

Kraków 18.07.2023 r.

Dr hab. inż. Anna Szelań-Sikora prof. UR
Uniwersytet Rolniczy w Krakowie
Wydział Inżynierii Produkcji i Energetyki
Katedra Inżynierii Produkcji, Logistyki i Informatyki Stosowanej
ul. Balicka 116B
30-149 Kraków

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Kozłowskiego

pt. „Efektywność energetyczna produkcji metanu w procesie fermentacji z wydzieloną fazą hydrolizy kwaśnej”

1. Wprowadzenie

Recenzja została opracowana na zlecenie Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Mechaniczna, Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu z dnia 22.05.2023 r.

Rozprawa doktorska została wykonana w 2023 r. na Wydziale Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Jacek Dach, natomiast promotorem pomocniczym dr inż. Andrzej Lewicki.

2. Formalna charakterystyka rozprawy

Rozprawa doktorska pt. „Efektywność energetyczna produkcji metanu w procesie fermentacji z wydzieloną fazą hydrolizy kwaśnej” napisana przez mgr inż. Kamila Kozłowskiego dotyczy bardzo istotnego i wciąż aktualnego problemu opracowania metody efektywnej energetycznie i opłacalnej ekonomicznie obróbki wstępnej substratów w celu zwiększenia produktywności biogazu i metanu.

Praca obejmuje łącznie 90 stron maszynopisu, w tym 15 tabel, 20 rycin, bibliografię oraz 4 załączniki. Na podkreślenie zasługuje bardzo szczegółowy i szeroki przegląd literatury, który zawiera 96 pozycji. Należy podkreślić staranność przygotowania i sformatowania zamieszczonej bibliografii oraz fakt, że Autor pracy zamieścił i cytował aż 73 obcojęzyczne pozycje.

W celu zwiększenia przejrzystości omawianych zagadnień, na początku rozprawy, Autor korzystnie dla czytelnika, zamieścił wykaz ważniejszych oznaczeń, co znacznie ułatwiło identyfikację oznaczeń stosowanych w tekście. Całość pracy jest podzielona na 9 rozdziałów numerowanych. W pracy zamieszczono streszczenie (w języku polskim oraz angielskim), spis tabel i rysunków oraz załączniki. Układ pracy prawidłowy, z zachowaniem logicznego następstwa rozdziałów oraz właściwych ich proporcji, zgodny z ogólnie przyjętymi zasadami w tego typu pracach naukowych. Kolejność rozdziałów w pracy nie budzi wątpliwości, a przedstawione w nich zagadnienia wprowadzają stopniowo czytelnika w problematykę poruszaną w rozprawie doktorskiej.

Tytuł rozprawy został sformułowany poprawnie i zawiera wystarczającą ilość informacji o jej zakresie. Praca zakończona dyskusją wyników oraz wnioskami wynikającymi z przeprowadzonych badań i analiz. Warto zauważyć, że Autor na ostatnim etapie wskazuje kierunki dalszych prac badawczych, tym samym wykazując duży potencjał rozwojowy uzyskanych efektów zrealizowanej rozprawy doktorskiej.

3. Ocena merytoryczna rozprawy

Praca podzielona została na 9 numerowanych rozdziałów. Po wykazie oznaczeń oraz streszczeniu, w rozdziale pierwszym, Autor wstępnie przybliżył problematykę pracy, dokonuje opisu problemu badawczego w drodze uprzednio zidentyfikowanej luki badawczej w obszarze procesu produkcji biogazu i metanu. Podsumowaniem Wstępu, jest poprawnie sformułowany przez Autora w formie pytania, problem naukowy: **„jaka powinna być kombinacja czynników technologicznych i parametrów procesowych, która pozwoli na wysokowydajną i ekonomicznie opłacalną produkcję biogazu, przy zastosowaniu hydrolizy kwaśnej, jako obróbki wstępnej substratu?”**.

Postawiony problem badawczy został prawidłowo i jasno sformułowany dla podjętego tematu pracy doktorskiej. Nasuwa się jednak pytanie, czy nie należało go umieścić w pracy po przeprowadzonej analizie literatury? Tak aby czytelnik jednoznacznie odniósł wrażenie, że jest on odpowiedzią na istniejący stan niewiedzy, a jego realizacja jest zasadna i ma potencjał

rozwojowo-wdrożeniowych, na co wskazują przytoczone przez Autora pozycje literatury, jak i jego własne spostrzeżenia zamieszczone w rozdziale 2 (Analiza zagadnienia w świetle literatury).

