



RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

1. Informacje formalne

Recenzję opracowano na podstawie pisma Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk (Nr RN-521.8.2025) z dnia 24 lutego 2026 r., informującego o powołaniu recenzenta w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora mgr inż. Paulinie Bandrów.

Postępowanie o nadanie stopnia doktora zostało wszczęte w dniu 11 grudnia 2025 r. w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Autorka rozprawy:

mgr inż. Paulina Bandrów

Tytuł rozprawy:

**„Proces ciemnej fermentacji odpadów garbarskich
– badania eksperymentalne i modelowanie”**

Jednostka nadająca stopień:

**Instytut Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego
Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku**

Promotor:

dr hab. inż. Adam Cenian

Promotor pomocniczy:

dr hab. inż. Szymon Szufa



2. Przedmiot i zakres rozprawy

Przedmiotem rozprawy doktorskiej jest analiza procesu produkcji wodoru w warunkach ciemnej fermentacji z wykorzystaniem odpadów garbarskich, ze szczególnym uwzględnieniem aspektów eksperymentalnych oraz modelowania matematycznego i numerycznego tego procesu.

Zakres pracy obejmuje kompleksowe badania nad możliwością wykorzystania strużyny chromowej jako substratu w procesie fermentacji beztlenowej, a także ocenę efektywności procesu w zależności od zastosowanych warunków technologicznych oraz składu mieszaniny substratów. W szczególności analizie poddano wpływ dodatku współsubstratów (m.in. glukozy), co umożliwiło ocenę efektów kofermentacji oraz poprawy dostępności związków łatwo biodegradowalnych.

W części eksperymentalnej Autorka przeprowadziła badania mające na celu określenie wydajności produkcji wodoru w różnych wariantach procesu, obejmujących zmiany:

- rodzaju i składu substratu,
- stopnia rozdrobnienia materiału,
- sposobu i intensywności mieszania,
- warunków prowadzenia procesu fermentacyjnego.

Istotnym elementem rozprawy jest analiza kinetyki procesu produkcji wodoru, przeprowadzona z wykorzystaniem modelu Gompertza. Na tej podstawie wyznaczono kluczowe parametry opisujące przebieg procesu, takie jak maksymalna objętość produkowanego wodoru, maksymalna szybkość jego wydzielania oraz długość fazy adaptacyjnej mikroorganizmów. Umożliwiło to ilościową ocenę efektywności procesu oraz porównanie analizowanych wariantów technologicznych.

Zakres pracy obejmuje również elementy analizy efektywności i opłacalności procesu, co stanowi próbę odniesienia wyników laboratoryjnych do potencjału aplikacyjnego badanej technologii.

Uzupełnieniem badań eksperymentalnych jest modelowanie numeryczne procesów hydrodynamicznych zachodzących w reaktorze fermentacyjnym. W pracy zastosowano metody obliczeniowe dynamiki płynów (CFD), wykorzystując modele VOF, Mixture oraz DPM, w celu analizy procesów mieszania, rozkładu cząstek oraz homogenizacji układu. Pozwoliło to na ocenę wpływu warunków hydrodynamicznych na przebieg procesu fermentacji.

Tak zdefiniowany zakres pracy wskazuje na jej interdyscyplinarny charakter, łączący zagadnienia z zakresu inżynierii procesowej, biotechnologii oraz mechaniki płynów, a także na dążenie Autorki do kompleksowego ujęcia analizowanego problemu badawczego.



3. Cel pracy i założenia badawcze

Celem rozprawy doktorskiej jest ocena możliwości wykorzystania odpadów garbarskich, w szczególności strużyny chromowej, jako substratu w procesie ciemnej fermentacji prowadzącej do produkcji wodoru, a także określenie wpływu wybranych parametrów technologicznych oraz składu mieszaniny substratów na efektywność tego procesu.

Cel pracy obejmuje również analizę kinetyki produkcji wodoru z zastosowaniem modelu matematycznego oraz ocenę warunków hydrodynamicznych w reaktorze fermentacyjnym z wykorzystaniem metod obliczeniowej dynamiki płynów (CFD), co pozwala na wieloaspektową ocenę badanego procesu.

Na podstawie analizy treści rozprawy można stwierdzić, że Autorka sformułowała tezę rozprawy, jednak hipotezy szczegółowe nie zostały wyodrębnione w sposób klasyczny i nie są jednoznacznie powiązane z poszczególnymi etapami badań (co było zasygnalizowane w tytule 3 rozdziału). Niemniej jednak z zakresu prowadzonych badań oraz przyjętej metodyki można wywnioskować następujące hipotezy badawcze:

- Odpady garbarskie, w szczególności strużyna chromowa, mogą stanowić efektywny substrat w procesie ciemnej fermentacji prowadzącej do produkcji wodoru, przy odpowiednio dobranych warunkach procesu.
- Dodatek współsubstratów łatwo biodegradowalnych (np. glukozy) wpływa na zwiększenie wydajności produkcji wodoru, poprzez poprawę dostępności związków organicznych dla mikroorganizmów oraz stabilizację procesu fermentacyjnego.
- Parametry technologiczne procesu, takie jak stopień rozdrobnienia substratu oraz intensywność mieszania, mają istotny wpływ na przebieg i efektywność procesu fermentacji, w tym na kinetykę wydzielania wodoru.
- Warunki hydrodynamiczne w reaktorze fermentacyjnym, analizowane z wykorzystaniem modeli CFD, wpływają na stopień homogenizacji układu, a tym samym pośrednio na efektywność procesu biologicznego.

