

Warszawa, 23.03.2026

Prof. dr hab. inż. Aleksander Lisowski
Katedra Inżynierii Biosystemów
Instytut Inżynierii Mechanicznej
Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie
ul. Nowoursynowska 166
02-787 Warszawa
Email: aleksander_lisowski@sggw.edu.pl
Adres prywatny:
Aleja Komisji Edukacji Narodowej 53 m. 62
02-797 Warszawa
Tel. 501532820

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Bandrów
pt. *Proces ciemnej fermentacji odpadów garbarskich – badania eksperymentalne i modelowanie*

Podstawa wykonania recenzji

Pismo Z-cy Dyrektora ds. naukowych dr. hab. inż. Grzegorza Żywica, prof. IMP PAN z dnia 24.02.2026 r., z informacją o powierzeniu mi funkcji recenzenta przez Radę Naukową Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk na posiedzeniu w dniu 10 grudnia 2025.

1. Dane ogólne o rozprawie doktorskiej

Recenzowaną rozprawę doktorską przygotowano w Instytucie Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk w Gdańsku pod kierunkiem dr. hab. inż. Adama Ceniana oraz przy współudziale promotora pomocniczego dr. hab. inż. Szymona Szufy. Rozprawa liczy 147 stron maszynopisu, obejmuje rozbudowany przegląd literatury, opis stanu wiedzy, część doświadczalną, modelowanie numeryczne z wykorzystaniem obliczeniowej dynamiki płynów (CFD, Computational Fluid Dynamics) oraz analizę ekonomiczną, a także wykaz literatury obejmujący 229 pozycji, niemal wyłącznie w języku angielskim, w tym znaczący udział aktualnych publikacji w renomowanych czasopismach zagranicznych. Struktura rozprawy jest klasyczna i zawiera wstęp, przegląd literatury, cel, hipotezę i problem badawczy, opis instalacji i metodyki, wyniki doświadczalne, modelowanie CFD, analizę ekonomiczną, podsumowanie i wnioski końcowe.

Tekst rozprawy doktorskiej jest zasadniczo poprawnie zorganizowany, jednak nie zawsze konsekwentny pod względem kompozycji i hierarchii treści. Obszerny rozdział przeglądowy (Rozdział 2) zawiera liczne informacje kontekstowe o przemyśle garbarskim, gospodarce odpadami i uwarunkowaniach prawnych, ale miejscami wykracza poza bezpośrednie potrzeby zdefiniowanego problemu badawczego, co rozmywa ostrość wywodu. Jednocześnie rozdziały dotyczące wyników i modelowania są miejscami zbyt skrótowe w stosunku do obszerności części opisowej, co zaburza proporcje między częścią przeglądową a własnym wkładem badawczym.

2. Celowość wyboru tematu

Tematyka rozprawy, dotycząca wykorzystania odpadów garbarskich – w szczególności strużyn chromowych – jako substratu w procesie ciemnej fermentacji do produkcji wodoru, jest aktualna i ważna zarówno z punktu widzenia gospodarki o obiegu zamkniętym, jak i rozwoju

technologii wodorowych. Autorka słusznie wpisuje swoją problematykę w nurt transformacji energetycznej oraz poszukiwań niskoemisyjnych źródeł energii, akcentując jednocześnie poważne problemy środowiskowe i ekonomiczne związane z tradycyjną utylizacją odpadów garbarskich.

