

Lublin 12.06.2023

Prof. dr hab. Dariusz Dziki
Katedra Techniki Ciepłej i Inżynierii Procesowej
Wydział Inżynierii Produkcji
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Akademicka 13, 20-950 Lublin

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Janusza Kozłowskiego
pt. „Efektywność energetyczna produkcji metanu w procesie fermentacji w wydzieloną fazą
hydrolizy kwaśnej”

Podstawą wykonania recenzji było pismo Przewodniczącego Rady Naukowej
Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu, prof. UUP dr
hab. inż. Macieja Zaborowicza, z dnia 22.05.2023 r., w związku z powołaniem mnie na przez
Radę Wydziału Rolnictwa i Bioinżynierii UP w Poznaniu na recenzenta ww. rozprawy.

Recenzję sporządzono na podstawie maszynopisu pracy doktorskiej pt.: „Efektywność
energetyczna produkcji metanu w procesie fermentacji w wydzieloną fazą hydrolizy kwaśnej”

Ogólna charakterystyka rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa obejmuje 90 stron maszynopisu oraz 4 załączniki
dotyczące analizy finansowej oceny efektywności energetycznej produkcji metanu. Zawiera
także streszczenie w j. polskim i angielskim. Praca doktorska ma układ charakterystyczny dla
tego rodzaju opracowań i składa się z 9 głównych rozdziałów: wstępu, analizy zagadnienia w
świetle literatury, celu i zakresu pracy, materiałów i metod, wyników i dyskusji, dyskusji,
wniosków, spisu literatury oraz załączników. Spis literatury obejmuje 96 pozycji, z czego 79
to cytowane oryginalne prace naukowe, w zdecydowanej większości wydane w j. angielskim.;
8 rozporządzeń i 9 stron internetowych.

Uzasadnienie podjęcia tematu

Produkcja biogazu jest przykładem gospodarki bezodpadowej o obiegu zamkniętym,
która skutecznie zmniejsza zanieczyszczenie środowiska i efektywnie wykorzystuje odpady
organiczne, przyczyniając się do zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii w
krajowych systemach energetycznych. Mimo, że wiedza naukowa na temat tego procesu jest
na wysokim poziomie, to wciąż poszukiwane są ulepszenia surowcowo-procesowe, celem

zwiększenia ekonomiczności i efektywności produkcji. Jest to szczególnie istotne w przypadku materiałów lignocelulozowych, takich jak wybrana przed Doktoranta kiszonka z kukurydzy, których struktura utrudnia ich fermentację metanową. Stąd też istnieje potrzeba poszukiwania rozwiązań prowadzących do znalezienia optymalnych parametrów i czynników technologicznych, pozwalających na poprawę wydajności i ekonomiczności produkcji biogazu z kiszonki. Dlatego też postawiony przez Doktoranta problem naukowy należy uznać za prawidłowy i dobrze wpisujący się we współczesne trendy badawcze.

Merytoryczna ocena pracy

Rozprawa doktorska rozpoczyna się od jednostronicowego streszczenia, w którym Doktorant uzasadnia podjęcie tematu badawczego, przedstawia postawiony problem naukowy i podsumowuje uzyskane rezultaty.

Rozdział 1 stanowi „Wstęp”, (5 stron maszynopisu), w którym Pan mgr Kozłowski opisuje działania podjęte w celu osiągnięcia przez Unię Europejską i rząd RP w sprawie neutralności klimatycznej i poprawy stanu środowiska. W rozdziale tym autor uzasadnia również konieczność produkcji biogazu, nawiązując do jego rodzajów i metod hydrolizy przedstawia i uzasadnia postawiony problem naukowy. Rozdział ten jako wstęp do pracy, jest zbytnio rozbudowany i niektóre informacje, łącznie z rys. 1, powinny znaleźć się w przeglądzie literatury. Natomiast postawiony problem naukowo-badawczy nie budzi zastrzeżeń.

Ponadto, w rozprawie Autor powinien unikać sformułowań typu „na poniższym” lub „powyższym” wykresie czy tabeli.