Uzasadnieniem istoty podjętej problematyki badawczej jest m.in. przeprowadzony przez Autora wnikliwy przegląd literatury przedmiotu. Tematyka drugiego rozdziału przybliży czytelnikowi istotne pojęcia/definicje z zakresu produkcji i rynku biogazu, ze szczególnym uwzględnieniem polskich uwarunkowań na tle krajów europejskich. Zakres przeprowadzonego studium literatury oraz bardzo metodyczne podejście do jego realizacji jest warte podkreślenia. Pokazuje badawczą wnikliwość Doktoranta w dążeniu do poznawania i weryfikacji istniejących rozwiązań naukowych, czego dowodem jest rzetelna analiza aktualnego stanu wiedzy w omawianym zakresie na poziomie międzynarodowym. W drodze przeprowadzonego przeglądu literatury, Autor zobrazował istniejące uwarunkowania rynkowe biogazu, potencjał odnawialnych źródeł energii w produkcji energii na przestrzeni ostatnich lat w świetle uwarunkowań prawnych oraz potencjału surowców, będących elementem wejściowym przy produkcji biogazu. Przybliżone przez Autora liczne źródła literaturowe oraz poddane analizie aktualne dane statystyczne pozwoliły mu poprawnie stwierdzić, że *„Polska należy do krajów o dużym potencjale energetycznym, szczególnie w zakresie produkcji biogazu, który porównywany jest do potencjału biogazowego Niemiec”* (podrozdział 2.1. str. 16). Autor bardzo trafnie wskazuje czynniki wpływające na potencjał surowcowy m.in. w sektorze rolnym tj. dużą powierzchnię użytków rolnych, odpowiednią obsadę bydła, trzody chlewnej oraz drobiu.

Mając na uwadze zasadność ekonomiczną wdrażania nowych lub istniejących rozwiązań do gospodarki, Autor w sposób bardzo rzetelny i rzeczowy opisuje uwarunkowania ekonomiczno-prawne rozwoju produkcji biogazu w naszym kraju. Równocześnie poddaje analizie dynamikę rozwoju biogazowni, m.in. na podstawie liczby podmiotów oraz instalacji wpisanych do rejestru wytwórców biogazu rolniczego w latach 2011-2021 pozyskanych z Krajowego Ośrodka Wsparcia Rolnictwa (podrozdział 2.1. str. 17). Za istotny czynnik mający wpływ na rozwój polskich biogazowni rolniczych, Autor uznał również krajowy system wsparcia odnawialnych źródeł energii. W świetle przeprowadzonej przez Autora analizy zidentyfikowanych uwarunkowań stwierdza on, że *„Sytuację polskiego rynku biogazu w ostatnich 10 latach należy uznać za mało korzystną”* (podrozdział 2.1. str. 16), *„Główny system wsparcia odnawialnych źródeł energii, z którego do tej pory korzysta większość funkcjonujących biogazowni rolniczych w Polsce, opiera się na systemie zielonych*

certyfiatów” (podrozdział 2.1. str. 16), na poprawę sytuacji na rynku biogazu w Polsce miało wpływ „wprowadzenie w 2016 roku do obrotu świadectwa pochodzenia PMOZE_BIO (tzw. Błękitny certyfiat). Wolumen ten przysługuje instalacjom, które posiadają status rolniczy” (podrozdział 2.1. str. 22).

W kolejnym podrozdziale 2.3. Obróbka wstępna surowców przed procesem fermentacji, w oparciu o przeprowadzone studium literatury, Autor podkreśla wzrost zainteresowania wykorzystaniem obróbki wstępnej substratów przed poddaniem jej fermentacji metanowej, trafnie zaznacza przy tym, że takie postępowanie procesowe pozwala zwiększyć wydajność produkcji biogazu. Z wymienionych czterech obróbek tj. fizycznej, chemicznej, biologicznej oraz mieszanej, to fizyczna zdaniem Autora jest najpopularniejsza w Polsce. Jednak główne uwagę skupiono na obróbce chemicznej, opisując szczegółowo jej trzy rodzaje: hydroliza sętonymi kwasami mineralnymi, hydroliza rozcieńczonymi kwasami mineralnymi oraz hydroliza kwaśna mikrobiologiczno-chemiczna. Charakteryzując ostatni z wymienionych rodzajów obróbki chemicznej, Autor jednoznacznie wskazuje istniejącą lukę wiedzy naukowej w zakresie tej techniki obróbki wstępnej surowców w biogazowniach, zaznaczając potrzebę prowadzenia badań w tym kierunku. W drodze przeprowadzonego studium literatury Autor ostatecznie formuluje stwierdzenie, potwierdzające zasadność podjęcia tematyki ocenianej pracy oraz przyjęte w późniejszych etapach założeń metodycznych, czego potwierdzeniami jest stwierdzenie ze strony 25 (podrozdział 2.3), brzmiące: „koniecznym staje się przeprowadzenie dokładnych badań, które pozwolą opisać tego rodzaju technikę obróbki wstępnej surowców w biogazowniach.”

