

dr hab. inż. Monika Żubrowska-Sudoł, prof. uczelni  
Politechnika Warszawska  
Wydział Instalacji Budowlanych Hydrotechniki  
i Inżynierii Środowiska

Warszawa, 07.07.2023

## **RECENZJA**

rozprawy doktorskiej mgr inż. Przemysława Liczbińskiego  
pt. „**Opracowanie nowej metody przetwarzania odpadów zielonych  
wraz z odpadami kuchennymi na biogaz**”

Promotor: dr hab. inż. Sebastian Borowski, prof. uczelni

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Przemysława Liczbińskiego wykonana została pod promotorską opieką dr hab. inż. Sebastiana Borowskiego, prof. uczelni na Wydziale Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska Politechniki Łódzkiej. Jej głównym celem była ocena efektywności hipertermofilnej obróbki wstępnej trawy i liści, a także analiza wpływu rozpatrywanej metody na wydajność procesu kofermentacji tych materiałów z odpadami kuchennymi, przy uwzględnieniu prowadzenia procesu w warunkach mezofilnych i termofilnych. Oceniana rozprawa doktorska podejmuje tematykę, którą można zaliczyć do kilku obszarów badań naukowych, a w szczególności do badań nad biologicznymi metodami wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych, fizycznymi metodami wstępnej obróbki biomasy a szerzej do badań nad jej waloryzacją. Poza pierwiastkiem naukowym podjęta w dysertacji tematyka ma charakter użyteczny i odpowiada obecnym trendom w rozwoju gospodarczym Unii Europejskiej podnoszącym potrzebę poszukiwania i wdrażania technologii opartych o zasady zrównoważonego wykorzystania zasobów w paradygmacie gospodarki o obiegu zamkniętym. Podjęte w pracy badania odpowiadają na wyzwania niskoemisyjnej cyrkularnej biogospodarki, która bazując na biomase wtórej pozwala na ograniczenie zależności od paliw kopalnych i jednocześnie przyczynia się do dywersyfikacji źródeł energii. Wybór tematyki rozprawy uznać należy zatem za trafny i wychodzący naprzeciw oczekiwaniom kierowanym pod adresem środowisk naukowych.

Oceniana rozprawa doktorska została przygotowana w formie spójnego tematycznie zbioru 5. oryginalnych prac opublikowanych w latach 2020 – 2022 w następujących periodykach wymienionych w wykazie czasopism naukowych Ministra Edukacji i Nauki:

*Energies*: publikacja 1 (P1), 2020 r., IF=3,004, 140 pkt. oraz publikacja 3 (P3), IF=3,252, 140 pkt.; *Bioresource Technology*: publikacja 2 (P2), 2021 r., IF=11,889, 140 pkt. oraz publikacja 5 (P5), 2022, IF=11,889, 140 pkt.; *Molecules*, IF=4,927, 140 pkt. Zgodnie z oświadczeniami Doktoranta, potwierdzonymi przez współautorów poszczególnych prac, jego wkład naukowy w powstanie ostatecznej wersji wszystkich publikacji wynosił 70% przy całkowitej ilości autorów od 2. (P1, P2, P3) do 3 (P4, P5). Każdorazowo obejmował: opracowanie koncepcji pracy, zaplanowanie i przeprowadzenie eksperymentów, interpretację i dyskusję uzyskanych wyników oraz przygotowanie manuskryptu.

Sumaryczny IF oraz liczba punktów zgodna z wykazem czasopism naukowych i recenzowanych materiałów z konferencji międzynarodowych MEN zbioru prac stanowiącego dysertację wynoszą odpowiednio 34,961 oraz 700. Należy przy tym szczególnie podkreślić, że dwie prace zostały opublikowane w czasopiśmie z pierwszego decyla wg bieżącego wskaźnika CiteScore bazy Scopus. Badania przeprowadzone przez Doktoranta zostały docenione przez periodyki naukowe o wysokiej międzynarodowej renomie, a tym samym przez grono międzynarodowych ekspertów oceniających manuskrypty.

