



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ
I ŚRODOWISKA



dr hab. inż. Eliza Kulbat
Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
ul. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk

Gdańsk, 05 sierpnia 2026 r.

RECENZJA

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Ćwiertniewicz-Wojciechowskiej
pt. Poprawa hydrolizy osadów ściekowych w celu intensyfikacji fermentacji metanowej**

Podstawa opracowania

Podstawą do opracowania niniejszej recenzji jest pismo otrzymane od prof. dr hab. Krzysztofa Labusa, Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej. Promotorem przedstawionej rozprawy doktorskiej jest prof. dr hab. Aleksandra Ziemińska-Buczyńska, a promotorem pomocniczym dr inż. Grzegorz Cema.

Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Magdaleny Ćwiertniewicz-Wojciechowskiej została przygotowana w formie cyklu pięciu jednotematycznych publikacji o sumie 190 punktów Ministerstwa Nauki i Edukacji i sumarycznej wartości Impact Factor wynoszącej 9,9. Należy jednak zauważyć, że dwie prace zostały przedstawione jako manuskrypty w trakcie recenzji i nie mogą zostać uwzględnione w powyższym podsumowaniu. Prace opublikowano w okresie 2023 – 2026 i w każdej z nich doktorantka jest pierwszą autorką. Jej udział procentowy wynosi w dwóch artykułach 80% i w trzech 70%, jest zatem znaczący. We wszystkich pracach wkład autorski Doktorantki obejmował konceptualizację badań, przeprowadzenie przeglądu literatury, przygotowanie manuskryptu roboczego, opracowanie graficzne, edycję oraz przygotowanie odpowiedzi dla recenzentów. Poniżej wymieniono prace wchodzące w skład rozprawy:

- I. **Ćwiertniewicz-Wojciechowska M., Cema G., Ziemińska-Buczyńska A., Sewage sludge pretreatment: current status and future prospects, Environmental Science and Pollution Research 2023, <https://doi.org/10.1007/s11356-023-28613-7>**

- II. **Ćwiertniewicz-Wojciechowska M.**, Cema G., Ziemińska-Buczyńska A., Cellulolytic fungi from sewage sludge and their potential to improve methane fermentation, Biomass Conversion and Bioraffinery 2026, <https://doi.org/10.1007/s13399-026-07082-1>
- III. **Ćwiertniewicz-Wojciechowska M.**, Wolny A., Jurczyk S., Cema G., Ziemińska-Buczyńska A., Enhancing methane production during anaerobic digestion of sewage sludge using enzymes produced by autochthonous microbial consortia, w trakcie recenzji
- IV. **Ćwiertniewicz-Wojciechowska M.**, Cema G., Ziemińska-Buczyńska A., Wpływ enzymów celulolitycznych na hydrolizę osadów ściekowych: Współczesne problemy ochrony środowiska i energetyki 2024, Gliwice, Politechnika Śląska, ISBN 978-964116-6-2
- V. **Ćwiertniewicz-Wojciechowska M.**, Wolny A., Cema G., Ziemińska-Buczyńska A., Comparative Enzymatic Pretreatment of Sewage Sludge: Physicochemical Parameters and Microbial Community Effects, w trakcie recenzji.

Wyszczególnione powyżej prace zostały omówione w 61-stronicowym autoreferacie podzielonym na 13 rozdziałów. Zawiera on również streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz cytowanej literatury oraz spis innych osiągnięć naukowych autorki. Rozdział pt. *Wprowadzenie* stanowi uzasadnienie podjęcia tematu, wskazując na celowość poszukiwania metod intensyfikacji degradacji celulozy, jako trudno rozkładalnego składnika komunalnych osadów ściekowych. W kolejnym rozdziale Doktorantka przedstawiła cel pracy, którym była *Ocena możliwości wykorzystania autochtonicznych mikroorganizmów celulolitycznych jako biologicznej metody obróbki wstępnej osadów ściekowych*. W mojej opinii, w tak sformułowanym celu pracy zabrakło sprecyzowania, że badania dotyczyły komunalnych osadów ściekowych. Autorka zaplanowała prace badawcze z podziałem na logiczne etapy, które pozwoliły na osiągnięcie następujących celów częściowych:

- 1) Izolacja celulolitycznych mikroorganizmów, zdolnych do efektywnej degradacji celulozy różnopostaciowej, w warunkach beztlenowych i temperaturze 37°C
- 2) Ocena właściwości celulolitycznych wyizolowanych mikroorganizmów.
- 3) Ocena możliwości przechowywania i ponownego wykorzystania wyizolowanych mikroorganizmów.
- 4) Ocena wpływu inokulacji osadów ściekowych za pomocą autochtonicznych mikroorganizmów celulolitycznych i/lub produkowanych przez nie enzymów na produkcję metanu.
- 5) Ocena wpływu obróbki osadów ściekowych wybranej metody biologicznej na parametry fizykochemiczne i stężenia EPS w badanym osadzie: porównanie krótko- i długotrwałego kontaktu.
- 6) Określenie wpływu obróbki osadów ściekowych za pomocą wybranej metody biologicznej na zbiorowisko mikroorganizmów obecne w badanym osadzie.