Tak sformułowany cel pracy oraz wynikające pośrednio z niego hipotezy wskazują na dążenie Autorki do kompleksowej analizy procesu ciemnej fermentacji, obejmującej zarówno aspekty biochemiczne, jak i inżynierskie.

Jednocześnie należy zauważyć, że wyraźne i jednoznaczne sformułowanie hipotez badawczych we wstępnej części pracy przyczyniłoby się do zwiększenia przejrzystości jej struktury oraz ułatwiłoby ocenę stopnia ich weryfikacji w dalszych rozdziałach rozprawy.

Na zakończenie niniejszego rozdziału należy odnieść się do problemu badawczego sformułowanego w pracy, który – jak wskazano w końcowej części rozdziału – dotyczy możliwości efektywnego wykorzystania odpadów garbarskich w procesie produkcji wodoru w warunkach ciemnej fermentacji oraz identyfikacji czynników determinujących przebieg tego procesu.

Należy stwierdzić, że problem badawczy został sformułowany w sposób poprawny i adekwatny do zakresu podjętych badań. Obejmuje on zarówno aspekt poznawczy, związany z analizą właściwości substratu i przebiegu procesu biologicznego, jak i aspekt aplikacyjny,



dotyczący możliwości wykorzystania odpadów przemysłowych w technologiach energetycznych.

Pozytywnie należy ocenić fakt, że problem badawczy uwzględnia wieloczynnikowy charakter analizowanego zjawiska, w tym wpływ składu substratu, warunków prowadzenia procesu oraz aspektów hydrodynamicznych układu reakcyjnego.

W związku z powyższym można stwierdzić, że problem badawczy został sformułowany prawidłowo.

4. Układ i struktura pracy

Recenzowana rozprawa doktorska została opracowana w formie monografii naukowej o objętości ok. 147 stron. Struktura pracy obejmuje klasyczne elementy opracowania naukowego, tj. część wprowadzającą i przegląd literatury, sformułowanie problemu badawczego, opis badań eksperymentalnych, analizę wyników, część modelową (kinetyczną oraz CFD), a także podsumowanie i wnioski końcowe. Praca zawiera również obszerny spis literatury obejmujący 229 pozycji, co świadczy o dobrym rozeznaniu Autorki w analizowanej tematyce.

Układ pracy można uznać za zasadniczo zgodny z przyjętymi standardami rozpraw doktorskich, jednak jego szczegółowa analiza wskazuje kilka uwag o charakterze formalnym i kompozycyjnym.

Praca charakteryzuje się dużą liczbą elementów graficznych – obejmuje 56 rysunków (m.in. wykresy, schematy, wizualizacje CFD oraz elementy projektowe reaktora i mieszadeł), które stanowią istotne uzupełnienie części eksperymentalnej i modelowej. Jednocześnie liczba tabel zestawiających wyniki badań jest ograniczona, co wpływa na utrudnioną możliwość syntetycznej analizy porównawczej uzyskanych wyników.

Uwagi krytyczne

Brak wyodrębnionego rozdziału „Metodyka badań” nie uniemożliwia oceny przeprowadzonych badań, ponieważ opis procedur został zawarty w rozdziale wynikowym, jednak obniża przejrzystość pracy.

W pracy zastosowano podrozdział zatytułowany „Metodologia”, co należy uznać za nieprecyzyjne z punktu widzenia terminologii naukowej. Metodologia odnosi się do nauki o metodach badawczych, natomiast w rozprawach doktorskich oczekiwane jest przedstawienie metodyki, tj. szczegółowego opisu:

- układu eksperymentalnego,
- procedur badawczych,
- schematu badań,
- sposobu opracowania wyników.

Brak wyodrębnionej i syntetycznie przedstawionej metodyki utrudnia:

- ocenę poprawności podejścia badawczego,
- odtworzenie przebiegu badań,
- jednoznaczne powiązanie wyników z przyjętymi założeniami.



Podsumowując, układ pracy jest poprawny na poziomie ogólnym i odpowiada standardom rozpraw doktorskich. Praca jest bogata pod względem materiału badawczego i ilustracyjnego. Jednocześnie wskazane uchybienia wpływają na obniżenie jej przejrzystości oraz utrudniają jednoznaczną ocenę logiki prowadzenia badań.

Uwagi te mają charakter formalno-strukturalny i nie podważają wartości merytorycznej rozprawy, jednak ich uwzględnienie znacząco poprawiłoby jakość opracowania oraz wyeksponowanie wkładu naukowego Autorki.