Wybór tematu należy uznać za trafny i uzasadniony. Rozprawa ma charakter interdyscyplinarny – łączy zagadnienia z zakresu biotechnologii, inżynierii chemicznej i procesowej oraz ochrony środowiska, przy czym rdzeń pracy jednoznacznie osadzony jest w obszarze inżynierii mechanicznej. Przez rozważania naukowe z zakresu modelowania matematycznego i numerycznego CFD, doboru i analizy pracy mieszadeł, hydrodynamiki przepływu w bioreaktorze oraz wpływu warunków mieszania na przebieg procesu, rozprawa doktorska wprost wpisuje się w dyscyplinę naukową inżynierię mechaniczną. Szczególnie istotny jest także aspekt wdrożeniowy, gdyż badania przeprowadzono w warunkach zbliżonych do rzeczywistych, w instalacji zlokalizowanej w zakładzie przemysłowym Bader Polska sp. z o.o., a w rozprawie uwzględniono analizę ekonomiczną proponowanego rozwiązania technologicznego wraz z jego konsekwencjami eksploatacyjnymi. Jednocześnie tak szeroko zakreślony obszar powoduje, że nie wszystkie wątki są dostatecznie pogłębione, zwłaszcza od strony modelowania biochemicznego i walidacji, podczas gdy część zagadnień stricte mechanicznych (związanych z pracą bioreaktora jako obiektu inżynierii procesowej) mogłaby zostać rozwinięta jeszcze szerzej.

3. Ogólna ocena zakresu badawczego rozprawy doktorskiej

Pozytywnie oceniam bardzo szeroki zakres badawczy rozprawy doktorskiej. Autorka bowiem zaprojektowała i wykorzystała stanowisko badawcze do prowadzenia procesu ciemnej fermentacji w warunkach rzeczywistych, a także przeprowadziła serię doświadczeń z wykorzystaniem różnych konfiguracji substratów, takich jak strużyny chromowe, kosubstraty lignocelulozowe i glukozy; metod obróbki wstępnej (termicznej, chemicznej), parametrów technicznych i sposobów mieszania oraz rozdrobnienia. Istotnym elementem rozprawy jest także zastosowanie zmodyfikowanego modelu Gomperta do opisu kinetyki procesu fermentacji anaerobowej oraz wykorzystanie symulacji CFD do analizy zjawisk hydrodynamicznych w reaktorach fermentacyjnych.

Pozytywnie należy ocenić fakt, że Autorka konsekwentnie odwołuje się do idei gospodarki o obiegu zamkniętym i stara się wykazać, że strużyny chromowe – odpady trudne i kosztowne w tradycyjnej utylizacji – mogą stać się wartościowym surowcem energetycznym. Wyniki uzyskane w części doświadczalnej Autorki wskazują, że odpowiedni dobór kosubstratów lignocelulozowych, intensywności mieszania i metod obróbki wstępnej pozwoliło Doktorantce na osiągnięcie relatywnie wysokich wydajności produkcji wodoru. Zastosowanie zmodyfikowanego modelu Gomperta umożliwiło jej porównanie wariantów procesowych oraz oszacowanie parametrów kinetycznych procesu.

4. Analiza stanu wiedzy i jej wykorzystanie

Rozdział 2 zawiera bardzo obszerny przegląd literatury dotyczącej charakterystyki skór i procesów garbarskich, gospodarki odpadami przemysłu garbarskiego, uwarunkowań prawnych, technologii termicznego i biologicznego unieszkodliwiania odpadów, a także procesów ciemnej fermentacji, modelowania CFD i zmodyfikowanego modelu Gomperta. Przegląd ten świadczy o dużym nakładzie pracy oraz dobrej orientacji Autorki w literaturze zarówno branżowej, jak i naukowej.

Brakuje jednak syntetycznego, wyraźnie wyodrębnionego podsumowania luk poznawczych, które stanowiłyby bezpośrednie uzasadnienie podjętych badań i przyjętej hipotezy

badawczej. Informacje o niedostatkach istniejących rozwiązań są rozproszone w tekście i pojawiają się przy okazji omawiania poszczególnych zagadnień, zamiast zostać zebrane w postaci krótkiego podrozdziału (np. „Luki badawcze i uzasadnienie pracy”) lub listy problemów w podsumowaniu opisu stanu wiedzy z przedmiotowego obszaru naukowego. Utrudnia to czytelnikowi jednoznaczne zidentyfikowanie, w jakim stopniu zaproponowana koncepcja technologiczna i zakres badań wypełniają te luki.