W tej części pracy brak jednak jasno określonej tezy pracy, pomimo stwierdzenia na stronie 19-tej, że realizacja ww. celów szczegółowych umożliwiła odpowiedź na hipotezę badawczą

postawioną w ramach prezentowanej rozprawy. Hipoteza badawcza jest wspomniana dopiero w rozdziale *Podsumowanie wyników badań przedstawionych w cyklu publikacji*. Metodyka badań została przedstawiona w odniesieniu do kolejnych publikacji, które stanowiły odzwierciedlenie etapów badań. Tak uporządkowany sposób opisu metodyki badań ułatwia czytelnikowi lekturę i należy tutaj docenić starania autorki o klarowność przekazu. Syntetyczna prezentacja treści poszczególnych publikacji zawarta w *Podsumowaniu...* stanowi najważniejszą część autoreferatu. Rozdział ten jest spójny, logiczny i pozwala na ocenę zakresu przeprowadzonych badań oraz prześledzenie najistotniejszych ustaleń. Doktorantka przedstawia je we *Wnioskach*, dodając również krótką część, w której omówiła możliwe kierunki kontynuacji badań.

Przedstawiony do oceny cykl publikacji otwiera **Manuskrypt I**, który jest obszerną pracą przeglądową. Zostały w niej scharakteryzowane metody wstępnej przeróbki komunalnych osadów ściekowych poprzedzające fermentację metanową. Doktorantka, jako lukę w istniejącym stanie wiedzy, wskazała brak weryfikacji zależności pomiędzy wpływem stosowanej metody a funkcjonowaniem społeczności mikroorganizmów prowadzących w osadzie fermentację metanową. Zwróciła również uwagę na niewielką liczbę publikacji analizujących wpływ metod biologicznych na intensyfikację procesu hydrolizy oraz produkcję metanu. Wykonany na podstawie 132 pozycji przegląd literatury jest obszerny, aktualny i w mojej ocenie stanowi znakomity wstęp do dalszych badań. W **Manuskrypcie II** opisano badania nad izolacją grzybów celulolitycznych z osadu ściekowego oraz zdolnością wyizolowanych mikroorganizmów do degradacji czystej celulozy. Oceniono również wpływ jednego z wyizolowanych grzybów z rodzaju *Aspergillus* na produkcję metanu i degradację celulozy podczas fermentacji osadów ściekowych w temperaturze 37°C, uzyskując 11% wzrost produkcji metanu i 6% wzrost degradacji celulozy. Kolejny etap badań, przedstawiony w **Manuskrypcie III**, obejmował wykorzystanie do degradacji celulozy enzymów produkowanych przez autochtoniczne bakterie celulolityczne. W tym celu wyizolowano z osadów i scharakteryzowano dwie czyste kultury bakterii celulolitycznych. Ustalono, że mrożenie i liofilizacja negatywnie wpływają na ich aktywność celulolityczną. Następnie przeprowadzono również badania porównujące wpływ enzymów izolowanych oraz wybranych enzymów dostępnych komercyjnie na intensyfikację produkcji metanu z uwzględnieniem stosowania enzymów nieimmobilizowanych oraz immobilizowanych na węglu aktywnym. Podano, że zastosowanie enzymów spowodowało wzrost produkcji metanu na poziomie 18,9% w przypadku enzymów immobilizowanych oraz 21,7% w przypadku enzymów nieimmobilizowanych, nie zaobserwowano jednak wpływu na degradację celulozy. W **Manuskrypcie IV** zaprezentowane zostały badania laboratoryjne krótkotrwałego wpływu dozowania enzymów izolowanych z pozyskanej hodowli bakterii oraz enzymów komercyjnych na stężenie lotnych kwasów tłuszczowych, chemicznego zapotrzebowania na tlen oraz polimerów zewnątrzkomórkowych. Zanotowano znaczący pozytywny wpływ na degradację substancji organicznej oraz poprawę hydrolizy badanych osadów. **Manuskrypt V** opisuje wpływ działania inokulacji osadów ściekowych izolowanymi i komercyjnymi enzymami immobilizowanymi i nieimmobilizowanymi na parametry fizykochemiczne osadu ściekowego podczas 15-dniowego testu określającego potencjał

