

Poznań, dn. 12.06.2026 r.

Prof. dr hab. inż. Jacek Dach
Katedra Inżynierii Biosystemów
Wydział Inżynierii Środowiska i Inżynierii Mechanicznej
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Pauliny Bandrów

pt. „Proces ciemnej fermentacji odpadów garbarskich – badania eksperymentalne i modelowanie”, wykonanej w Instytucie Maszyn Przepływowych im. Roberta

Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk

nad którą opiekę naukową sprawowali

promotor dr hab. inż. Adam Cenian oraz

promotor pomocniczy dr hab. inż. Szymon Szufa

OCENA FORMALNA PRACY

Recenzję rozprawy doktorskiej sporządziłem na podstawie pisma nr BRN.521.8.2025 z dnia 1 kwietnia 2026 r., podpisanego przez dra hab. inż. Grzegorza Żywicę, prof. IMP PAN, Zastępcę Dyrektora ds. Naukowych Instytutu Maszyn Przepływowych im. Roberta Szewalskiego Polskiej Akademii Nauk, informującego o wyznaczeniu mnie na recenzenta przedmiotowej rozprawy. Postępowanie prowadzone jest w dyscyplinie inżynieria mechaniczna na podstawie Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 poz. 1571 ze zm.).

Promotorem pracy są Panowie dr hab. inż. Adam Cenian – promotor oraz dr hab. inż. Szymon Szufa – promotor pomocniczy.

Rozprawa liczy łącznie 145 stron, w tym zawiera 20 tabel oraz 56 rysunków.

Praca zawiera 229 pozycji literaturowych w bibliografii. Na uwagę zasługuje wykorzystanie przede wszystkim literatury anglojęzycznej. Przewaga cytowań z literatury światowej w pracy świadczy z jednej strony o nowatorstwie problemu, który Kandydatka podjęła w swej dysertacji, a z drugiej strony znacząco podnosi wartość pracy.

Przekazana mi do recenzji praca doktorska posiada zasadniczo poprawną strukturę właściwą dla opracowań naukowo-badawczych. Należy jednak zauważyć, że praca nie zawiera

wyodrębnionego rozdziału metodycznego, co stanowi pewne uchybienie formalne, utrudniające jednoznaczną identyfikację zastosowanych metod badawczych i ocenę poprawności ich doboru (więcej szczegółów na ten temat podaję w dalszej części recenzji).

SZCZEGÓŁOWA OCENA PRACY

Tytuł ocenianej pracy („Proces ciemnej fermentacji odpadów garbarskich – badania eksperymentalne i modelowanie”) odpowiada w pełni jej treści oraz wpisuje się w zakres nauk inżynieryjno-technicznych, w dyscyplinę inżynieria mechaniczna. Praca jest bardzo interesującym podejściem do zagadnienia produkcji biowodoru na bazie odpadów garbarskich łączącym badania laboratoryjne, modelowanie kinetyki procesu na bazie uzyskanych wyników wraz z analizą CFD służącą do optymalizacji procesów mieszania w reaktorach – a całość pracy ma wyraźnie charakter wdrożeniowy, zmierzający do zastosowania uzyskanych wyników w realnej działalności gospodarczej.

Praca zawiera obszerny (54 strony) rozdział nr 2 z przeglądem literatury dotyczącym badanego zagadnienia. W rozdziale tym mgr inż. Paulina Bandrów wnikliwie analizuje zarówno proces powstawania odpadów w przemyśle garbarskim, możliwości ich zagospodarowania wraz z regulacjami prawnymi dotyczącymi tego zagadnienia, jak i możliwości wykorzystania wodoru oraz sam proces fermentacji ciemnej, w wyniku którego wytwarzany jest biowodór.

Choć, jak wspomniałem, przegląd literatury przedmiotu jest mocno rozbudowany, niemniej w trakcie lektury nasunęły mi się pytania, na które chciałbym uzyskać odpowiedź Doktorantki w trakcie publicznej obrony pracy.

Na stronie 38. pracy Autorka podaje podział rodzajów wytwarzanego wodoru wg ich kolorów zależnych od charakterystyki wytwarzania. *Stąd nasuwa mi się pytanie: jak nazwać biowodór z fermentacji ciemnej? Wszak nie jest to wodór zielony, który jak sama Doktorantka podaje – pochodzi z elektrolizy wody. Jaki kolor można mu przyporządkować?*

Ponadto na stronie 41 Doktorantka podaje, że w wyniku fermentacji ciemnej generowany jest biogaz, składający się z wodoru, dwutlenku węgla i lotnych kwasów tłuszczowych. W procesie fermentacji powinniśmy dążyć do tego, aby lotne kwasy tłuszczowe były w całości przetworzone na kwas octowy i dalej na metan w kolejnych etapach fermentacji, natomiast moją lekką wątpliwość budzi nazwa „biogaz” dla mieszanki wodorowo-dwutlenkowej. *W związku z tym proszę Doktorantkę o przeanalizowanie dostępnych dokumentów z zakresu prawa polskiego i UE w celu określenia, czy mieszanekę gazową*

powstającą w procesie fermentacji ciemnej (bez zawartości metanu) możemy określić mianem biogazu?