5. Cel, hipoteza, problem badawczy i ich realizacja

Rozdział 3 zawiera hipotezę rozprawy, cel główny oraz sformułowany problem badawczy. W tytule rozdziału poprawnie użyto wyrazu *hipoteza*, ale już w wyróżnieniu pod nim jest wyraz *teza*, który jest adekwatny do twierdzenia podlegającego dowodzeniu, a nie falsyfikowalnego przypuszczenia, cechującego pojęcie hipotezy, którą się uzasadnia, a nie dowodzi. Nie można zatem używać zamiennie tych wyrazów. Hipoteza i cel sformułowane są poprawnie i korespondują z tytułem rozprawy oraz zarysowaną wcześniej problematyką. Problem badawczy przedstawiono w formie pytania, które w sposób ogólny obejmuje najważniejsze zagadnienia: możliwość efektywnego wykorzystania strużyn jako substratu oraz ocenę wpływu wybranych czynników procesowych na wydajność produkcji wodoru. Kolejność w rozprawie naukowej powinna być inna. Najpierw stawia się pytanie, które jest problemem do rozwiązania, a następnie należy sformułować hipotezę, która jest zdaniem przypuszczającym, odpowiadającym na postawiony problem badawczy. Rozpoczynanie jednak pytania od „Czy ... „, nie jest właściwe, gdyż jest to pytanie zamknięte i sugeruje odpowiedź „tak” lub „nie”. Problem naukowy z definicji wymaga rozpoznania warunków, zakresu, mechanizmów, zależności, czyli odpowiedzi rozwiniętej, a nie binarnej.

W dalszej części rozprawy nie przedstawiono jednak wprost powiązania między tą hipotezą a uzyskanymi wynikami eksperymentalnymi i modelowymi. W efekcie czytelnik musi sam rekonstruować związek między hipotezą a rezultatami badań, co osłabia przejrzystość konstrukcji metodycznej rozprawy, mimo że zaprezentowane wyniki są w dużej mierze spójne z treścią hipotezy. Zgromadzony materiał empiryczny i numeryczny daje podstawy, by stwierdzić, że nie ma podstaw do odrzucenia hipotezy, jednak brak formalnego domknięcia tego wątku w rozdziale z wnioskami końcowymi należy uznać za istotne niedociągnięcie wnioskowania. Część wniosków ma charakter opisowy i confirmacyjny. W rozprawie doktorskiej, zwłaszcza o silnym komponencie eksperymentalnym i modelowym, należałoby sformułować 2–3 hipotezy badawcze o wyraźnie falsyfikowalnym charakterze, np. dotyczące wpływu kosubstratów, metod obróbki wstępnej lub parametrów mieszania na wybrane wskaźniki wydajności, a następnie konsekwentnie odwoływać się do nich w części wynikowej i we wnioskach końcowych.

6. Instalacja badawcza, metodyka i zakres badań

Opis instalacji badawczej w Rozdziale 4 jest czytelny i wystarczająco szczegółowy, aby umożliwić zrozumienie konfiguracji stanowiska oraz sposobu prowadzenia eksperymentów. Zaletą jest prowadzenie badań w warunkach rzeczywistych (instalacja zlokalizowana w zakładzie Bader Polska). Opis substratów, w tym głównego substratu w postaci strużyn chromowych oraz kosubstratów (glukozy, słomy, plew), jest kompletny; podano kluczowe parametry fizykochemiczne, takie jak zawartość suchej materii i suchej materii organicznej. Zgodnie z normami i praktyką inżynierską Autorka posługuje się terminami „sucha masa” i „sucha masa organiczna”, choć z punktu widzenia ścisłej terminologii fizycznej należałoby mówić o „suchej materii” oraz „suchej materii organicznej”. Sugeruję rozważyć taką korektę w ewentualnych publikacjach monograficznych.”