metanowy badanych osadów. W badaniach uwzględniono stężenie azotu całkowitego, azotu amonowego, ChZT oraz LKT w pierwszym i ostatnim dniu testu. Wykazano, że zastosowana metoda immobilizacji enzymów na węglu aktywnym ma większe znaczenie, niż rodzaj zastosowanego enzymu. Przeprowadzono również analizę wpływu zastosowanych metod obróbki biologicznej osadów na obfitość występowania mikroorganizmów osadów ściekowych. Obliczono współczynniki korelacji Pearsona i na tej podstawie określono wysoką pozytywną korelację pomiędzy obfitością występowania zdecydowanej większości poszczególnych bakterii a stężeniem celulozy i objętością wyprodukowanego metanu w przypadku zastosowania immobilizowanej celulozy izolowanej.

Ocena zasadności podjęcia tematyki badawczej

Doktorantka podjęła w pracy temat możliwości zastosowania wybranej biologicznej metody obróbki wstępnej komunalnych osadów ściekowych. Zaproponowała wykorzystanie wyizolowanych z osadów ściekowych enzymów do intensyfikacji degradacji celulozy. Z wielu doniesień naukowych wynika, że celuloza stanowi istotny składnik ścieków, a więc również osadów ściekowych. Nie podlega więc dyskusji, że jako trudno rozkładalny polimer wpływa na proces fermentacji metanowej. Proces ten jest obecnie wykorzystywany do biologicznej stabilizacji osadów w większości dużych oczyszczalni ścieków w Polsce, umożliwiając produkcję biogazu, a więc przyczyniając się do poprawy bilansu energetycznego oczyszczalni ścieków oraz redukcji emisji gazów cieplarnianych. Poszukiwanie metod poprawy efektywności fermentacji metanowej polegających na skróceniu czasu procesu oraz zwiększeniu produkcji biogazu jest zatem w pełni uzasadnionym działaniem. Jest to tym bardziej aktualne zagadnienie, że zgodnie z zapisami nowej dyrektywy ściekowej oczyszczalnie zostały zobowiązane do poprawy efektywności oczyszczania ścieków, co w konsekwencji spowoduje wzrost ilości wytwarzanych osadów ściekowych.

Tematykę badawczą podjętą w pracy doktorskiej przez Panią mgr inż. Magdalenę Ćwiertniewicz-Wojciechowską uważam zatem za aktualną i w pełni uzasadnioną.

Uwagi ogólne i kwestie do dyskusji

Przedstawiona rozprawa doktorska jest pracą eksperymentalną. Zaplanowany i zrealizowany zakres badań jest obszerny, ale należy podkreślić, że został sprawnie omówiony w autoreferacie. Praca jest starannie opracowana pod względem edytorskim i zawiera tylko nieliczne drobne błędy niewpływające na jej jakość merytoryczną. Tym niemniej, podczas jej lektury zanotowałam kilka pytań, które w moim odczuciu stanowią punkt wyjścia do dyskusji;

- Na str. 14-tej autoreferatu autorka podaje, że osady ściekowe stanowią 1-3% objętości ścieków dopływających do oczyszczalni. Jakie założenia przyjęto do oszacowania tej proporcji?