5. Przegląd literatury – ocena merytoryczna i strukturalna

Przegląd literatury w recenzowanej rozprawie jest obszerny i obejmuje zasadnicze obszary niezbędne do wprowadzenia czytelnika w tematykę pracy. Autorka przedstawia kolejno zagadnienia dotyczące charakterystyki skór i procesu garbarskiego, źródeł oraz rodzajów odpadów garbarskich, aspektów środowiskowych i prawnych ich zagospodarowania, znaczenia wodoru jako paliwa przyszłości, podstaw procesu ciemnej fermentacji, roli substratów, mikroorganizmów, parametrów procesowych oraz modelowania z wykorzystaniem modelu Gompertza i metod CFD.

Pozytywnie należy ocenić fakt, że przegląd literatury został zbudowany szeroko i obejmuje zarówno kontekst technologiczny przemysłu garbarskiego, jak i problematykę bioenergetyczną. Dzięki temu czytelnik otrzymuje uzasadnienie, dlaczego odpady garbarskie, w tym strużyny chromowe, mogą stanowić istotny problem środowiskowy i gospodarczy, a jednocześnie potencjalny substrat do biologicznej produkcji wodoru. Szczególnie wartościowe jest powiązanie zagadnień zagospodarowania odpadów z koncepcją gospodarki o obiegu zamkniętym oraz z potrzebą poszukiwania alternatywnych metod produkcji nośników energii.

Za mocną stroną należy uznać również wprowadzenie do przeglądu literatury zagadnień związanych z modelowaniem procesu. Omówienie modelu Gompertza oraz podstaw modelowania CFD dobrze koresponduje z zakresem późniejszych badań własnych. W tym obszarze przegląd literatury nie ogranicza się wyłącznie do aspektów biologicznych, ale obejmuje również elementy inżynierii procesowej, co wzmacnia interdyscyplinarny charakter rozprawy.

Zasadniczo przedstawiony stan wiedzy opiera się na rzeczowo dobranych źródłach literaturowych. Autorka korzysta zarówno z prac dotyczących ciemnej fermentacji i produkcji biowodoru, jak i z opracowań związanych z przemysłem garbarskim, gospodarką odpadami oraz modelowaniem przepływów. Dobór literatury można uznać za adekwatny do zakresu pracy, szczególnie że analizowane zagadnienie łączy kilka obszarów badawczych: biotechnologię środowiskową, energetykę odnawialną, gospodarkę odpadową oraz mechanikę płynów.

Pewnym mankamentem jest także nierównomierny poziom szczegółowości. Część dotycząca przemysłu garbarskiego i charakterystyki odpadów jest bardzo obszerna, natomiast w większym stopniu można było oczekiwać krytycznego zestawienia dotychczasowych wyników badań dotyczących wykorzystania odpadów garbarskich w



fermentacji beztlenowej, w tym zwłaszcza ograniczeń wynikających z obecności chromu, toksyczności wybranych składników oraz trudności w biologicznej konwersji tego typu substratów.

Warto byłoby również mocniej zaakcentować, na czym polega innowacyjność podejścia Autorki. Z treści pracy wynika, że nowatorski charakter badań polega przede wszystkim na połączeniu wykorzystania problematycznego odpadu garbarskiego z procesem ciemnej fermentacji, analizą kofermentacji, oceną wpływu parametrów technologicznych oraz modelowaniem hydrodynamicznym CFD. Nie zostało to jednak w przeglądzie literatury wystarczająco syntetycznie wyeksponowane jako luka badawcza i punkt wyjścia do badań własnych.

Podsumowując, przegląd literatury należy ocenić pozytywnie pod względem zakresu tematycznego i doboru źródeł. Obejmuje on zasadnicze obszary niezbędne do zrozumienia problematyki rozprawy i dobrze uzasadnia realną potrzebę poszukiwania nowych metod zagospodarowania odpadów garbarskich. Jednocześnie wymagałby większej syntezy, silniejszego ukierunkowania na lukę badawczą oraz bardziej krytycznego porównania dotychczasowych wyników badań z zakresem badań własnych Autorki.

6. Wyniki badań – analiza i ocena merytoryczna

Wyniki badań przedstawione w rozprawie stanowią jedną z najważniejszych części pracy i obejmują zarówno badania eksperymentalne procesu ciemnej fermentacji odpadów garbarskich, jak i elementy modelowania kinetycznego oraz hydrodynamicznego. Zakres przeprowadzonych prac należy ocenić jako szeroki i merytorycznie interesujący. Autorka analizowała wpływ rodzaju substratu, zastosowania kosubstratów, obróbki wstępnej, rozdrobnienia, mieszania oraz warunków hydrodynamicznych na efektywność produkcji wodoru. Takie ujęcie problemu wskazuje na próbę kompleksowej oceny procesu, a nie tylko prostego wykazania, czy z danego odpadu można uzyskać wodór. Na szczególne podkreślenie zasługuje fakt, że badania zostały osadzone w realnym problemie przemysłowym, tj. zagospodarowaniu odpadów garbarskich generowanych przez zakład Bader Polska Sp. z o.o., co nadaje rozprawie wyraźny charakter aplikacyjny. Sama rozprawa wskazuje, że badania dotyczyły możliwości zagospodarowania odpadów garbarskich generowanych podczas procesu produkcyjnego w tym przedsiębiorstwie.