W trzecim rozdziale zatytułowanym Cel i zakres pracy, Autor prezentuje sformułowany cel i zakres pracy. W oparciu o dokonany przegląd literatury (piśmiennictwa), jak i własne spostrzeżenia, Doktorant aby rozwiązać oryginalny problem badawczy za cel pracy przyjął: **zbadać wpływ zastosowania mikrobiologiczno-chemicznej hydrolizy kwaśnej przy różnych parametrach procesowych na przebieg i efektywność produkcji biogazu w fermentacji metanowej prowadzonej w trybie ciągłym, w porównaniu do tradycyjnej technologii (NawaRo) bez rozdziału faz, przy zastosowaniu jako surowca kiszonki z kukurydzy.** Ujęcie w celu pracy założeń uwzględniających przeprowadzenia analizy porównawczej w obszarze różnych parametrów procesowych oraz konfrontacji opracowanych rozwiązań z istniejącą i powszechnie stosowaną technologią, wskazuje na dociekliwość badawczą Doktoranta w dążeniu do optymalizacji procesu produkcji biogazu.

Kolejno, zgodnie z przyjętą metodologią opracowania rozpraw doktorskich, Autor sformułował hipotezę badawczą w brzmieniu: **Wydzielenie fazy hydrolizy kwaśnej w oddzielnym zbiorniku fermentacyjnym zwiększy wydajność produkcji metanu w procesie fermentacji metanowej pozwalającą na uzyskanie pozytywnego bilansu energetycznego i finansowego dla budowy takiej instalacji w skali przemysłowej.**

Weryfikacja tak przyjętej hipotezy badawczej, bezpośrednio przyczynia się do realizacji celu i zakresu pracy. Równocześnie zarówno hipoteza, jak i cel pracy uwzględniają aspekty produkcji biogazu w zakresie poznawczym, badawczym oraz utylitarnym, z uwzględnieniem praktycznego zastosowania uzyskanych efektów końcowych. Uwzględnienie w hipotezie badawczej bilansu energetycznego i finansowego dla zastosowania opracowanego rozwiązania na skalę przemysłową wskazuje również, że Autor rozumie i poprawnie interpretuje racjonalne podejście do komercjalizacji innowacyjnych rozwiązań prac naukowych.

W rozdziale 3 Autor przedstawił przebieg zrealizowanych prac badawczych. Opis przyjętego zakresu pracy ograniczył jednak tylko do zobrazowania przebiegu części autorskich badań i rozwiązań bez uwzględnienia, pierwszego etapu pracy tj. przeprowadzonego przeglądu istniejących rozwiązań jak i rozważań literaturowych. W pracach o charakterze implementacyjnym, których efektem są autorskie rozwiązania procesowe, zasadnym wydaje się być uwzględnienie w zakresie prac badawczych również działań weryfikujących obecny stan wiedzy, czego efektem jest nie tylko wykazanie luki badawczej, ale również ustalenie elementów wejściowych i częściowo wyjściowych w opracowanych rozwiązaniach.

Autor w ramach przyjętego zakresu pracy wyszczególnił 6 głównych zadań badawczych:

1. Określenie parametrów fizykochemicznych badanych substratów i zaszczepli.
2. Analizę dynamiki produkcji biogazu i metanu w jednoetapowej fermentacji ciągłej.
3. Zwiększanie obciążenia komory fermentacyjnej w celu uzyskania stabilnej i wysokiej produkcji biogazu.
4. Monitorowanie zmian pH w trakcie trwania procesu fermentacji.
5. Określenie wydajności produkcji biogazu i metanu z wybranych substratów.
6. Analizę energetyczną i ekonomiczną funkcjonowania instalacji z zastosowaniem hydrolizy w oddzielnym zbiorniku fermentacyjnym w różnych wariantach.