Z kolei na stronie 45 Autorka stwierdza, iż „Wydajność produkcji wodoru zależy od rodzaju użytego substratu. Substraty, zazwyczaj bogate są w węglowodany, które są podstawowym źródłem energii dla bakterii fermentujących”. Tymczasem z licznych publikacji oraz badań realizowanych w Pracowni Ekotechnologii UP w Poznaniu wynika, że najbardziej energetycznymi substratami są białka i tłuszcze. Ponadto dalej, na stronie 26 Doktorantka stwierdza, iż odpady zawierające makarony wytwarzały kilkukrotnie większą ilość wodoru ($85 \text{ cm}^3 \text{ H}_2/\text{g VS}$) w porównaniu do odpadów rzeźniczych ($25 \text{ cm}^3 \text{ H}_2/\text{g VS}$). *W związku z tym mam pytanie: dlaczego podczas produkcji biowodoru węglowodany mają 3,5-krotnie wyższą wydajność produkcji niż białka i tłuszcze – podczas gdy w procesie fermentacji metanowej zachodzi odwrotna sytuacja? Czym to uzasadnić?*

Z kolei na stronie 47 Doktoranta zamieszcza informację, iż „Osady ściekowe również wskazują znaczący potencjał jako substraty w produkcji biowodoru. Ich przewagą jest duża dostępność oraz zawartość związków organicznych, w tym węglowodanów prostych”. Tymczasem zarówno praktyka gospodarcza w oczyszczalniach ścieków (realne doświadczenia operatorów i nadzorców technologicznych), jak i publikacje naukowe wykazują, że łatwo biodegradowalne związki organiczne, w tym cukry proste, są w dużej mierze zużywane już w reaktorach biologicznego oczyszczania ścieków przez mikroorganizmy tlenowe i nie występują one w osadach ściekowych. *Proszę Doktorantkę o ustosunkowanie się do tego stwierdzenia podczas publicznej obrony.*

Moje pewnego rodzaju zdumienie wzbudziło zdanie „Cennym surowcem w generowaniu biopaliw są odpady lignocelulozowe pochodzące z przemysłu rolniczego bądź drzewnego, w postaci **kory**, słomy, traw, zbóż czy **drewna**” na stronie 48. Ponieważ rozdział ten dotyczy stricte fermentacji ciemnej, a z kolei wiadomo, że substraty lignocelulozowe jak kora czy drewno i jego odpady nie rozkładają się w procesie fermentacji metanowej (potrzebują do rozkładu tlenu – stąd mogą być tylko kompostowane), a zboża, zwłaszcza słoma i plewy, są trudno rozkładalne – w związku z tym mam pytanie do Doktorantki: *czy w procesie fermentacji ciemnej możliwe jest przetwarzanie odpadów drzewnych, których albo nie przetwarza się w fermentacji metanowej, albo ich fermentacja jest bardzo utrudniona?*

Na koniec uwag związanych z rozdziałem fermentacji ciemnej mam jeszcze pytanie związane z informacją przedstawioną za publikacją Priebe i in.[37] (str. 49) dotyczącą usunięcia

chromu z odpadów garbarskich w celu poprawienia warunków procesu fermentacji. *Chciałbym poznać zdanie Autorki odnośnie tego, jak można efektywnie usunąć chrom z odpadów garbarskich – ponieważ w trakcie kierowanych przeze mnie projektów realizowanych w latach 2004-2008 i dotyczących usuwania metali ciężkich – zagadnienie to natrafia na bardzo wiele trudności natury technicznej, energetycznej i ekonomicznej.*

Na koniec oceny części literaturowej mam do Doktorantki pytanie: *dlaczego nie została wspomniana technologia ProBioGas – polska technologia biogazowa, która jednocześnie pozwala produkować biowodór? Autorka przeprowadziła bardzo szeroką analizę zagadnienia wytwarzania biowodoru, a tymczasem pominęła fakt, że wiosną 2013 roku w Międzyrzeczu Podlaskim działała pierwsza i jedyna do tej pory na świecie instalacja produkująca w skali przemysłowej biowodór z bioodpadów (ponad 2000 Nm³ bioH₂/dobę)?* Produkcja ta trwała w sposób ciągły przez kilkanaście tygodni, właściciel starał się zainteresować produkowanym biowodorem koncerny paliwowe i samochodowe, a w konsekwencji mieszanka biowodoru i biogazu spalana w agregacie kogeneracyjnym o mocy 1.2 MW spowodowała jego ciężkie uszkodzenia wskutek korozji wodorowej i spalania stukowego, wskutek czego zrezygnowano z procesu produkcji biowodoru (niemniej technologia istnieje i jest opatentowana).