Analizując kompozycję przedstawionej do oceny dysertacji należy stwierdzić, że zawiera ona wszystkie wymagane elementy. Rozprawa doktorska liczy 104 strony. Rozpoczyna się streszczeniem w języku polskim oraz angielskim, życiorysem naukowym Doktoranta oraz wykazem publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej. Kolejne 29. stron to przewodnik do artykułów naukowych stanowiących podstawę dysertacji. Ta część rozpoczyna się od omówienia teoretycznych zagadnień powiązanych z tematyką pracy. Doktorant w szczególności omówił: i) metody wstępnej obróbki biomasy lignocelulozowej, takie jak obróbka fizyczna, chemiczna, biologiczna i enzymatyczna; ii) procesy powstania metanu na drodze biologicznej z uwzględnieniem dwóch mechanizmów: metanogenezy acetoklastycznej oraz hydrogenotroficznej; iii) czynniki wpływające na przebieg i efektywność procesów, w efekcie których produkowany jest metan. Odniósł się również do aspektu odchodzenia od paliw kopalnych i zastępowania ich odnawialnymi źródłami energii. Na tym tle sprecyzował następującą hipotezę badawczą: „...wstępna obróbka hipertermofilna odpadów zielonych zwiększy produkcję biogazu, gdyż umożliwi ona rozbitcie struktur lignocelulozowych liści i traw, a tym samym zwiększenie dostępności tych substratów dla bakterii i metanogenów środowiska fermentacji beztlenowej”. Zdefiniował również cel badań, który cytując Autora dysertacji brzmi: „Celem badań było zweryfikowanie postawionej hipotezy badawczej poprzez ocenę efektywności hipertermofilnej obróbki wstępnej trawy i liści, a także jej wpływu na wydajność procesu kofermentacji tych materiałów z odpadami kuchennymi w warunkach

termofilnych oraz mezofilnych”. Jako istotny cel cząstkowy rozprawy doktorskiej została również wskazana możliwość wyizolowania bakterii ze środowisk termofilnych i hipertermofilnych o zdolnościach hydrolitycznych oraz ich wykorzystania do wspomagania procesu produkcji metanu i wodoru z odpadów zielonych. Przed omówieniem wyników badań w syntetyczny sposób został także zaprezentowany zakres pracy, z wyróżnieniem zadań badawczych, jakich Doktorant podjął się rozwiązać. Następnie doktorant omówił wyniki badań uzyskane w kolejnych etapach badawczych. Każdemu etapowi został poświęcony oddzielny rozdział. Doktorant w klarowny sposób przedstawił przyjętą metodykę badawczą, dodatkowo obrazując ideę każdego z przeprowadzonych eksperymentów graficznie, omówił uzyskane wyniki, a następnie sprecyzował najważniejsze osiągnięcia. Opisując kolejne etapy badawcze odnosił się do wyników uzyskanych w poprzednich etapach i na tej podstawie uzasadniał warunki przyjęte do prowadzenia doświadczeń oraz zastosowane narzędzia badawcze. Przewodnik do artykułów naukowych stanowiących podstawę dysertacji kończą wnioski oraz spis literatury wykorzystanej do opracowania tej części rozprawy doktorskiej. Doktorant sprecyzował 5 wniosków, w których udokumentował słuszność sprecyzowanej hipotezy badawczej oraz odniósł się do celów szczegółowych dysertacji. Wykaz literatury obejmuje 39 pozycji. Omawiana część rozprawy doktorskiej zawiera 6 rysunków, z czego 5 to schematyczne przedstawienie prowadzonych eksperymentów. Następnie Autor przedstawił swoje osiągnięcia, na które składa się 8 artykułów naukowych oraz jedno wystąpienie na konferencji krajowej. Kolejna część pracy, obejmująca 54 strony, to artykuły naukowe stanowiące rozprawę doktorską. Po tej części zamieszczono oświadczenia Doktoranta i pozostałych współautorów o ich udziale w powstaniu poszczególnych publikacji.

