zostały wyznaczone na podstawie badań empirycznych.

Wyniki badań. Część wyników badań została podzielona na 6 rozdziałów rozpoczynając od opisanie testów porcjowych substratów, poprzez charakterystykę danych wejściowych, kalibrację, symulację współfermentacji dwu- i trójskładnikowej, kończąc na uwagach o charakterze aplikacyjnym. Autorka zadbała o bardzo jasny i czytelny układ poszczególnych podrozdziałów zawierający powtarzalne elementy opisu wyników, co przyczynia się do szybkiego zrozumienia i analizy tekstu. W podrozdziale dotyczącym testów porcjowych substratów przedstawiono charakterystykę kiszonki kukurydzy, wysłodków buraczanych,

odpadów owocowo-warzywnych, serwatki oraz inokulum. Ponadto podano uzysk energii elektrycznej oraz ciepłej dla każdego substratu. Jednak brakuje informacji czy przytoczone wartości zostały zaczerpnięte z danych literaturowych, czy wyliczone na podstawie badań własnych. W drugim przypadku, metodykę badań należy uzupełnić o wzory matematyczne, które posłużyły do wyliczenia tych wartości.

Na uwagę zasługuje fakt, iż uzyskano bardzo wysoki stopień dopasowania wyników symulacyjnych do wyników badań laboratoryjnych dla początkowo wyznaczonych parametrów kinetycznych hydrolizy substratów, co świadczy o dobrze przeprowadzonej metodologii wyznaczania stałych hydrolizy związków wolno- i szybko biodegradowalnych. Ta część pracy powinna być uzupełniona o informację dotyczącą pozostałych wartości parametrów modelu, czy zostały przyjęte zgodnie z oryginalnym modelem ADM1xp, czy w zależności od rodzaju substratu dokonano korekty ich wartości.

Następnie wykonano badania symulacyjne współfermentacji dwu- i trójskładnikowej. Doktorantka wykazała, iż skierowanie części materiału wsadowego do komory wtórnej fermentacji, ma znaczący wpływ na produkcję biogazu w układach, w których jako kosubstraty wykorzystuje się materiały o różnych parametrach kinetycznych etapu hydrolizy. W podrozdziale 5.6. Uwagi o charakterze aplikacyjnym wykazano aplikacyjny charakter wyników badań empirycznych i symulacyjnych z udziałem modelu ADM1xp, gdzie zmiana dozowania substratów wpływa na bilans energetyczny całej inwestycji co ma wymiar ekonomiczny, gdyż „wzrost produkcji biogazu o 1% skutkuje możliwością zmniejszenia dozowania materiału wsadowego (np. kiszonki kukurydzy) do komór fermentacji o ok. 0,5 t/d w celu utrzymania stałej produkcji biogazu”.

Dyskusja wyników i wnioski. O dojrzałości naukowej Doktorantki świadczy dyskusja wyników, gdzie nie tylko porównano wyniki badań własnych z wynikami innych autorów, ale również dokonano ich interpretacji. Pozwoliło to na prawidłowe sformułowanie wniosków, ale i również na wskazanie aplikacyjnego potencjału modelowania procesów beztlenowych w skali technicznej.

Podsumowanie oceny merytorycznej pracy

Stwierdzam, że podjęta tematyka pracy jest oryginalna i stanowi istotne uzupełnienie wiedzy w zakresie fermentacji metanowej w układach dwustopniowych zasilanych mieszaninami wielosubstratowymi. Podjęte badania wnoszą nowe wartości poznawcze, w szczególności

wyjaśnienie w jaki sposób substraty o różnych parametrach kinetycznych etapu hydrolizy wpływają na proces rozkładu beztlenowego.

Do głównych osiągnięć naukowych należy zaliczyć wykazanie, że:

- przy odpowiednim doborze substratów podczas fermentacji metanowej istnieje możliwość zwiększania efektywności produkcji biogazu poprzez modyfikację sposobu ich dozowania do komór fermentacyjnych,
- przy zastosowaniu materiałów wsadowych o różnych parametrach kinetycznych etapu hydrolizy, skierowanie substratu o wyższej kinetyce reakcji bezpośrednio do komory fermentacji wtórnej pozwala na intensyfikację produkcji biogazu,
- przy zastosowaniu kosubstratów o zbliżonej kinetyce hydrolizy uzyskanie wysokiej produkcji biogazu jest możliwe jedynie przy zastosowaniu tradycyjnego sposobu dozowania substratu,
- częściowe przekierowywanie jednego substratu do komory fermentacji wtórnej wpływa na stabilizację procesu.

Analizując treść pracy, opis wyników, dyskusję i wnioski należy stwierdzić, że cele badawcze zostały osiągnięte i udokumentowane wynikami badań oraz analiz symulacyjnych. Ponadto, należy podkreślić fakt, iż wyniki analiz mają charakter aplikacyjny i mogą być zastosowane w skali przemysłowej w biogazowniach rolniczych. Przedstawione w recenzji uwagi krytyczne są głównie natury formalnej i redakcyjnej nie wpływają na wysoce pozytywną wartość merytoryczną pracy.

4. Wniosek końcowy

W nawiązaniu do obowiązujących przepisów prawnych (Dz. U. 2003, Nr 65 poz. 595 z późniejszymi zmianami), niniejszym potwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska, spełnia wymogi oryginalności w rozwiązaniu naukowego problemu oraz wykazuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktorantki w danej dyscyplinie naukowej, jak również umiejętność prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Po przeanalizowaniu przedstawionej rozprawy doktorskiej w celu jej recenzji, stwierdzam, że opracowanie spełnia powyższe kryteria. Treść rozprawy potwierdza wiedzę teoretyczną Doktorantki, a precyzyjne sformułowanie celu i zakresu badań, ich planowanie, opis oraz interpretacja wyników analiz symulacyjnych świadczą o dojrzałości naukowej Doktorantki i zdolności do prowadzenia samodzielnej pracy naukowej. Na tej podstawie, wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa

i Energetyki na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Lubelskiej o dopuszczenie mgr inż. Agnieszki Żak do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.

Kataryne Birkowske