Prezentacja metodycznych aspektów części badawczej stanowi obowiązkowy element każdej pracy naukowej. W ocenianej rozprawie doktorskiej w czwartym rozdziale Materiały i metody, Autor kompleksowo przedstawił przyjęte założenia metodyczne. Z merytorycznego punktu widzenia, oceniam ten rozdział również jako bardzo wartościowy. Doktorant na aż 29

stronach, w uporządkowany sposób, przedstawił kolejno: wykorzystane stanowisko badawcze (do przeprowadzenia procesu ciągłej fermentacji metanowej), właściwości materiałów (podrozdział 4.2. Substraty), szczegółowe założenia do oznaczenia parametrów fizykochemicznych (podrozdział 4.3), przebieg i analizę procesu fermentacji w trybie pół-ciękłym (podrozdział 4.4) oraz w podrozdziale 4.5 metody obliczeń energetycznych i ekonomicznych. Zważywszy na bardzo obszerny zakres metodyczny pracy, być może korzystnie byłoby umieścić w pracy przebieg realizowanych badań w formie schematu blokowego, np. jako podsumowanie rozdziału 4, pozwoliłoby to czytelnikowi w sposób obrazowy przedstawić przebieg zaplanowanych zadań badawczych.

Rozdział 4 jest poświęcony przyjętym założeniom metodycznym, w efekcie których powstało nowe autorskie rozwiązanie z zakresu założeń procesowych mających na celu zwiększenie efektywności produkcji biogazu w fermentacji metanowej prowadzonej w trybie pół-ciągłym. W tym miejscu rodzi się pytanie, czy rozbieżność zapisu pojęć „fermentacji metanowej prowadzonej w trybie CIĄGLYM” – zamieszczona w sformułowanym celu pracy (rozdział 3, str. 26) i zapis zastosowany w metodyce pracy „proces fermentacji w trybie PÓL-CIĄGLYM” to niedopatrzanie Autora, czy celowe działania.

Autor już na etapie przyjmowania założeń metodycznych pracy uwzględnił aspekt potencjału wdrożeniowego opracowanych rozwiązań, o czym świadczy opis ze str. 45 – gdzie przedstawiono 4 warianty funkcjonowania instalacji dla których po uwzględnieniu wykorzystanego w badaniach substratu oraz mocy zainstalowanej, przyjęto założenia pozwalające obliczyć potencjał energetyczny i ekonomiczny.

Przyjęta poprawnie metodyka pracy oraz dobór odpowiednich materiałów/surowców pozwolił Doktorantowi uzyskać wartościowe wyniki. W rozdziale 5 zostały one przedstawione w spójny i czytelny sposób. Dopelnieniem wspomnianego rozdziału jest kolejny rozdział zatytułowany „Dyskusja”. Doktorant realizując poszczególne zadania badawcze określił parametry początkowe niezbędne do określenia odpowiednich proporcji świeżej masy wykorzystanych substratów oraz zaszczepki mikrobiologicznej. Podkreślając przy tym, że zbadane „*Parametry fizykochemiczne kiszonki z kukurydzy świadczyły o jej prawidłowym przygotowaniu do procesu fermentacji metanowej. Niska wartość pH potwierdziła odpowiedni przebieg procesu zakiszenia i brak oznak gnicia materiału w wyniku dostępu powietrza z zewnątrz przymy*”. W kolejnych podrozdziałach zamieszczono wyniki oraz analizę dynamiki produkcji biogazu i metanu, efekty zmiany obciążenia komory fermentacyjnej, zmiany pH

FOS/TAC. Jak zaznacza Autor, przeprowadzone badania wykazały, że zastosowanie mikrobiologiczno-chemicznej hydrolizy kwaśnej pozwala na zwiększenie wydajności produkcji biogazu i metanu w procesie fermentacji metanowej prowadzonej w technologii jednoetapowej oraz w trybie półciągłym przy zastosowaniu jako surowca kiszonki z kukurydzy. Natomiast „przeprowadzona analiza finansowa wykazała, że pomimo uzyskania właściwych czynników technologicznych i parametrów procesowych dla zwiększenia wydajności produkcji biogazu i metanu, w obecnych warunkach ekonomicznych nie ma uzasadnienia finansowego do realizacji inwestycji w oparciu o fermentację monosubstratową kiszonki z kukurydzy, nawet przy zastosowaniu układu hydrolizy kwaśnej”.