Rozdział 2 to „Analiza zagadnienia w świetle literatury”, składający się z trzech podrozdziałów. W pierwszym z nich Doktorant charakteryzuje rynek biogazu w Polsce, opierając się na najnowszych danych literaturowych i wykazuje, że pomimo, iż Polska należy do krajów o dużym potencjale energetycznym w zakresie produkcji biogazu, to jednak potencjał ten, pomimo stopniowego wzrostu liczby biogazowni rolniczych w kraju, nie jest należycie wykorzystany. Kolejny podrozdział rozdziału 2 dotyczy systemów wsparcia biogazowni w Polsce, w którym autor charakteryzuje tzw. system zielonych certyfikatów oraz przedstawia aktualne mechanizmy wsparcia dla instalacji w różnej mocy elektrycznej oraz związane z tym ceny referencyjne. Trzeci podrozdział dotyczy zabiegów wstępnych surowców przed procesem fermentacji, w którym Doktorant charakteryzuje różne rodzaje obróbki surowców (fizyczną chemiczną, biologiczną i mieszaną) oraz ich wpływ na efektywność produkcji biogazu, w szczególności skupiając się na metodach chemicznych.

Rozdział ten jest generalnie dobrze opracowany, aczkolwiek niezbyt treściwy oraz brakuje cytowania najnowszych opracowań literaturowych z tej tematyki, jak chociażby: Ayala-Mercado, et al. (2022). Use of Hydrothermal pretreatment to enhance biogas production from pelagic sargassum. Bioenergy Research, 15(3), 1639–1648. <https://doi.org/10.1007/s12155-021-10371-4>; Nugraha et al. (2018). The effect of acid pre-treatment using acetic acid and nitric acid in the production of biogas from rice husk during solid state anaerobic digestion (SS-AD). E3S Web of Conferences, 31. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20183101006>; Szlachta et al. (2018). Effect of mechanical pre-treatment of the agricultural substrates on yield of biogas and kinetics of anaerobic digestion. Sustainability (Switzerland), 10(10). <https://doi.org/10.3390/su10103669>, czy Widjaja et al. (2021). Chemical pre-treatments effect for reducing lignin on cocoa pulp waste for biogas production. AIP Conference Proceedings, 2349. <https://doi.org/10.1063/5.0051903> oraz innych.

W kolejnym rozdziale „Cel i zakres pracy” Doktorant w sposób klarowny i prawidłowy sformułował cel pracy oraz hipotezę badawczą oraz określił ogólny zakres pracy.

Rozdział 4-ty pracy to „Materiały i metody”, w którym Autor rozprawy szczegółowo opisał i uzasadnił wykorzystywane kiszonki z kukurydzy do produkcji biogazu oraz zastosowane inoculum, którą stanowiła ciekła pulpa pofermentacyjna z biogazowni rolniczej. W dalszej części opisał oznaczone parametry fizykochemiczne dla substratu. W podrozdziale tym nie powinien się znaleźć rysunek wagi laboratoryjnej, natomiast powinny być zamieszczone informacje odnośnie dokładności pomiarowej stosowanych urządzeń. Ponadto Doktorant niepotrzebnie zamieszcza w pracy dwukrotnie te same wzory na średnią procentową i odchylenie standardowe. Wystarczyłoby odniesienie się do wzorów raz już zacytowanych. Kolejny podrozdział dotyczy opisu fermentacji w trybie pół-ciągłym. Układ przeprowadzonych badań fermentacji został dobrze zaprojektowany i opisany oraz przedstawiony w postaci graficznej. Autor do określenia stopnia degradacji oraz uzysku biogazu zastosował prawidłową metodykę bazującą na znormalizowanym poradniku biogazowym Stowarzyszenia Inżynierów Niemieckich w Dreźnie, a do określenia ilorazu stężenia kwasów oraz pojemności buforowej w substracie fermentacji zastosował Tritrator automatyczny oraz wyznaczył współczynnik FOS/TAC, pozwalający na określenie wielkości obciążenia komory fermentacyjnej bioreaktora biogazu, a tym na uniknięcie zakłóceń pracy bioreaktora. Analiza jakościowa produkowanego biogazu została przeprowadzona przy wykorzystaniu analizatora gazowego, który był co tydzień kalibrowany. W podrozdziale 4.5 metodyki badań Doktorant przeprowadził analizy dla czterech wariantów instalacji biogazowni, prawidłowo wykonując obliczenia efektywności energetycznej instalacji.