Do mocnych stron części wynikowej należy zaliczyć przede wszystkim konsekwentne poszukiwanie wariantów procesu zwiększających efektywność produkcji wodoru. Autorka wykazała, że sama strużyna chromowa charakteryzuje się ograniczonym potencjałem fermentacyjnym, natomiast zastosowanie kosubstratów może istotnie poprawić przebieg procesu. Szczególnie wyraźnie pokazano to w doświadczeniach z dodatkiem glukozy, gdzie mieszanina strużyny chromowej i glukozy w stosunku 1:1 osiągnęła najwyższe wartości parametrów procesu. W pracy podano, że dla tego wariantu uzyskano wydajność $111,2 \text{ cm}^3 \text{ H}_2/\text{g}$ suchej masy, podczas gdy dla samej strużyny chromowej jedynie $0,964 \text{ cm}^3 \text{ H}_2/\text{g}$ suchej masy. Również parametry modelu Gomperta wskazują na wyraźną przewagę tego układu: $V_{\max} = 811,3 \text{ cm}^3$, $\mu_{\max} = 277,7 \text{ cm}^3/\text{dzień}$, przy czasie adaptacji $\lambda = 2,31$ dnia. Wyniki te



dobrze pokazują, że obecność łatwo biodegradowalnego komponentu zasadniczo zmienia dynamikę procesu.

Za wartościowe należy uznać również przejście od substratu modelowego, jakim jest glukoza, do substratów odpadowych lub tańszych kosubstratów lignocelulozowych. Autorka słusznie zauważa, że glukoza, mimo korzystnego wpływu technologicznego, nie stanowi realnego rozwiązania wdrożeniowego ze względu na koszt. Z tego względu dalsza analiza mieszanin strużyny chromowej ze słomą i plewami z gryki jest uzasadniona. W przypadku mieszaniny strużyny chromowej i słomy pszennej najkorzystniejszy okazał się wariant 50:50, dla którego uzyskano największą objętość wodoru spośród analizowanych mieszanek ze słomą. Jest to istotne, ponieważ wskazuje na możliwość częściowego zastąpienia kosztownych lub modelowych kosubstratów materiałami odpadowymi. Jednocześnie wyniki te pokazują, że o efektywności procesu nie decyduje wyłącznie obecność łatwo dostępnego węgla, ale także bilans składników odżywczych, azotu, mikroelementów oraz potencjalnych inhibitorów.

Pozytywnie należy ocenić zastosowanie modelu Gompertza do opisu kinetyki produkcji wodoru. Dzięki temu Autorka nie ograniczyła się wyłącznie do porównania końcowych objętości gazu, ale podjęła próbę opisu przebiegu procesu w czasie. Parametry V_{max} , μ_{max} oraz λ pozwalają ocenić potencjał produkcyjny układu, szybkość procesu oraz czas adaptacji mikroorganizmów. Jest to szczególnie ważne w przypadku procesów biologicznych, w których końcowy uzysk wodoru nie zawsze oddaje pełną charakterystykę procesu. Przykładowo w analizie wpływu obróbki substratu wykazano, że obróbka kwasowa mieszaniny strużyny chromowej i słomy pozwoliła uzyskać $V_{max} = 58,18 \text{ cm}^3$ oraz $\mu_{max} = 5,791 \text{ cm}^3/\text{dzień}$, podczas gdy wariant bez obróbki osiągnął $V_{max} = 16,27 \text{ cm}^3$ i charakteryzował się znacznie dłuższym czasem opóźnienia. Wskazuje to, że obróbka wstępna może nie tylko zwiększać całkowitą produkcję wodoru, ale również przyspieszać wejście układu w aktywną fazę fermentacji.

Istotną zaletą rozprawy jest także analiza wpływu rozdrobnienia i mieszania. Wyniki dotyczące rozdrobnienia wskazują, że zmniejszenie wielkości cząstek substratu poprawia warunki procesu, zwiększając zarówno końcową objętość wodoru, jak i szybkość jego produkcji. Dla substratu rozdrobnionego uzyskano $203,7 \text{ cm}^3$ wodoru, a dla nierozdrobnionego $175,3 \text{ cm}^3$; również wydajność odniesiona do suchej masy była wyższa dla materiału rozdrobnionego. Z kolei w analizie mieszania wykazano ponad pięciokrotny wzrost ilości wodoru w reaktorach mieszanych w stosunku do niemieszanych. Dla wariantu mieszanego podano $V_{max} = 86,85 \text{ cm}^3$ oraz $\mu_{max} = 6,86 \text{ cm}^3/\text{dzień}$, natomiast dla niemieszanego odpowiednio $16,59 \text{ cm}^3$ i $1,04 \text{ cm}^3/\text{dzień}$. Są to wyniki ważne z punktu widzenia inżynierii procesu, ponieważ wskazują, że efektywność ciemnej fermentacji odpadów garbarskich zależy nie tylko od składu chemicznego wsadu, ale również od warunków transportu masy, dystrybucji substratu i usuwania gazu z układu.