Zastrzeżenia budzi stosunkowo skromny opis procedur analitycznych i statystycznych. Autorka podaje, że posługiwała się m.in. zmodyfikowanym modelem Gompertza do opisu kinetyki produkcji wodoru oraz analizą ekonomiczną, jednak brakuje wyczerpującego opisu stosowanych procedur, w tym statystycznych w sensie weryfikacji różnic między wariantami (np. analiza wariancji, testy istotności), kryteriów doboru modeli, oceny dopasowania (np. R^2 , błędy standardowe) oraz analizy niepewności pomiarowych. W tabelach przedstawiono wartości parametrów modelu, lecz brak jest informacji o poziomach istotności, przedziałach ufności czy testach porównujących warianty.

Z zakresu metodyki badań proszę o sprecyzowanie, czy wytworzony gaz wypiera wodę (?) z tub (str. 66). Brakuje uzasadnienia ilości dodawanego substratu do inokulum. Jakie przyjęto założenie relacji suchej materii organicznej substratu do suchej materii inokulum? Proszę o wyjaśnienie zdania na str. 69: „Obliczenia pozwoliły dobrać odpowiednią ilość substratu na 1 L mieszaniny reakcyjnej.” Jeśli zakłada się 10 g s.m.o. substratu, to formuła powinna być na „świeżą materię”? Na str. 69 jest zdanie: „Do reaktorów dodano substrat, czasem ekstrakt drożdżowy oraz bufor pH.” Co oznacza „czasem”. To przecież zaburzyło warunki początkowe. Jak porównywać wyniki badań? Brakuje informacji o pomiarze ciśnienia i temperatury powietrza oraz przeliczeniu udziału poszczególnych składowych na warunki normalne i bilansowaniu udziału składników do 100%. Czy kompensowano uzysk biogazu z mieszaniny na podstawie uzysku biogazu z inokulum zawartego w mieszaninie? Przedstawienie równań powinno być w ujednoliconej formie, np. przy wykorzystaniu oznaczeń, jak zapisany zmodyfikowany model Gompertza, ale bez podawania jednostek w równaniach. Pod każdym równaniem zwykle stosuje się opis oznaczeń i jednostek. Dlaczego wydajność produkcji biogazu (wodoru) odniesiono do s.m., a nie do s.m.o? W opisie niektórych pomiarów brakuje informacji o instrumentach pomiarowych (model) i dokładności pomiaru. Nie przedstawiono sposobu wyznaczenia parametrów zmodyfikowanego modelu Gompertza ani wskaźników kryterialnych dopasowania modelu do danych empirycznych. Brakuje oceny parametrów zmodyfikowanego modelu Gompertza pod kątem statystycznej istotności. Brakuje opisu modelowania numerycznego CFD i podstawowych założeń przyjętych w procedurze modelowania. Ten opis częściowo jest, ale dopiero w wynikach. Brakuje założeń do analizy ekonomicznej i opisu metody obliczeniowej wraz ze wskaźnikami ekonomicznymi. Częściowo dane są w wynikach.

7. Prezentacja wyników i modelowanie z wykorzystaniem zmodyfikowanego modelu Gompertza

Wyniki eksperymentalne przedstawiono w postaci licznych wykresów i tabel, obejmujących m.in. skumulowaną produkcję wodoru, szybkość produkcji, wpływ rodzaju substratu, sposobu obróbki wstępnej, rozdrobnienia oraz mieszania. Zastosowanie zmodyfikowanego modelu Gompertza jest adekwatne do opisu kinetyki procesu ciemnej fermentacji, a dobrane parametry modelu (V_{max} , μ_{max} , czas opóźnienia) umożliwiają porównanie poszczególnych wariantów.