- W rozdziale *Wprowadzenie* znajduje się również stwierdzenie, że stabilizacja ilości osadów ściekowych widoczna w statystykach po 2023 r. jest spowodowana wzrostem liczby oczyszczalni ścieków w Polsce dysponujących infrastrukturą pozwalającą na termiczną przeróbkę powstałych osadów ściekowych. Czy doktorantka mogłaby to wyjaśnić?
- W kilku miejscach w autoreferacie pojawia się zagadnienie możliwości zagospodarowania osadów ściekowych po procesie fermentacji, nie są natomiast przywołane obowiązujące regulacje prawne w tym zakresie. Kwestie te wymagają uporządkowania.
- Na stronie 16-tej autorka wymienia mechaniczne metody obróbki osadów ściekowych najczęściej wykorzystywane w oczyszczalniach ścieków, nie wspominając o celu ich stosowania. Odpowiednie zagęszczanie osadów ścieków jest niezbędnym procesem poprzedzającym fermentację metanową, wpływającym na jej efektywność. Chciałbym prosić o komentarz Doktorantki.
- Na stronie 17-tej autorka podaje, że jej badania cyt. „zakładają wykorzystanie biologicznych metod obróbki osadów ściekowych z pominięciem etapu wstępnej obróbki, który w praktyce może trwać nawet kilka tygodni”. Czy Doktorantka mogłaby to wyjaśnić?
- Doktorantka prowadziła badania z wykorzystaniem osadów ściekowych pochodzących – jak podaje – z oczyszczalni ścieków w Gliwicach, przy czym nie podaje ich charakterystyki, a informacje na ten temat są skrótowe. Czy i w jakim stopniu, rodzaj, uwodnienie i skład osadów może wpływać na proces izolowania mikroorganizmów oraz enzymów celulolitycznych? Czy Doktorantka mogłaby również ocenić ten wpływ w odniesieniu do badań degradacji celulozy, produkcji biogazu oraz parametrów analizowanych w badaniach przedstawionych w publikacji nr 5?
- W publikacji nr 4 podano, że do testów porcjowych wykorzystano osad wstępny zagęszczony grawitacyjnie w stosunku 65%:35%. Czy należy przyjąć, że 65% to uwodnienie tego osadu?
- W rozdziale pt. *Kontynuacja badań* Doktorantka stwierdza, że wyniki przeprowadzonych badań jednoznacznie wskazują na konieczność ich kontynuacji oraz rozszerzenia. Zauważa również, że eksperymenty realizowano w skali laboratoryjnej, co uzasadnia potrzebę przejścia do etapu badań w skali półtechnicznej. Zgadzam się z oceną Doktorantki i proszę o komentarz, jakie zagadnienia związane z takimi badaniami powinny zostać rozpoznane?
- Czy, zwłaszcza w kontekście proponowanych kierunków dalszych badań, Doktorantka mogłaby skomentować stwierdzenie (strona nr 38 autoreferatu) cyt. „badania przeprowadzone w ramach rozprawy doktorskiej pozwoliły na opracowanie metody intensyfikacji fermentacji metanowej z uwzględnieniem trudno rozkładalnego polimeru

jakim jest celuloza, która może stanowić uniwersalną metodę stosowaną w oczyszczalniach ścieków”?

Podsumowanie

Podjęta przez Doktorantkę tematyka badawcza jest aktualna i w pełni uzasadniona. Założony cel pracy został w mojej ocenie osiągnięty. Doktorantka dobrze poradziła sobie z zaplanowaniem i przeprowadzeniem trudnych badań łączących zagadnienia mikrobiologiczne i technologiczne, a w oparciu o ich wyniki przygotowała obszerne manuskrypty. Podsumowując całość badań sformułowała wnioski, z których do najważniejszych należą:

- Enzymatyczna obróbka osadów ściekowych, z wykorzystaniem mieszaniny enzymów izolowanych z mieszanej hodowli bakterii zdolnych do degradacji celulozy wpływa na intensyfikację produkcji metanu, degradacji celulozy i poprawę hydrolizy osadów ściekowych, prowadząc do możliwości skrócenia czasu potrzebnego na fermentację; Rozpoznanie tego zagadnienia uważam za **najważniejsze osiągnięcie naukowe rozprawy**.
- Zaszczepienie osadu ściekowego autochtonicznym celulolitycznym grzybem *Aspergillus terreus* pozwoliło na intensyfikację produkcji metanu w badanym osadzie o 11%;
- Wykorzystanie grzybów mikroskopowych o właściwościach celulolitycznych w postaci strzępek, jako biologicznej metody obróbki osadów ściekowych, wpływa na intensyfikację degradacji celulozy i potencjału metanowego tych osadów;
- Immobilizacja enzymów na węglu aktywnym stabilizuje ich działanie poprzez wydłużenie działania enzymów izolowanych i zmniejszenie intensywności działania w przypadku enzymów komercyjnych, zabezpieczając proces przed nadmiernym zakwaszaniem, na skutek zwiększonej produkcji LKT.

Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska świadczy o umiejętności Doktorantki prowadzenia studiów literaturowych, zaplanowania i zrealizowania badań oraz analizy wyników i formułowania wniosków. Doceniam również trafne wyznaczenie kierunków przyszłych badań. To wszystko potwierdza dojrzałość naukową Doktorantki. Stwierdzam zatem, że rozprawa doktorska Pani mgr inż. Magdaleny Ćwiertniewicz-Wojciechowskiej pt. **Poprawa hydrolizy osadów ściekowych w celu intensyfikacji fermentacji metanowej spełnia wymagania określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024 poz.1571, z późn. zm.)**. W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o dopuszczenie mgr inż. Magdaleny Ćwiertniewicz-Wojciechowskiej do publicznej obrony.

Podpisała Eliza Kulbat