Za szczególnie interesujące należy uznać włączenie do pracy modelowania CFD. Jest to element wykraczający poza klasyczną analizę laboratoryjnej produkcji wodoru i stanowi próbę powiązania wyników biologicznych z warunkami hydrodynamicznymi. Autorka wskazała, że w zakresie 0–800 obr./min. nie obserwowano skutecznego mieszania, a pełniejsze wymieszanie uzyskano dopiero przy 1000 obr./min. Dodatkowo analizowano



rozkład cząstek w wybranych punktach pomiarowych reaktora. Ten fragment pracy świadczy o inżynierskim podejściu do problemu i może stanowić podstawę dalszego projektowania reaktorów do procesu ciemnej fermentacji.

Pomimo wskazanych mocnych stron część wynikowa i dyskusyjna zawiera również uchybienia oraz elementy wymagające dopracowania. Najważniejszym ograniczeniem jest brak wyraźnie przedstawionej analizy statystycznej wyników. W pracy nie podano w sposób konsekwentny liczby powtórzeń (z odniesieniem na wykresach), odchyłeń standardowych, przedziałów ufności ani testów istotności różnic. Jest to istotne, ponieważ proces ciemnej fermentacji charakteryzuje się naturalną zmiennością biologiczną, a część obserwowanych różnic – zwłaszcza przy mniejszych wartościach uzysku wodoru – może wynikać zarówno z rzeczywistego wpływu badanego czynnika, jak i ze zmienności eksperymentalnej. Brak tej informacji ogranicza siłę wnioskowania i utrudnia ocenę, które różnice mają znaczenie technologiczne, a które mają jedynie opisowy charakter.

Drugim istotnym mankamentem jest nie zawsze wystarczająco pogłębiona interpretacja mechanizmów odpowiedzialnych za uzyskane wyniki. Autorka wielokrotnie wskazuje, że dany wariant był korzystniejszy, jednak nie zawsze wyjaśnia, dlaczego tak się stało. Dotyczy to zwłaszcza wpływu glukozy, słomy, plew z gryki, obróbki kwasowej oraz mieszania. W przypadku glukozy należałoby wyraźniej rozdzielić efekt dostarczenia łatwo dostępnego źródła węgla od możliwego efektu rozcieńczenia lub ograniczenia wpływu inhibitorów obecnych w strużynie chromowej. Podobnie w przypadku mieszanin ze słomą i plewami warto byłoby szerzej omówić relację między dostępnością węglowodanów, obecnością azotu, mikroelementów i potencjalnych substancji hamujących proces.

Pewne zastrzeżenia budzi również charakterystyka substratów. W pracy podano zawartość suchej masy i suchej masy organicznej dla wybranych strużyn, a także opisano podstawowe właściwości materiałów stosowanych w badaniach. Jednak dla pełnej interpretacji wyników przydałaby się bardziej rozbudowana charakterystyka chemiczna i biologiczna wsadów, szczególnie w odniesieniu do zawartości chromu, form jego występowania, zawartości azotu, białek, tłuszczów, węglowodanów, ChZT/BZT oraz potencjalnych inhibitorów fermentacji. W przypadku odpadów garbarskich takie dane mają kluczowe znaczenie, ponieważ ich biodegradowalność i toksyczność mogą silnie zależeć od technologii garbowania i składu chemicznego odpadu.

Dyskusja wyników mogłaby być także silniej powiązana z literaturą. Praca zawiera szeroki przegląd piśmiennictwa, jednak w części wynikowej porównania z wynikami innych autorów są miejscami zbyt ogólne. Warto byłoby zestawzić uzyskane wydajności wodoru, parametry kinetyczne oraz wpływ obróbki i mieszania z danymi literaturowymi dotyczącymi fermentacji innych odpadów przemysłowych, osadów ściekowych, biomasy lignocelulozowej oraz odpadów zawierających związki potencjalnie toksyczne. Takie zestawienie pozwoliłoby jednoznacznie ocenić, czy uzyskane wartości są wysokie, umiarkowane czy raczej mają charakter wstępny potwierdzenia możliwości procesu.

Niekonsekwencją wymagającą doprecyzowania jest również sposób przechodzenia od wyników laboratoryjnych do wniosków o potencjale wdrożeniowym i ekonomicznym. Autorka wskazuje, że proces może ograniczyć koszty zagospodarowania odpadów, a analiza ekonomiczna sugeruje opłacalność wariantów z wysokim udziałem strużyny chromowej.



Należy jednak podkreślić, że przy bardzo małych objętościach wodoru uzyskiwanych w części doświadczeń, wnioski aplikacyjne powinny być formułowane ostrożniej. W analizie ekonomicznej należałoby szerzej uwzględnić koszty przygotowania substratu, obróbki, mieszania, kontroli temperatury, separacji i oczyszczania gazu, zagospodarowania pofermentu oraz ryzyka związanego z obecnością chromu. Bez tego trudno jednoznacznie mówić o skalowalności procesu, choć kierunek badań jest niewątpliwie uzasadniony.