Przeprowadził także analizę ekonomiczności zaproponowanej w pracy instalacji do produkcji biogazu określając przybliżony zysk roczny i przychody uzyskane ze sprzedaży. Prawdopodobnie określił także koszty eksploatacji biogazowni i wyliczył wskaźniki opłacalności inwestycji takie jak wartość bieżąca przyszłych przepływów pieniężnych (wskaźnik NPV) oraz wewnętrzną stopę zwrotu (wskaźnik IRR).

Podsumowując, uważam, że rozdział „Materiały i metody” jest dobrze opracowany. Zabrakło mi natomiast informacji na temat liczby powtórzeń poszczególnych eksperymentów oraz stosowanych metodach statystycznych analizy wyników badań.

Rozdział 5 to „Wyniki i dyskusja”, który w zasadzie powinien mieć nazwę „analiza wyników badań”, gdyż rozdział 6 został nazwany ponownie jako „Dyskusja”. W pierwszym podrozdziale Doktorant omówił parametry fizykochemiczne substratów wykorzystanych w badaniach fermentacji metanowej, słusznie zauważając, że niska wartość pH kiszonki z kukurydzy wskazała na odpowiedni przebieg procesu zakiszenia. Zamieścił również wyniki zawartości mikroelementów w zastosowanym w badaniach inculum, aczkolwiek jedynie jako średnie bez podania odchylenia standardowego. Podrozdział 5.2 przedstawia wyniki badań dynamiki produkcji biogazu i metanu w układzie z wydzieloną fazą hydrolizy (rys. 16) oraz w układzie kontrolnym (rys. 17). Z kolei podrozdział 5.3 zawarty zostały wyniki dobowej produkcji metanu reaktora oraz wpływ na produkcję metanu zmian obciążenia objętościowego reaktora w trakcie fermentacji. Autor zaobserwował, że zwiększenie obciążenia objętościowego reaktora powodowało skrócenie czasu retencji substratu, największe przy najwyższej wydajności produkcji biogazu i metanu. Natomiast w podrozdziale 5.4 Doktorant przeanalizował zmiany pH oraz wskaźnika FOS/TAC podczas 90-dniowej fermentacji metanowej układu kontrolnego i poddanego hydrolizie, wykazując nieco niższe wartości tych wskaźników po ok. 49 dniach fermentacji dla układu poddanego hydrolizie. Kolejny rozdział 5.5. przedstawia wyniki wydajności produkcji metanu i biogazu. Autor wykazał, że w układzie z wydzieloną fazą hydrolizy skumulowana produkcja biogazu była około 3,6% wyższa niż w układzie kontrolnym, a w przypadku metanu o ok. 8,5%. Moje pytanie na tym etapie do doktoranta: Czy te różnice są istotne statystycznie? Ponadto Doktorant zaobserwował także, że najwyższe różnice w produkcji biogazu między dwoma rozpatrywanymi układami występują od 76 dnia fermentacji i wynoszą w przypadku biogazu 18,06%, zaś w odniesieniu do metanu 23,60%. W rozdziale 5.6 Kandydat przeprowadził z kolei analizę energetyczno-ekonomiczną wykorzystania hydrolizy w procesie fermentacji, przy czterech założonych wariantach funkcjonowania, wykazując, że warianty I i III, w którym zastosowano obróbkę wstępną kiszonki z kukurydzy poddając ją hydrolizie, możliwe