Szczegółowy zakres prac zaprezentowanych w publikacjach przedstawia się następująco:

1. *„Hyperthermophilic treatment of grass and leaves to produce hydrogen, methane and VFA-rich digestate: Preliminary results”*, Energies, 2020, 13 (11), 2814;

W pracy przedstawiono wyniki badań, których celem było określenie warunków wstępnej obróbki hipertermofilnej trawy i liści, które sprzyjają upłynnieniu substratów i zwiększeniu ich podatności na rozkład biologiczny w warunkach beztlenowych. Jako wskaźniki pozwalające na analizę stopnia upłynnienia wykorzystano wartości rozpuszczonego ChZT, stężenia LKT, cukrów redukujących oraz azotu amonowego. Eksperyment mający na celu ocenę podatności badanych substratów na rozkład biologiczny przeprowadzono jako porcjowe testy fermentacji beztlenowej. Zmiennymi doświadczalnymi były: stopień rozcieńczenia substratów wyrażony stosunkami wagowymi substratu do wody (trawa: 1:1, 1:2, 1:3, 1:4; liście: 1:2, 1:3, 1:4);

temperatura prowadzenia wstępnej obróbki substratów (70°C i 80°C); stosunek inokulum do substratu w porcjowych testach fermentacji beztlenowej (trawa: 2:1, 1:1, 1:2, 1:3, 1:4; liście: 2:1, 1:2, 1:3, 1:4). Najważniejszym osiągnięciem tego etapu badawczego było wykazanie, że w efekcie obróbki hipertermofilnej trawy i liści dochodzi do częściowego upłynnienia badanych substratów, w wyniku którego powstają łatwo biodegradowalne kwasy tłuszczowe oraz cukry proste, które w dalszym etapie mogą zostać wykorzystane do produkcji biogazu. Istotną obserwacją było także stwierdzenie, że tylko w przypadku prowadzenia procesu fermentacji beztlenowej w temperaturze 70°C jego efektem była produkcja metanu i wodoru. Brak występowania tych produktów w przypadku procesu prowadzonego przy 80°C powiązano z faktem, że większość mikroorganizmów wykazuje aktywność w temperaturach nie przekraczających 75°C.

2. *„Effect of hyperthermophilic pretreatment on methane and hydrogen production from garden waste under mesophilic and thermophilic conditions”*, Bioresource Technology, 2021, 335, 125264.

Przedmiotem publikacji była ocena efektywności fermentacji beztlenowej trawy i liści poddanych wstępnej obróbce hipertermofilnej oraz określenie potencjału produkcji biogazu z tych odpadów w procesach termofilnej i mezofilnej fermentacji beztlenowej. W badaniach wykorzystano analogiczne narzędzia jak w przypadku publikacji P1, uzupełniając zakres analityczny o analizę metagenomiczną zbiorowisk mikroorganizmów. Analizowano różne warianty wstępnej obróbki zmieniając skład mieszanin (przy czym istotnym czynnikiem była w tym przypadku obecność w mieszaninie inokulum) oraz temperaturę. Najwyższą wydajność produkcji biogazu uzyskano, gdy substraty były hydrolizowane bez dodatku inokulum przez 3 dni w temperaturze 70°C, a następnie mieszane z inokulum i poddawane procesowi fermentacji metanowej prowadzonej w 55°C. Na podstawie analizy metagenomicznej stwierdzono obecność bakterii termofilnych i hipertermofilnych wykazujących aktywność hydrolityczną wobec materiałów lignocelulozowych.

3. *„Co-digestion of kitchen waste with grass and leaves after hyperthermophilic pretreatment for methane and hydrogen production”*, Energies, 2021, 14, 5880;