Podsumowując, część wynikowa rozprawy zawiera wartościowy i obszerny materiał eksperymentalny oraz modelowy. Do najważniejszych osiągnięć należy zaliczyć wykazanie możliwości produkcji wodoru z udziałem odpadów garbarskich, określenie korzystnego wpływu kosubstratów, obróbki wstępnej, rozdrabniania i mieszania, a także zastosowanie modelu Gompertza oraz CFD do opisu procesu. Jednocześnie potencjał zgromadzonych wyników nie został w pełni wykorzystany w warstwie interpretacyjnej. W pracy brakuje silniejszego osadzenia wyników w analizie statystycznej, głębszego wyjaśnienia mechanizmów biologicznych i inżynierskich, bardziej szczegółowej charakterystyki substratów oraz ostrożniejszego przejścia od skali laboratoryjnej do wniosków wdrożeniowych. Uwagi te nie podważają zasadniczej wartości rozprawy, ale wskazują obszary, których uzupełnienie znacząco wzmocniłoby naukową i aplikacyjną wymowę pracy.

7. Ocena osiągnięcia naukowego

Recenzowaną rozprawę doktorską należy ocenić jako wartościowe osiągnięcie naukowe o wyraźnym charakterze interdyscyplinarnym, łączące zagadnienia bioenergetyki, gospodarki odpadami przemysłowymi, biotechnologii środowiskowej oraz inżynierii procesowej. Autorka podjęła aktualny i trudny problem zagospodarowania odpadów garbarskich, w szczególności strużyn chromowych, wskazując możliwość ich wykorzystania jako substratu w procesie ciemnej fermentacji ukierunkowanej na produkcję wodoru. Znaczenie pracy wzmacnia fakt, że badania realizowano w formule doktoratu wdrożeniowego i odniesiono je do rzeczywistego problemu przemysłowego firmy Bader Polska Sp. z o.o., dotyczącego zagospodarowania odpadów powstających w procesie produkcyjnym.

Za najważniejszą mocną stroną osiągnięcia naukowego należy uznać wykazanie, że odpady garbarskie mogą być rozpatrywane nie wyłącznie jako problem środowiskowy i koszt utylizacyjny, lecz również jako potencjalny surowiec energetyczny w gospodarce o obiegu zamkniętym. Autorka sformułowała tezę, zgodnie z którą wykorzystanie odpadów garbarskich w procesie ciemnej fermentacji umożliwia produkcję wodoru, a efektywność tego procesu może być zwiększana przez dobór warunków fermentacyjnych, obróbkę wstępną, mieszanie oraz zastosowanie kosubstratów. W tym zakresie rozprawa wnosi wkład poznawczy do badań nad biologiczną konwersją odpadów trudnych, zawierających związki chromu, a jednocześnie rozszerza katalog potencjalnych substratów do produkcji biowodoru.

Istotnym elementem osiągnięcia jest kompleksowe ujęcie procesu. Autorka nie ograniczyła badań do prostego pomiaru ilości wytworzonego wodoru, lecz analizowała wpływ składu substratu, dodatku kosubstratów lignocelulozowych, obróbki termicznej i chemicznej,



rozdrobienia, temperatury, pH oraz warunków mieszania. W pracy uwzględniono również model Gompertza do opisu kinetyki procesu, modelowanie CFD zastosowane do analizy warunków przepływu i dystrybucji substratu oraz elementy analizy ekonomicznej. Tak szerokie podejście należy uznać za jedną z najmocniejszych stron rozprawy, ponieważ pozwala oceniać proces zarówno z perspektywy biologicznej, jak i inżynierskiej.

Na pozytywną ocenę zasługuje także połączenie badań eksperymentalnych z modelowaniem. Zastosowanie modelu Gompertza umożliwiło ilościową ocenę przebiegu produkcji wodoru i porównanie różnych wariantów doświadczeń. Z kolei wykorzystanie CFD stanowi wartościowe rozszerzenie klasycznych badań fermentacyjnych, ponieważ pozwala analizować wpływ geometrii reaktora, prędkości mieszania, rozkładu prędkości i homogenizacji mieszaniny na warunki prowadzenia procesu. W streszczeniu rozprawy Autorka wskazuje, że symulacje CFD umożliwiły ocenę dynamiki mieszania, rozkładu prędkości i homogenizacji mieszaniny, a także identyfikację efektywnych geometrii mieszadeł i prędkości obrotowych. Jest to szczególnie istotne w kontekście ewentualnego skalowania technologii.

Osiągnięcie naukowe rozprawy polega zatem nie tylko na potwierdzeniu możliwości produkcji wodoru z odpadów garbarskich, lecz także na wskazaniu czynników warunkujących efektywność tego procesu. Praca pokazuje, że kluczowe znaczenie mają: dobór kosubstratu, sposób przygotowania wsadu, rozdrobnienie materiału, warunki mieszania oraz hydrodynamika układu fermentacyjnego. W ujęciu aplikacyjnym uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do dalszych badań nad optymalizacją procesu, projektowaniem reaktorów fermentacyjnych oraz oceną możliwości wykorzystania odpadów przemysłowych jako surowców do produkcji nośników energii.