W części tej można jednak wskazać kilka istotnych niedostatków:

- analizowane warianty (str. 71) należy przenieść do metodyki badań, gdyż ona co do zasady opisuje również sposób analizy wyników,
- tekst opisujący wyniki powinien wyprzedzać rysunki i tabele, np. rys. 18. Ponadto podpisy pod rysunkami lub nad tabelami powinny być pełniejsze, mimo że w tekście to jest wyjaśnione. Czytelnik powinien mieć możliwość przeanalizowania rysunków na podstawie podpisów. Na osi rzędnych rys. 18 (C) nie ma jednostki masy (g). Na innych rysunkach są podobne braki,

- str. 75, cały akapit do rysunku jest opisem należącym do metodyki badań. Dopiero tutaj czytelnik dowiaduje się, co było zmieniane. Brakuje jednak informacji, jak przygotowano te próbki, jaka była wilgotność słomy, jaki był rozkład wymiarów cząstek? Podobne uwagi są do dalszych wyników badań,
- na str. 76 podano informację o stosunku C/N dla słomy pszennej, ale brakuje źródła literatury, a na kolejnej stronie 77 jest wartość C/N dla mieszanki 50% słomy i 50% strużyny chromowej, ale nie ma opisu w metodyce badań sposobu wyznaczenia azotu ogólnego i amonowego oraz węgla ogólnego,
- brakuje opisu wyznaczenia ciepła spalania i wyznaczenia wartości opałowej substratów, a przedstawiono wyniki z badań,
- wyniki badań są podawane z różną dokładnością, a powinny być ujednolicone według przyjętych zasad wynikających z dokładności przyrządów pomiarowych, a wartości obliczone z dokładnością do 1%. To i tak przy tego typu badaniach jest duża dokładność,
- brak jest dokładniejszej dyskusji statystycznej uzyskanych parametrów modelu, w tym oceny wiarygodności oszacowań, przedziałów ufności oraz wrażliwości na rozrzut danych eksperymentalnych;
- nie przedstawiono formalnej walidacji modelu (np. poprzez rozdzielenie danych na zestawy kalibracyjne i walidacyjne, obliczenie błędów predykcyjnych), co ogranicza możliwość oceny jego zdolności predykcyjnej;
- dyskusja wyników modelowania ma głównie charakter opisowy i porównawczy, z niewielkim odniesieniem do możliwych mechanizmów biochemicznych leżących u podstaw obserwowanych różnic między wariantami.

Autorka poprawnie wykazuje, że dobór kosubstratów lignocelulozowych oraz parametrów mieszania wpływają na wydajność i szybkość produkcji wodoru, jednak brakuje bardziej pogłębionej, mechanistycznej interpretacji tych efektów (np. w kategoriach dostępności węgla i azotu, buforowania pH, intensywności transportu masy i ciepła itp.).

8. Modelowanie CFD i projekt reaktorów

Rozdziały dotyczące symulacji CFD i projektu reaktorów stanowią ważny i oryginalny element rozprawy. Autorka, we współpracy z zespołem specjalistów, przeprowadziła obliczenia numeryczne dla różnych geometrii mieszadeł i konfiguracji reaktorów, analizując rozkłady prędkości, strefy słabego mieszania oraz efektywność homogenizacji. Wyniki tych analiz posłużyły do zaproponowania korzystniejszych rozwiązań konstrukcyjnych reaktorów.

Pozytywnie należy ocenić fakt, że Autorka stara się powiązać wyniki CFD z aspektami praktycznymi doboru mieszadeł i parametrów pracy reaktorów. Jednocześnie należy zauważyć, że opis przyjętych założeń modelowych (siatka obliczeniowa, warunki brzegowe, rodzaj modelu turbulencji, kryteria zbieżności) jest dość skrótowy, a dyskusja ogranicza się głównie do prezentacji obrazów pól prędkości. Brakuje próby ilościowego powiązania wyników CFD z danymi eksperymentalnymi, np. przez porównanie czasu mieszania, stopnia homogenizacji lub wskaźników intensywności mieszania.

Ponadto modelowanie CFD traktowane jest w rozprawie jako narzędzie pomocnicze, bez wyraźnego wskazania, w jaki sposób wyniki tych symulacji wpłynęły na ostateczne sformułowanie wniosków o charakterze ogólnym. W rozprawie doktorskiej można oczekiwać bardziej konsekwentnego powiązania części numerycznej z częścią eksperymentalną, np. w postaci jasno zdefiniowanych pytań badawczych, na które odpowiadają poszczególne serie obliczeń CFD.