W pracy brakuje wydzielonego rozdziału metodyki, bowiem zaraz po rozdziale „3. Cel i hipoteza badawcza” Autorka przechodzi do rozdziału „4. Wyniki badań i dyskusja”. Tymczasem podrozdział 4.1 w rozdziale Wyniki badań i dyskusja powinien stanowić właśnie osobny główny rozdział metodyczny. Niemniej należy podkreślić, że zarówno zastosowana aparatura badawcza jak i metodyka badań nie budzą moich zastrzeżeń, bowiem jest ona tożsama z procedurami wykonywanymi w licznych niemieckich laboratoriach, jak i od kilkunastu lat w kierowanej przeze mnie Pracowni Ekotechnologii.

Wyniki badań porównawczych substratów (rozdział 4.2.) zawierają interesujące dane pomiarowe związane z produkcją biowodoru, niemniej mam odnośnie nich kilka pytań do Doktorantki. *Z czego wynika 14-dniowy czas trwania doświadczeń? Zwłaszcza, że na rys. 18B nawet w 14. dniu doświadczenia w wytwarzanym gazie wciąż było 0-10% wodoru? Bardzo ciekawy wynik przedstawia rys. 18C. Mieszanka 1:1 strużyn i glukozy daje wielokrotnie wyższy wynik niż fermentacja samej tylko glukozy i strużyn. Czym, zdaniem Doktorantki, można wytłumaczyć aż tak wielką różnicę? Czyżby wystąpił tu aż tak silny efekt synergii?*

Na końcu strony 74. Autorka stwierdza, że „Dlatego w dalszej części badany jest wpływ odpadów lignocelulozowych, które mogą być źródłem glukozy w procesie.”, po czym

przechodzi do opisu doświadczeń z udziałem dodatku słomy. Abstrahując od mojej wcześniejszej uwagi o tym, że substraty lignocelulozowe są trudnorozkładalne w fermentacji metanowej, chciałbym zapytać o stopień rozdrobnienia słomy użytej w badaniach. Słoma zaprezentowana na rys. 17 wykazuje dość niski stopień rozdrobnienia, tymczasem z licznych badań wynika, że to właśnie stopień rozdrobnienia słomy czy też substratów zawierających słomę (jak obornik) wpływa na dynamikę procesu fermentacji metanowej. *Proszę Doktorantkę o ustosunkowanie się do tego zagadnienia i wyjaśnienie kwestii rozdrobnienia użytej w badaniach słomy oraz jego możliwego wpływu na wyniki.* Jest to też o tyle istotne, że w rozdziale 4.4 Doktorantka podejmuje badania wpływu rozdrobnienia na wydajność produkcji wodoru, jednak dotyczą one plew gryki, a nie słomy zbożowej. Wyniki wskazują jednak na wpływ rozdrobnienia na zwiększenie produkcji.

Moją wątpliwość budzi też wynik przedstawiony na rys. 20 odnośnie rezultatu fermentacji 100% słomy. Doktorantka uzyskała $13,08 \text{ cm}^3 \text{ H}_2$ na g substratu, ale jednocześnie zaledwie $1,246 \text{ cm}^3 \text{ H}_2/1 \text{ g}$ suchej masy substratu. A przecież różnica pomiędzy świeżą masą a suchą masą w słomie jest minimalna i wynosi zaledwie kilka punktów procentowych. *Stąd moje pytanie do Autorki: z czego wynika aż tak duża różnica w wyniku produkcyjnym dla słomy badanej jako monosubstrat?*