Podsumowując, przedstawione w rozprawie osiągnięcie naukowe należy uznać za wartościowe i oryginalne w zakresie podjętego problemu badawczego. Mocną stroną pracy jest jej praktyczne osadzenie, interdyscyplinarny charakter, połączenie eksperymentu z modelowaniem oraz ukierunkowanie na rozwiązanie rzeczywistego problemu środowiskowego i technologicznego. Pomimo uwag metodycznych wskazanych w innych częściach recenzji, uzyskane wyniki stanowią istotną podstawę do dalszego rozwoju badań nad ciemną fermentacją odpadów garbarskich oraz nad ich wykorzystaniem w technologiach gospodarki o obiegu zamkniętym.

8. Uwagi szczegółowe

W pracy można wskazać szereg uwag szczegółowych, które mają głównie charakter metodyczny, formalny i redakcyjny. Nie podważają one zasadniczej wartości rozprawy, jednak ich uwzględnienie poprawiłoby czytelność pracy, przejrzystość wyводу oraz jednoznaczność interpretacji uzyskanych wyników.

Z punktu widzenia struktury rozprawy pewne zastrzeżenie budzi brak wyodrębnionego, klasycznego rozdziału metodycznego. Opis instalacji badawczej, substratów i zastosowanej procedury został zamieszczony bezpośrednio w rozdziale „Wyniki badań i dyskusja”, co powoduje częściowe wymieszanie informacji metodycznych z



prezentacją wyników. W rozprawach doktorskich korzystniejszym rozwiązaniem jest zwykle wyodrębnienie rozdziału „Materiał i metody” lub „Metodyka badań”, w którym w sposób uporządkowany przedstawia się schemat doświadczeń, aparaturę, warunki prowadzenia procesu, sposób przygotowania próbek, liczbę powtórzeń, metody analityczne oraz sposób opracowania danych. W analizowanej pracy opis instalacji i procedur jest obecny, jednak brakuje syntetycznego schematu metodyki, który pozwalałby czytelnikowi szybko odtworzyć kolejność prowadzonych doświadczeń oraz zależności pomiędzy poszczególnymi etapami badań. Dotyczy to zwłaszcza badań obejmujących różne substraty, kosubstraty, obróbkę wstępną, rozdrabnianie, mieszanie oraz modelowanie CFD.

Wątpliwości budzi również sposób oznaczania suchej masy. Autorka podaje, że zawartość suchej masy oznaczono zgodnie z normą PN-EN 14774-1:2010 poprzez suszenie próbek w temperaturze 105°C przez 30 minut. Czas ten wydaje się stosunkowo krótki, zwłaszcza w odniesieniu do materiałów niejednorodnych, takich jak strużyny skórzane, słoma czy plewy. Sama strużyna chromowa została opisana jako materiał w postaci wiórów o rozmiarach od 0,1 do 0,5 cm. W takim przypadku należałoby doprecyzować, czy próbki były wcześniej mielone lub rozdrabniane do frakcji analitycznej, czy suszenie prowadzono do stałej masy oraz czy wykonano kontrolę powtarzalności oznaczenia. Trzydziestominutowy czas suszenia może być uzasadniony dla drobno rozdrobnionego materiału analitycznego, natomiast przy większych i bardziej zróżnicowanych cząstkach może nie zapewniać pełnego usunięcia wilgoci. Ma to istotne znaczenie, ponieważ zawartość suchej masy i suchej masy organicznej stanowiła podstawę do obliczania dawek substratów oraz wydajności produkcji wodoru.

Od strony merytorycznej wskazane byłoby również pełniejsze przedstawienie aparatury badawczej i zaplecza pomiarowego. W pracy opisano instalację laboratoryjną, sposób pomiaru objętości gazu, przygotowanie inokulum oraz podstawowe warunki procesu, jednak opis ten mógłby być bardziej kompletny. Brakuje jednoznacznego zestawienia zastosowanej aparatury, jej parametrów technicznych, dokładności pomiarowych, procedury kalibracji oraz sposobu kontroli błędów pomiarowych. Dotyczy to szczególnie pomiaru objętości gazu metodą wypierania wody, oznaczeń składu gazu, pomiaru pH, temperatury oraz przygotowania i kondycjonowania inokulum.

W części dotyczącej modelowania CFD pozytywnie należy ocenić samą próbę powiązania wyników fermentacji z hydrodynamiką układu, jednak opis założeń projektowych i autorstwa koncepcji mieszadeł wymaga doprecyzowania. W pracy przedstawiono analizy mieszadła z dnem stożkowym, mieszadła płytowego oraz zmodyfikowanego mieszadła z łopatkami motylkowymi, wskazując m.in. na zmianę geometrii w celu ograniczenia stref stagnacji i poprawy strumieni osiowych. Jeżeli koncepcja mieszadeł, założenia projektowe lub ich opracowanie były związane z pracami Artura Łużyńskiego i zespołu, powinno to zostać jednoznacznie wskazane w tekście rozprawy, wraz z podaniem charakteru tego wkładu oraz źródła. Dotyczy to zwłaszcza rozróżnienia pomiędzy wkładem Autorki w analizę i interpretację wyników CFD a wkładem zespołu projektowego w opracowanie koncepcji konstrukcyjnej mieszadeł.