9. Analiza ekonomiczna

Rozdział 5 poświęcony jest analizie wydajności i opłacalności produkcji wodoru z różnych substratów i ich mieszanek. Niewątpliwym atutem jest podjęcie próby oszacowania kosztów i przychodów oraz wskazanie, że fermentacja odpadów garbarskich może być potencjalnie procesem ekonomicznie uzasadnionym, zwłaszcza jeśli uwzględni się redukcję kosztów utylizacji odpadów oraz możliwość wykorzystania powstałego wodoru jako nośnika energii.

Analiza ma jednak charakter wstępny i opiera się na dość ogólnych założeniach ekonomicznych. Nie jest ona konieczna, ale zapewne wynika to z charakteru wdrożeniowego rozprawy doktorskiej. Jeśli już ją zamieszczono, to powinna być pełniejsza. Brakuje rozbudowanej analizy wrażliwości (np. na zmiany cen energii, kosztów inwestycyjnych, stawek za utylizację odpadów), scenariuszy skalowania procesu oraz porównania z alternatywnymi technologiami zagospodarowania odpadów. Z punktu widzenia decyzji przemysłowych przydatne byłoby także przedstawienie wskaźników takich jak NPV, IRR czy okres zwrotu dla przykładowej instalacji o określonej skali.

10. Spójność tytułu, streszczenia, tezy i wniosków

Streszczenie (w wersji polskiej i angielskiej) poprawnie oddaje główne założenia rozprawy, wskazując na cel, zakres badań i główne wnioski praktyczne. Tytuł rozprawy akcentuje „badania eksperymentalne i modelowanie”, co jest zgodne z treścią rozdziałów poświęconych zarówno części doświadczalnej, jak i zmodyfikowanemu modelowi Gomperta oraz symulacjom CFD.

Niemniej jednak spójność między hipotezą, zarysowanym problemem badawczym a wnioskami końcowymi nie jest pełna. Wnioski końcowe mają charakter głównie opisowy i syntetyzują najważniejsze wyniki poszczególnych analiz, ale brakuje jednoznacznego odniesienia do realizacji hipotezy i odpowiedzi na główne pytanie badawcze. Nie sformułowano także jednego nadrzędnego wniosku ogólnego, który podsumowywałby znaczenie zaproponowanej technologii w kontekście gospodarki o obiegu zamkniętym i strategii wodorowej.

Warto byłoby w przyszłości doprecyzować strukturę streszczenia i wniosków tak, aby wprost:

- wskazać, w jakim stopniu uzyskane wyniki potwierdziły hipotezę rozprawy,
- zarysować kierunki dalszych badań (skalowanie, integracja z innymi technologiami, aspekty środowiskowe).

11. Uwagi językowe, terminologiczne i redakcyjne

Rozprawa mgr inż. Pauliny Bandrów napisana jest poprawnym, choć nierównym stylistycznie językiem. W wielu miejscach tekst jest komunikatywny i przejrzysty, jednak pojawiają się liczne potknięcia językowe, interpunkcyjne i drobne błędy ortograficzne, zwłaszcza w streszczeniu anglojęzycznym, np. literówki typu „kinetisc” (kinetics), „exaluation” (evaluation), „constributes” (contributes). Streszczenie w języku angielskim jest natomiast dokładniejsze niż w języku polskim. Po angielsku uściślono bowiem, że wykorzystano zmodyfikowany model Gomperta, gdyż oryginalny model Gomperta ma prostszą formę wykładniczą, i dodano, że mieszanie dotyczyło substratów w fermentatorze. Zdarzają się niekonsekwencje terminologiczne, m.in. mieszanie form „ciemna fermentacja” i „proces fermentacyjnej produkcji wodoru”, „substrat” i „kosubstrat” bez jednoznacznego zdefiniowania ich relacji (str. 68).