jest zmniejszenie ilości substratu a tym samym związane z tym wypracowanie zysku oraz zwrot kosztów na inwestycję dodatkowego zbiornika do hydrolizy w przeciągu roku bądź dwóch lat, w odniesieniu odpowiednio do biogazowi rolniczej o mocy 999 kW i 499 kW. Jednakże dokładna analiza finansowa wykazała, że warianty biogazowi bez układu wydzielonej hydrolizy oraz wykorzystujące jako jedyny substrat kiszonkę z kukurydzy, powinny zostać odrzucone, jak nieopłacalne. Natomiast dla wariantów z zastosowaniem hydrolizy stopa zwrotu inwestycji wyniosła 5,3 oraz 5,8 %. Co jak zauważa Doktorant, przy obecnym oprocentowaniu kredytów i lokat, wydaje się ekonomicznie nieuzasadnione. W tym miejscu chciałbym spytać Doktoranta, jakim marginesem błędu obciążone są te obliczenia i jaki powinien być bezpieczny wzrost przychodów z inwestycji, żeby taka technologia była opłacalna?

Rozdział 6 to Dyskusja, w którym Autor prawidłowo wskazuje, jakie czynniki mogą zakłócić proces wytwarzania biogazu oraz w jakich warunkach możliwe uzyskanie optymalnych parametrów jego wytwarzania. Słusznie stwierdza przy tym, że żaden rodzaj obróbki wstępnej surowca nie jest uniwersalny w przypadku wszystkich analizowanych systemów i substratów. Ponadto wskazuje, że na uzyskiwane rezultaty wydajności biogazu bardzo istotny wpływ ma obciążenie organiczne zbiornika. W oparciu o przeprowadzone badania doktorant podkreśla, że zaproponowana w rozprawie doktorskiej jednoetapowa technologia CSRT hydrolizy kwaśnej przekłada się na poprawę ekonomiki funkcjonowania takiej instalacji, przy obciążeniu na poziomie $6 \text{ kg s.m.o.} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{d}^{-1}$ oraz czasie retencji 23 dni. Słusznie zauważa także, że w dalszych częściach prac nad tym zagadnieniem, należy przeprowadzić badania umożliwiające weryfikację ilości produkcji biogazu w układzie kontrolnym, wykorzystującym proces dwustopniowy.

Pracę podsumowuje rozdział 7. Wnioski, w którym doktorant na podstawie przeprowadzonych analiz sformułował 11 wniosków. Generalnie są one dobrze sformułowane i wynikają z przeprowadzonych badań. Aczkolwiek wniosek 1 i 2 powinny być połączone w jeden. Podobnie wniosek 3 i 11 zawierają identyczną konkluzję, więc z wniosku 11 można by zrezygnować. Wniosek 4 jest w zasadzie stwierdzeniem, które nie wynika z przeprowadzonych badań i mógłby zostać pominięty. Z kolei wniosek 7 powinien być wnioskiem końcowym, podsumowującym całą pracę. Natomiast wniosek 9 mógłby być z powodzeniem wnioskiem pierwszym.

Podsumowanie osiągnięcia naukowego Doktoranta

Jako oryginalne osiągnięcie Doktoranta należy uznać opracowanie metody produkcji biogazu w wydzieleniu hydrolizy kwaśnej w oddzielnym zbiorniku, pozwalające na zwiększenie wydajności produkcji biogazu w fermentacji metanowej prowadzonej w trybie ciągłym, przy zastosowaniu jako surowca kiszonki z kukurydzy. Autor generalnie wykazała się znajomością literatury przedmiotu oraz umiejętnością posługiwania się nowoczesną aparaturą badawczą i opanowała metodykę samodzielnego planowania i prowadzenia badań naukowych. Rozwiązał też w dużej mierze postawiony problem badawczy, dobierając odpowiednio parametry procesowe produkcji biogazu, przy wykorzystaniu hydrolizy kwaśnej, pozwalające na jego najefektywniejszą produkcję.

Przedstawiono w recenzji uwagi i sugestie nie umniejszają wysokiej wartości merytorycznej i aplikacyjnej przedstawionej rozprawy.

Ocena końcowa rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Janusza Kozłowskiego spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim określone w art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2018 r. poz. 1668, z późn. zm.) i może stanowić podstawę do nadania stopnia naukowego doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, dyscyplinie inżynieria mechaniczna w postępowaniu prowadzonym na podstawie Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r.

W związku z powyższym wnoszę do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu o dopuszczenie Pana mgr inż. Kamila Janusza Kozłowskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