Kolejny etap badawczy to częściowo kontynuacja badań nad hipertermofilną obróbką trawy i liści oraz rozpoczęcie nowego wątku dotyczącego kofermentacji odpadów zielonych z odpadami kuchennymi. Obróbkę wstępną prowadzono przez 3 dni w temperaturach 70 i 80°C. Eksperymenty dotyczące produkcji biogazu prowadzono w warunkach mezofilnych (35°C) i termofilnych (55°C) jako hodowle porcjowe dla różnych stosunków mieszania odpadów kuchennych z trawą lub z liśćmi. Najwyższą produkcję metanu (387 Nml/g s.m.o.) uzyskano

dla monofermentacji liści, zaś najwyższą produkcję wodoru dla kofermentacji trawy z 50% udziałem odpadów kuchennych (88 Nml/g s.m.o.). Istotnym osiągnięciem tego etapu badawczego było stwierdzenie, że dodatek odpadów kuchennych do fermentacji wstępnie zhydrolizowanych odpadów zielonych pozwala na uzyskanie wyżej produkcji wodoru w porównaniu do monofermentacji. Spośród badanych warunków procesowych najkorzystniejszymi z punktu widzenia produkcji metanu i wodoru okazało się prowadzenie wstępnej obróbki odpadów zielonych w temperaturze 70°C przez 3 dni, a następnie współfermentowanie tych substratów z 75% udziałem odpadów kuchennych prowadzone w temperaturze 55°C.

4. „*Isolation and use of Coprothermobacter spp. to improve anaerobic thermophilic digestion of grass*”, *Molecules*, 27(14), 4338.

W badaniach opisanych w przedmiotowej publikacji zajmowano się izolacją bakterii hydrolitycznych z pofermentu pochodzącego z procesu fermentacji beztlenowej trawy w warunkach termofilnych oraz określeniem wpływu dodatku wyizolowanych drobnoustrojów na proces produkcji biogazu z trawy. W efekcie przeprowadzonych eksperymentów wyizolowano i zidentyfikowano bakterie z rodzaju *Coprothermobacter spp.*, które charakteryzują się zdolnością do degradacji min. celulozy. Wykazano również, że dodatek tych drobnoustrojów do trawy poddanej wstępnej obróbce hipertermofilnej lub niepoddanej tej obróbce, umożliwia uzyskanie wyższej produkcji metanu oraz wodoru.

5. „*Anaerobic co-digestion of kitchen waste with hyperthermophilically pretreated grass for biohydrogen and biomethane production*”, *Bioresource Technology*, 2022, 364, 128053.

Przedmiotem ostatniego etapu badawczego była analiza przebiegu i efektywności procesu współfermentacji trawy poddanej wstępnej hipertermofilnej obróbce z odpadami kuchennymi. W odróżnieniu od wcześniejszych etapów, wykorzystano w tym celu hodowle półciągłe. Prowadzono je przy różnym czasie zatrzymania wynoszącym 20 i 30 dni oraz przy różnej temperaturze: 35 i 55°C. Badania technologiczne połączono z badaniami mikrobiologicznymi, których celem była ocena zbiorowisk mikroorganizmów biorących udział w procesach fermentacji beztlenowej oraz hydrolizy hipertermofilnej. Najwyższą produkcję metanu (293 Nml/g s.m.o.) uzyskano dla wariantu z kofermentacją prowadzoną w temperaturze 55°C przy czasie zatrzymania wynoszącym 30 dni. W badaniach wykazano, że wartość ta była ok. dwukrotnie wyższa od produkcji metanu odnotowanej dla termofilnej monofermentacji trawy (131 Nml/g s.m.o.). Ponadto udokumentowano, że warunki mezofilne sprzyjały przebiegowi ciemnej fermentacji wodorowej.

Lektura rozprawy dała podstawę do sformułowania kilku pytań i uwag o polemicznym charakterze. Nie mają one jednak wpływu na moją końcową ocenę wartości merytorycznej rozprawy:

1. W publikacji nr 4 wykazano, że dodatek wyizolowanych bakterii z rodzaju *Coprothermobacter spp.* do trawy przed jej wprowadzeniem do reaktorów beztlenowych, umożliwia uzyskanie wyższej produkcji metanu oraz wodoru. Eksperymenty prowadzono w skali laboratoryjnej w warunkach statycznych. Czy podobnych rezultatów spodziewałby się Pan uzyskując prowadząc hodowlę półciąglą? Jak Pan ocenia możliwość implementacji w warunkach technicznych?
2. W publikacji nr 5 wskazano, że odpady kuchenne były gromadzone codziennie przez okres 5 miesięcy, a następnie były homogenizowane. W publikacji nie wspomina się o ich mrożeniu, co sugeruje czytelnikowi, że każdorazowa porcja odpadów była mielona i wykorzystywana do prowadzenia hodowli półciąglých. W tym kontekście zwraca uwagę bardzo niska wartość odchylenia standardowego podana w tabeli 1 dla wskaźników charakteryzujących jakość odpadów kuchennych. Z jaką częstotliwością prowadzono badania odpadów kuchennych? Proszę o doprecyzowanie sposobu pozyskiwania tego substratu. Czy faktycznie odpady kuchenne wprowadzane jako wsad do laboratoryjnych komór fermentacyjnych miały tak stabilną charakterystykę jak zaprezentowano w Tabeli 1?
3. W publikacji nr 5 zmiany takich wskaźników jak ilość produkowanego metanu, ilość produkowanego wodoru, stężenie lotnych kwasów tłuszczowych pokazano jako wartości średnie w kolejnych tygodniach prowadzenia hodowli. W mojej opinii dla analizy przebiegu procesu fermentacji metanowej lepszym sposobem byłoby przedstawienie wartości uzyskiwanych w poszczególnych dniach pomiarowych. Z czego wynikało takie podejście do prezentacji wyników? W pracy pojawia się również „średnia tygodniowa wartość pH”; wyciąganie wartości średniej w tym przypadku uważam za dyskusyjne.
4. We wniosku nr 2 Doktorant stwierdza, że „Optymalną temperaturą obróbki wstępnej trawy i liści jest 70°C”. Biorąc pod uwagę, że eksperymenty przeprowadzono tylko dla dwóch wartości temperatur tj. 70°C i 80°C, uważam, że nie dają one podstawy do wyciągnięcia takiego wniosku. Jakie kryteria przyjęto dla oceny, że dana temperatura jest optymalna?

5. W pracy wielokrotnie pojawiają się sformułowania typu „uzysk biogazu”, „wydajność metanu”, które wydają się być skrótem myślowym dla określenia wydajności produkcji biogazu/metanu.
6. Str. 18. Następujące zdanie: „W serii badawczej z użyciem inokulum obserwowano produkcję metanu oraz wodoru, wytwarzania biogazu z substratów rozcieńczonych jedynie wodą” jest niejasne.
7. Str. 24. Błędnie podano temperaturę prowadzenia procesu fermentacji metanowej („5°C”).
8. W tytule rozdziału 6.6 jako jeden z substratów wskazano liście, podczas gdy prace badawcze prowadzone były jedynie dla trawy i odpadów kuchennych.
9. W dysertacji zabrakło mi sprecyzowania dalszych kierunków badawczych.
10. W pracy wstępuje również kilka niedociągnięć edytorskich np. str. 7 „wytwarzany jest się biogaz”, str. 21 „głównie”, str. 24 „pomimo uzyskaniu”, str. 26 „jeded”, str. 30 „zidentyfikowano...bakterii z rodzaju”. Autor zamiennie jako separator dziesiętny stosuje przecinek i kropkę.

Podsumowując, stwierdzam, że oceniana praca doktorska posiada wysoki poziom merytoryczny oraz wnosi nowe elementy poznawcze w obszarze wytwarzania energii ze źródeł odnawialnych oraz w obszarze waloryzacji biomasy. Przedstawiony w dysertacji materiał badawczy jest spójny i wartościowy zarówno pod względem naukowym, jak i praktycznym. Dysertacja potwierdza znajomość ogólnej wiedzy teoretycznej Doktoranta w dyscyplinie nauki chemiczne, inżynieria chemiczna, technologia żywności i żywienia, a także umiejętność planowania i prowadzenia przez Niego badań naukowych, opracowania i dyskusji wyników oraz wyciągania wniosków.

**Tym samym oceniana rozprawa doktorska spełnia wymagania formalne dla tego typu prac zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Dlatego wnioskuję do Rady ds. Stopni Naukowych Politechniki Łódzkiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Przemysława Liczbińskiego do dalszego etapu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.**

*M. Sudar*