Reasumując, należy stwierdzić, że uzyskane przez Autora wyniki badań, przeprowadzona ich analiza i dyskusja pozwoliły zrealizować cel i zakres pracy oraz pozytywnie zweryfikować przyjętą hipotezę badawczą. Rozprawa doktorska została zakończona 11 wnioskami, które są logiczne oraz ściśle wynikają z zaprezentowanych w pracy wyników badań, równocześnie podkreślają zrealizowany, założony cel i zakres pracy. Autor nawiązując do weryfikacji przejętej hipotezy badawczej, w 6 wniosku (str. 76) pisze „W nawiązaniu do sformułowanej w celu pracy hipotezy należy stwierdzić, że wydzielenie procesu hydrolizy od pozostałych etapów fermentacji metanowej, jako elementu obróbki przedprocesowej, pozwala na wzrost ilości wytwarzanego biogazu i metanu, przyczyniając się jednocześnie do zwiększenia efektu ekonomiczno-finansowego w skali przemysłowej”. Tym samym, należy przyjąć, że hipoteza została zweryfikowana pozytywnie, co prawda w drodze przeprowadzonej analizy ekonomicznej Autor, podkreśla że obecnych uwarunkowaniach rynkowych jest ona trudno opłacalna, jednak idąc za przykładem innych krajów należy liczyć, że system wsparcia odnawialny źródeł energii, zmieniająca się polityka zarządzania bezpieczeństwem energetycznym, również w naszym kraju pozwoli na zwiększenie dynamiki rozwoju m.in. biogazowni.

Podkreślić należy, że zgodnie z dobrą praktyką prac naukowych, Doktorant na ostatnim etapie pracy tj. we wnioskowaniu, jednoznacznie wskazuje dalsze kierunki prac badawczych, mające przyczynić się do rozwoju nauki i gospodarki. Autor w 7 wniosku (str. 76) zaznaczył że „ze zasadnym jest przeprowadzenie dalszych badań związanych z procesem fermentacji półciągłej również z analizą wykorzystania zbiornika dofermentacyjnego (drugi stopień fermentacji) lub magazynowanego pofermentu z systemem ogrzewania i możliwością odzysku biogazu”.

4. Uwagi i pytania

W trakcie recenzji pracy nasuwają się nieliczne następujące uwagi oraz pytania o charakterze merytorycznym, formalnym i redakcyjnym (zamieszczonych w otrzymanym maszynopisie). Część z nich zamieszczono w treści niniejszej recenzji, dodatkowo korzystnym by było gdyby Doktorant przygotował się na poniższe pytania:

- W metodyce badań (podrozdział 4.2.1) na stronie 29 podano informację, „*Materiały zostały pobrane w sposób reprezentatywny*” proszę rozwinąć, co należy rozumieć przez sformułowanie „sposób reprezentatywny” oraz czy materiał został odpowiednio przygotowany do badań (rozdrobienie, micszczenie).
- Proszę przybliżyć jak długo trwał proces hydrolizy wsadu oraz jak udawało się porcjować w ciągu dnia tak niewielką ilość suchej masy organicznej do komory.
- Proszę wyjaśnić dlaczego na rys. 16 i 17 przedstawił Pan dzienny uzysk gazu, a nie na podstawie krzywej sumarycznej, natomiast w podrozdziale 5.5. w tab. 7 ocenia Pan skumulowaną produkcję biogazu.
- Przy tak niewielkiej ilości dobowego wsadu i określenia na tej podstawie ilości i jakości wydzielanego biogazu, czy nie rozważał Pan zastosowanie innej metody fermentacji do przeprowadzenia badań?
- Opracowane rozwiązanie procesowe okazały się być kompletne, a ich elementy ze sobą spójne, nasuwa się jednak pytanie czy określone warunki brzegowe, uwarunkowania zewnętrzne i wewnętrzne pozwalają na ich rozwój? A jeśli tak, to jakie są możliwe dalsze kierunki/obszary doskonalenia/optimalizacji procesu produkcji biogazu?
- Czy opracowane rozwiązanie może stanowić wyjściowe wytyczne do opracowania narzędzia IT wspomagającego optymalizację procesu produkcji biogazu?
- Czy zamieszczone w pracy wyniki pozwalają zastosować istniejące analizy statystyczne, a jeśli tak, to jaki byłyby efekty tego zastosowania?
- Jakie są czynniki determinujące dynamikę rozwoju sektora biogazu rolniczego w Polsce?

5. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując, należy stwierdzić, że rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Kozłowskiego pt. „Efektywność energetyczna produkcji metanu w procesie fermentacji z wydzieloną fazą hydrolizy kwaśnej” stanowi problem naukowy i mieści się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Logiczna i spójna całość

rozważań oraz prezentacja ich wyników pozwala stwierdzić, że rozprawa spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim wynikającym z ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki oraz Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 26 września 2016r. w sprawie szczegółowego trybu przeprowadzania czynności w przewodach doktorskim i habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu naukowego. Fakt ten upoważnia mnie do zgłoszenia wniosku do Rady Dyscypliny Inżynierii Mechanicznej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu o wszczęcie dalszej procedury w przewodzie doktorskim oraz dopuszczenie rozprawy do publicznej obrony.

Ponadto, biorąc pod uwagę całość pracy, rzetelność jej wykonania, wnioskuję o wyróżnienie pracy doktorskiej.