Rozdział 4.5 opisujący analizę wpływu mieszania na wydajność produkcji wodoru skomentowałbym jedynie tak, że wyniki te będą miały raczej niewielkie przełożenie na warunki realne. Wykazanie, iż brak mieszania wpływa negatywnie na proces fermentacji jest oczywiste – niemniej w warunkach realnie pracujących biogazowni brak mieszania świadczy o wystąpieniu sytuacji awaryjnej, i to tylko występuje w przypadku uszkodzenia mieszadła w reaktorze wyposażonym w jedno mieszadło centralne. Z kolei badania wykazują, że przeniesienie wyników odnośnie badań reologicznych z reaktorów laboratoryjnych o pojemności kilku czy kilkudziesięciu litrów na fermentory o pojemnościach kilku milionów litrów może być trudne i nieoczywiste. Niemniej należy podkreślić, że badania efektywności mieszania, zapotrzebowania energetycznego i parametrów reologicznych fermentującej pulpy jest niezwykle istotne z punktu widzenia optymalizacji pracy reaktorów fermentacyjnych. Świadczy o tym choćby porównanie efektywności produkcji biogazu i zużycia energii w fermentorach pracujących w różnych technologiach biogazowych. Z doświadczeń praktycznych wynika, że zastosowanie w reaktorach fermentacyjnych biogazowni m.in. w Przybrodzie, Śniatych czy Nowalijce pionowego systemu mieszania strumieniowego

przedstawionego również na rysunkach 33 i 34 w bardzo znaczący sposób podnosi efektywność procesu produkcji biogazu w porównaniu do tradycyjnych systemów mieszania, przy okazji likwidując problem tworzenia się kożucha na powierzchni pulpy oraz osadów dennych. Efekty te uzyskano w praktyce w produkcji biogazu w skali realnej. Tymczasem wielką zaletą niniejszej pracy jest zaprojektowanie mieszadeł dedykowanych dla procesu fermentacji ciemnej (brak jest w literaturze specjalistycznej w skali światowej podobnego opracowania). Chciałbym jednak dodać, że dla lepszej przejrzystości tekstu pracy, pierwsza część rozdziału 4.6 dotycząca projektowania powinna być przeniesiona do wydzielonego rozdziału metodycznego.

Część merytoryczną pracy kończy rozdział 5. zawierający analizę ekonomiczną dla poszczególnych wariantów. Autorka słusznie podkreśla, że zastosowanie strużyn jako substratu niesie za sobą oszczędności w kosztach jego utylizacji. Zwiększenie udziału słomy z kolei pogarsza opłacalność technologii. *Analizując ten rozdział mam do Doktorantki 2 pytania:*

- *skąd wzięła się cena słomy na poziomie 312,5 zł (tabela 19)?*
- *dlaczego Doktorantka nie uwzględniła w tej analizie możliwości dalszego przetwarzania uzyskanego po procesie fermentacji ciemnej materiału w fermentacji metanowej w celu dodatkowej produkcji metanu? Czy uzyskana z procesu fermentacji ciemnej pulpa nie posiada już żadnego potencjału energetycznego?*

Pracę kończy rozdział Podsumowanie i wnioski, w którym Autorka zawarła 13 najważniejszych wniosków wynikających z badań oraz wskazała kierunek dalszych badań, w szczególności pod kątem wdrożenia opracowanej technologii w realiach gospodarczych.

WNIOSKI KOŃCOWE

Recenzowana przeze mnie dysertacja autorstwa pani mgr inż. Pauliny Bandrów podejmuje w szeroki i kompleksowy sposób bardzo innowacyjną tematykę wytwarzania biowodoru w procesie fermentacji ciemnej z problematycznych bioodpadów z dodatkiem kosubstratów. Jest to obszar badawczy, który w kontekście przejścia gospodarki europejskiej na zasilanie wodorowe w pełni wpisuje się w aktualne i przyszłe trendy gospodarcze, stąd prezentowane wyniki mogą być nie tylko wykorzystane w przygotowaniu publikacji do wysoko ocenianych czasopism międzynarodowych (do czego Autorkę bardzo zachęcam), ale także mogą być podstawą do wdrożenia w realnej gospodarce – w tym wypadku w firmie przetwarzającej skóry, w której realizowane były badania. Wstępna analiza ekonomiczna

potwierdziła zresztą opłacalność takiego wdrożenia, a moim zdaniem bilans ekonomiczny byłby jeszcze lepszy, gdyby uwzględnić możliwość dodatkowej produkcji metanu.

Reasumując stwierdzam, że rozprawa doktorska przedłożona przez mgr inż. Paulinę Bandrów, spełniła ustawowe wymagania do ubiegania się o stopień naukowy doktora, określone w art. 187 Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. (Dz. U. z 2024 r. poz. 1571, z późn. zm.) w dyscyplinie inżynieria mechaniczna. Nieliczne, drobne błędy popełnione przez Doktorantkę w żaden znaczący sposób nie pomniejszają wartości przedłożonej mi do recenzji pracy. Uwzględniając powyższe, wnioskuję o przyjęcie recenzowanej rozprawy przez Radę Naukową Instytutu Maszyn Przemysłowych PAN i dopuszczenie jej do publicznej obrony.