Zastrzeżenia budzą także:

- okazjonalne powtórzenia tych samych informacji (np. dotyczących przemysłu garbarskiego, charakterystyki odpadów),
- dość nierównomierne proporcje między rozbudowaną częścią przeglądową a bardziej zwięzłymi rozdziałami wynikowymi,
- w opisie stanu wiedzy, który powinien być informacją w większej skali przeanalizowano dane odnoszące się do pojedynczego zakładu,
- przytaczanie danych statystycznych dla różnych skal, trudno porównywalnych, np. „w typowej garbarni (strużyny) generują średnio 2400 ton/rok odpadów, a w innym miejscu podano, że w Polsce jest wytwarzanych 240 ton/rok,
- w wielu zdaniach wprowadzono odwołania do poprzednich zdań, w który są opisane różne rzeczowniki i nie jest jasne czego dotyczą takie zwroty jak „dla nich”, „tych”, „ich”,
- ponieważ rozprawa doktorska jest w języku polskim, to schematy powinny być również w tym języku, np. rys. 13,
- należy unikać posługiwanie się potocznymi określeniami, np. „bulionu fermentacyjnego”, „poferment”,
- nagłówki tabel są niepełne, np. tabela 1, 2, a w tabeli 5 podano oznaczenie badanego parametru s.m.o. w sposób nietypowy,
- w termodynamice używa się pojęcia „ciepło”, a nie „energia cieplna”,
- charakterystyka firmy Bader Polska sp. z o.o. zamieszczona w przeglądzie literatury (podrozdział 2.11) powinna znaleźć się w rozdziale opisującym własną pracę,
- w tekście pojawiają się literówki i skróty myślowe. Niektóre prowadzą do nieporozumień, np. „wydajność wodoru”; powinno być „wydajność produkcji wodoru”.
- metodologia jest nauką o metodach, a w tej rozprawie użyto konkretnych metod badawczych,
- w oznaczeniach Cr nazwano *chromowa*, co jest dopiero zrozumiałe w połączeniu ze strużyną. Dodatkowo zastosowano w wielu wypadkach zapis „strużyna” lub „strużyna Cr” co stwarza ryzyko nieporozumienia, czy to są dwie różne substancje,
- brakuje pełnych nazw związków chemicznych pierwszy raz pojawiających się w tekście,
- używana jest powszechna jednostka czasu „dzień”, zamiast właściwej „doba”,
- niejasne jest odwoływanie się do literatury w nawiasach kwadratowych umieszczonych po kropce kończącej zdanie, a powinno być przed kropką oraz występują miejscowe nieścisłości w zapisie źródeł bibliograficznych i formatowaniu literatury.

Całość materiału graficznego (rysunki i tabele) jest czytelna, choć układ niektórych wykresów można byłoby poprawić (np. przez ujednolicenie skali osi, czytelniejsze legendy, wskazanie jednostek w tytułach osi). Przydatne byłoby także dodanie na końcu rozdziału wynikowego krótkiego, tabelarycznego zestawienia najważniejszych parametrów procesowych i osiągniętych wydajności dla poszczególnych wariantów.

12. Ocena oryginalności i wartości poznawczej

Po przeanalizowaniu dziewięciu artykułów (dziesiąty artykuł nie jest jeszcze dostępny) zamieszczonych na końcu rozprawy doktorskiej, których współautorką jest mgr inż. Paulina Bandrów, stwierdziłem pewne powtórzenia, które dotyczą opisu charakterystyki strużyny chromowej, źródła odpadów, standardowej metodyki i przeglądu literatury z zakresu obróbki odpadów. Te pokrywania są naturalne i wynikają z identycznego zainteresowania naukowego

Doktorantki, ale w rozprawie doktorskiej należało się na te opisy powołać. Rozprawa doktorska stanowi wyraźne rozgraniczenie między nowymi danymi a danymi opublikowanymi w artykułach. Oryginalny wkład rozprawy doktorskiej wynika z postawionej hipotezy badawczej, wykorzystania instalacji eksperymentalnej, procedury przygotowania inokulum, zmienianych parametrów procesu fermentacji, wyników eksperymentalnych, modelowania CFD, analizy wpływu mieszania na fermentację, projektów reaktorów i sformułowanych wniosków wynikających z treści rozprawy.

Reasumując rozprawa mgr inż. Pauliny Bandrów wnosi oryginalny wkład do rozwijającej się dziedziny zagospodarowania odpadów garbarskich z wykorzystaniem procesów biotechnologicznych. Za szczególnie wartościowe uważam:

- konsekwentne ukierunkowanie badań na realny problem przemysłowy konkretnego zakładu (Bader Polska),
- wykazanie, że odpady w postaci strużyn chromowych mogą być efektywnym substratem do produkcji wodoru w procesie ciemnej fermentacji,
- połączenie badań eksperymentalnych z modelowaniem kinetyki (zmodyfikowany model Gompertza) i symulacjami CFD.

Pomimo zasygnalizowanych uwag krytycznych dotyczących konstrukcji logicznej rozprawy, formułowania hipotezy, sposobu prezentacji wyników statystycznych i walidacji modeli, osiągnięcia badawcze przedstawione w rozprawie należy ocenić pozytywnie.

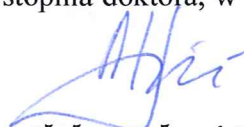
13. Podsumowanie i wniosek końcowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Bandrów pt. „Proces ciemnej fermentacji odpadów garbarskich – badania eksperymentalne i modelowanie” stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego oraz wartościowe opracowanie naukowe o charakterze wdrożeniowym, integrujące zagadnienia z zakresu biotechnologii, inżynierii procesowej, modelowania numerycznego i analizy ekonomicznej. Rozprawa w przekonujący sposób dokumentuje rozległą, uporządkowaną wiedzę teoretyczną Doktorantki w dyscyplinie inżynierii mechanicznej, ze szczególnym uwzględnieniem inżynierii procesowej i technik modelowania. Przedstawiony materiał badawczy oraz sposób jego opracowania jednoznacznie potwierdzają także umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej przez Doktorantkę, obejmującą planowanie eksperymentów, analizę wyników i ich krytyczną interpretację. Autorka zrealizowała ambitny program badawczy, obejmujący:

- zaprojektowanie i eksploatację instalacji do procesu ciemnej fermentacji w warunkach rzeczywistych,
- badania nad wpływem rodzaju substratów, obróbki wstępnej, rozdrobnienia i mieszania na wydajność produkcji wodoru,
- zastosowanie zmodyfikowanego modelu Gompertza do opisu kinetyki procesu,
- wykonanie symulacji CFD dla reaktorów fermentacyjnych,
- wstępną ocenę ekonomiczną proponowanej technologii.

Przedstawione wyniki mają charakter oryginalny i potwierdzają, że odpady garbarskie mogą być wykorzystane jako surowiec energetyczny w procesie ciemnej fermentacji, co ma istotne znaczenie zarówno dla przemysłu skórzanego, jak i dla sektora energetycznego. Zasygnalizowane w niniejszej recenzji uwagi krytyczne dotyczą w głównej mierze kwestii redakcyjnych, językowych, doprecyzowania struktury logicznej rozprawy oraz pogłębienia analizy statystycznej i walidacji modeli. Nie podważają one jednak ogólnej wartości naukowej i aplikacyjnej rozprawy, ale należało je wyartykułować dla pełnej jej oceny.

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Pauliny Bandrów spełnia wymagania określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r. poz. 1574 ze zm.) i zasługuje na pozytywną ocenę. Wnoszę do Rady Naukowej Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk o dopuszczenie Autorki do kolejnych etapów postępowania w sprawie nadania stopnia doktora, w tym do publicznej obrony rozprawy doktorskiej.



Aleksander Lisowski