Pewne zastrzeżenia budzi również walidacja modelu CFD. Autorka wskazuje, że ze względu na brak dostępu do sond konduktometrycznych, czujników OTR oraz systemów LIP



czas mieszania oceniano wyłącznie metodą wizualną na podstawie nagrań wideo. Takie podejście może być dopuszczalne na etapie wstępnej oceny jakościowej, jednak w pracy doktorskiej należałoby wyraźnie zaznaczyć ograniczenia tej metody oraz ostrożniej formułować wnioski dotyczące skuteczności mieszania. Wskazane byłoby także uzupełnienie opisu o bardziej jednoznaczne kryteria oceny wymieszania, np. czas zaniku stref nie wymieszanych, udział cząstek w wybranych obszarach reaktora lub porównanie z wynikami prostych testów znacznikowych.

Od strony formalnej i edytorskiej uwagę zwraca sposób cytowania literatury. W wielu miejscach odwołania bibliograficzne umieszczane są po kropce kończącej zdanie, co jest rozwiązaniem dość odosobnionym i mniej typowym dla prac naukowych. Zwykle odwołanie do źródła umieszcza się przed znakiem interpunkcyjnym kończącym zdanie albo zgodnie z jednolicie przyjętym stylem bibliograficznym. W pracy należałoby ujednolicić sposób cytowania, ponieważ obecny zapis miejscami zaburza płynność tekstu i sprawia wrażenie redakcyjnej niespójności.

Podsumowując, wskazane uwagi mają przede wszystkim charakter porządkujący i doprecyzowujący. Dotyczą one głównie struktury metodyki, kompletności opisu aparatury, czasu oznaczania suchej masy, sposobu walidacji wyników CFD, jednoznacznego wskazania wkładu osób zaangażowanych w opracowanie koncepcji mieszadeł oraz ujednolicenia zasad cytowania literatury. Ich uwzględnienie zwiększyłoby przejrzystość rozprawy i wzmocniło wiarygodność metodyczną przedstawionych wyników.

Pytania do doktorantki:

- Jakie cechy odpadów garbarskich, w szczególności strużyn chromowych, w największym stopniu ograniczają ich przydatność jako substratu w procesie ciemnej fermentacji?
Proszę wskazać, czy kluczowe znaczenie ma obecność chromu, struktura kolagenowa materiału, niska podatność na biodegradację, wilgotność, czy może inne właściwości fizykochemiczne.
- Który z analizowanych czynników technologicznych miał, zdaniem Pani, największy wpływ na efektywność produkcji wodoru: dobór kosubstratu, obróbka wstępna, rozdrobnienie materiału czy mieszanie?
Proszę uzasadnić odpowiedź na podstawie uzyskanych wyników badań.
- Jaką rolę w interpretacji wyników odegrał model Gompertza i które z jego parametrów uważa Pani za najważniejsze z punktu widzenia oceny procesu ciemnej fermentacji?
Proszę odnieść się szczególnie do znaczenia maksymalnej produkcji wodoru, szybkości produkcji oraz fazy opóźnienia.
- W jaki sposób wyniki modelowania CFD mogą zostać praktycznie wykorzystane przy projektowaniu lub skalowaniu reaktora do ciemnej fermentacji odpadów garbarskich?
Proszę wskazać, które informacje z symulacji są najistotniejsze: rozkład prędkości, identyfikacja stref martwych, homogenizacja mieszaniny czy dobór geometrii mieszadła.



9. Wniosek końcowy

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Bandrów pt. „Proces ciemnej fermentacji odpadów garbarskich – badania eksperymentalne i modelowanie” mieści się w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinie inżynieria mechaniczna oraz spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r. poz. 1571 ze zm.).

Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, dotyczącego możliwości wykorzystania odpadów garbarskich, w szczególności strużyn chromowych, jako substratu w procesie ciemnej fermentacji ukierunkowanej na produkcję wodoru. Przedstawione badania obejmują zarówno część eksperymentalną, jak i modelowanie procesu, w tym zastosowanie modelu Gomperta oraz modelowania CFD, co potwierdza interdyscyplinarny i inżynierski charakter pracy. Autorka wskazała, że celem badań było określenie wpływu składu substratu, kosubstratów lignocelulozowych, mieszania, obróbki wstępnej, rozdrobnienia, pH i temperatury na efektywność procesu, a także przeprowadzenie analizy ekonomicznej wariantów technologicznych.

Rozprawa posiada również istotny wymiar aplikacyjny, ponieważ badania zostały zrealizowane na potrzeby firmy Bader Polska Sp. z o.o. w Bolesławcu i dotyczyły rzeczywistego problemu zagospodarowania odpadów garbarskich powstających w procesie produkcyjnym. Uzyskane wyniki mogą stanowić podstawę do dalszych badań nad optymalizacją procesu ciemnej fermentacji odpadów przemysłowych oraz nad projektowaniem rozwiązań technologicznych wpisujących się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym.

Pomimo wskazanych w recenzji uwag o charakterze metodycznym, formalnym i porządkującym, rozprawę należy uznać za wartościowe opracowanie naukowe i aplikacyjne. Przedstawione wyniki potwierdzają kompetencje badawcze Doktorantki oraz jej umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

W związku z powyższym wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Bandrów do dalszych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Recenzent:
dr hab. inż. Krzysztof Mudryk, prof. URK

Podpis:

