



Instytut Gospodarki
Surowcami Mineralnymi
i Energią
Polskiej Akademii Nauk

Dr hab. Marzena Smol, prof. IGSMiE PAN
ul. Wybickiego 7a
31-261 Kraków

Kraków, 25.11.2024 r.

Recenzja

Rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Jachimowicza,
pt. „Mikroplastik w systemach oczyszczania ścieków - efektywność usuwania i
wpływ na przemiany biologiczne”
wykonanej pod kierunkiem Promotora
prof. dr hab. inż. Agnieszki Cydzik-Kwiatkowskiej
na Wydziale Geoinżynierii Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie

1. Podstawa prawna recenzji

Podstawą wykonania recenzji była Uchwała nr 35 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie z dnia 26 września 2024 r. przekazana pismem Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny prof. dr hab. inż. Marcina Dębskiego z dnia 10 października 2024 r. Dokumentacja została dostarczona w dniu 15 listopada 2024 r. Promotorem pracy jest prof. dr hab. inż. Agnieszka Cydzik-Kwiatkowska.

2. Ogólna charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Jachimowicza pt. „Mikroplastik w systemach oczyszczania ścieków - efektywność usuwania i wpływ na przemiany biologiczne” została wydana drukiem jako 37-stronicowe zwarte opracowanie przedstawiające opis cyklu powiązanych tematycznie artykułów składających się na rozprawę doktorską. Na cykl artykułów składają się cztery prace naukowe opublikowane w latach 2022-2024, w tym:

- [P1] Jachimowicz, P., Cydzik-Kwiatkowska, A. (2022). Coagulation and flocculation before primary clarification as efficient solutions for low-density microplastic removal from wastewater. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(20), 13013. (MEiN2022 = 140 pkt, IF = 4,53);
- [P2] Jachimowicz, P., Peng, R., Hüffer, T., Hofmann, T., Cydzik-Kwiatkowska, A. (2024). Tire materials disturb transformations of nitrogen compounds and affect the structure of biomass in aerobic granular sludge reactors. *Journal of Hazardous Materials*, 133223. (MNiSW2024 = 200 pkt, IF = 12,2);

- [P3] Jachimowicz, P., Mądzielewska, W., Cydzik-Kwiatkowska, A. (2024). Microplastics in granular sequencing batch reactors: impacts on pollutant removal dynamics and microbial community. *Journal of Hazardous Materials*, 476, 135061. (MNiSW2024 = 200 pkt, IF = 12,2);
- [P4] Jachimowicz, P., Nosek, D., Cydzik-Kwiatkowska, A. (2022). Chemical and microbiological changes on the surface of microplastic after long term exposition to different concentrations of ammonium in the environment. *Science of the Total Environment*, 830, 154784. (MEiN2022 = 200 pkt, IF = 10,94).

Przedłożone prace są wieloautorskie. W wszystkich tychże pracach, mgr inż. Jachimowicz jest pierwszym autorem, jednocześnie pełniąc funkcję autora do korespondencji. Prace te ukazały się w czasopiśmie recenzowanych o wysokim współczynniku wpływu. Do przedłożonego zbioru dołączone są oświadczenia wszystkich autorów, potwierdzające wiodącą rolę mgr inż. Jachimowicza w powstaniu tych prac.

Rozprawa doktorska przedstawia zwarty opis cyklu publikacji, przygotowany w języku polskim, podczas gdy wszystkie prace wchodzące w skład osiągnięcia opublikowane są w języku angielskim. W opisie cyklu publikacji uwzględniono następujące rozdziały: wykaz skrótów (str. 4-5), streszczenie w języku polskim (str. 6-7) i angielskim (str. 8-9), wstęp (str. 10-16), cel i zakres badań (str. 17), hipotezy badawcze (str. 18), materiały i metody badawcze (str. 19-23), podsumowanie wyników i weryfikacja hipotez badawczych (str. 24-28), podsumowanie i wnioski (str. 29), spis literatury (str. 30-36), spis rysunków (str. 37) i załączniki (str. 38). Numeracja rysunków jest ciągła. W spisie literatury znajduje się 76 pozycji literaturowych, w tym niemal wszystkie stanowią pozycje literatury zagranicznej, opublikowane w ostatnich latach, przytaczane także w publikacjach wchodzących w skład osiągnięcia [P1-P4]. Uwzględniając powyższe można stwierdzić, że układ pracy jest prawidłowy i zgodny z przyjętymi zasadami redagowania opisu cyklu powiązanych tematycznie artykułów.

Doktorant wskazuje że realizacja części badawczej otrzymała wsparcie finansowe w ramach projektów:

- Narodowe Centrum Nauki, projekt nr 2020/37/N/NZ9/02090 pt. „Wpływ stężenia i rodzaju mikroplastiku na efektywność oczyszczania i strukturę biomasy w reaktorach z tlenowym osadem granulowanym”, konkurs Preludium 19, kierownik projektu: mgr inż. Piotr Jachimowicz;
- Program Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Regionalna Inicjatywa Doskonałości”, 2019-2023, nr projektu 010/RID/2018/19, finansowanie otwartego dostępu do publikacji P1;
- Międzynarodowy program stypendialny Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) dla krajów Europy Środkowej i Środkowowschodniej, finansowanie 6-miesięcznego stażu naukowego (02.2020-08.2020) w Leibniz Institute of Polymer Research w Dreźnie;
- „PROM – międzynarodowa wymiana doktorantów i kadry akademickiej”, Narodowa Agencja Wymiany Akademickiej, finansowanie 21-dniowego wyjazdu badawczego (1-21.09.2021) w Uniwersytecie Wiedeńskim;

oczyszczania ścieków oraz mikrobiom w reaktorach z AGS [P2, P3]. W etapie trzecim dokonał oceny wpływu stężenia azotu amonowego w środowisku na rozwój mikroorganizmów zasiedlających powierzchnię mikroplastiku oraz zidentyfikował zagrożenia związane z mikroplastikiem jako wektorem zanieczyszczeń i mikroorganizmów patogennych [P4]. Rezultaty prac eksperymentalnych przeprowadzonych przez Doktoranta zostały opisane w czterech publikacjach naukowych [P1-P4] zawierających szczegółową analizę i interpretację wyników.

W rozdziale trzecim **Hipotezy badawcze** Doktorant wskazał trzy główne hipotezy, tj.

- H1: zastosowanie koagulantów oraz flokulantów wpływa na efektywność usunięcia mikroplastiku ze ścieków;
- H2: dawka oraz rodzaj mikroplastiku wpływają na efektywność oczyszczania ścieków oraz strukturę gatunkową i aktywność mikroorganizmów w AGS;
- H3: stężenie azotu amonowego w środowisku wpływa na skład gatunkowy mikroorganizmów zasiedlających powierzchnię mikroplastiku i potencjał metaboliczny mikrobiomu, w tym zdolność degradacji tworzyw sztucznych.

W rozdziale czwartym **Materiały i metody badawcze** Doktorant przedstawił opis metod badawczych i materiałów stosowanych w trzech etapach badań. Rozdział ten zawiera bardzo szczegółowy opis metod analitycznych, które pokrywają się z opisami przedstawionymi w cyklu powiązanych tematycznie artykułów składających się na rozprawę doktorską. W etapie I Doktorant analizował skuteczność usuwania MP ze ścieków przy zastosowaniu koagulantów i flokulantów, przy wykorzystaniu ścieków dopływające do osadnika wstępnego w oczyszczalni ścieków „Łyna” w Olsztynie. W etapie II określał wpływ mikroplastiku na procesy oczyszczania ścieków, wykorzystując próbki z Miejskiej Oczyszczalni Ścieków w Ornece. W etapie III badał rozwój mikroorganizmów na powierzchni mikroplastiku w zależności od stężenia azotu amonowego w środowisku, przy wykorzystaniu mikroplastiku uzyskanego w wyniku mielenia butelek PET pobranych z Zakładu Gospodarki Odpadami w Olsztynie.

W kolejnym rozdziale **Podsumowanie wyników i weryfikacja hipotez badawczych** Doktorant opisał wyniki poszczególnych etapów badań przedstawionych w cyklu powiązanych tematycznie artykułów składających się na rozprawę doktorską. Na podstawie przeprowadzonych badań, mgr inż. Jachimowicz w **etapie pierwszym** wykazał, że w osadniku wstępnym następuje skuteczne usuwanie mikroplastiku ze ścieków, a efektywność procesu wzrasta wraz z wielkością cząstek mikroplastiku. W **etapie drugim** potwierdził wpływ rodzaju mikroplastiku na jego deponowanie w AGS oraz przemiany związków organicznych, azotu i fosforu, które są kluczowe dla utrzymania wysokiej efektywności oczyszczania ścieków w reaktorze sekwencyjnym z tlenowym osadem granulowanym (GSBR). W **etapie trzecim** wykazał, że mikroplastik może być wektorem zanieczyszczeń i mikroorganizmów patogennych. Doktorant w tymże rozdziale odnosi się do każdej ze sformułowanych wcześniej hipotez.

Rozdział **Podsumowanie i wnioski** przedstawia podsumowanie wyników badań oraz kluczowe wnioski, tj.:

- osadniki wstępne mogą skutecznie usuwać mikroplastik dopływający ze ściekami do oczyszczalni, przy czym efektywność procesu wzrasta z wielkością cząsteczek



- Erasmus+, fundusze Unii Europejskiej, finansowanie 2-miesięcznego stażu naukowego (07.2022-08.2022) w Norwegian University of Life Sciences;
- Fundacja na Rzecz Nauki Polskiej, stypendium dla wybitnych młodych uczonych.

Aktywność naukowa mgr inż. Piotra Jachimowicza z pewnością zasługuje na pochwałę. Wg bazy Scopus, w dn. 25 listopada 2024 r. Jego dorobek składał się z 17 publikacji naukowych, które zostały zacytowane 385 razy. Indeks Hirscha Doktoranta wynosił 8. Publikacje, których współautorem jest mgr inż. Jachimowicz dotyczą nie tylko mikroplastiku, ale także innych zagadnień dotyczących inżynierii środowiska. Świadczy to o szerokich zainteresowaniach naukowych Doktoranta.

3. Ocena szczegółowa rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska mgr inż. Piotra Jachimowicza została zatytułowana „*Mikroplastik w systemach oczyszczania ścieków - efektywność usuwania i wpływ na przemiany biologiczne*”.

We **Wstępie** opisu cyklu publikacji Doktorant przedstawił problematykę zanieczyszczenia mikroplastikiem (MP) jako zagadnienie istotne z punktu widzenia inżynierii środowiska oraz konieczności poszukiwania lepszych metod ich zagospodarowania, nie wpływających negatywnie na środowisko. Pan Jachimowicz przedstawił definicję mikroplastiku, jednocześnie przytaczając źródła pochodzenia mikroplastiku w skali globalnej. Doktorant podkreślił także, że mikroplastik stanowi poważny problem w środowisku wodnym, w tym w ściekach komunalnych, przemysłowych i wodach powierzchniowych. Ponadto, wskazał że oczyszczalnie ścieków do tej pory były głównie projektowane w celu usunięcia związków organicznych, azotowych oraz fosforowych ze ścieków, natomiast nie przewidziano w nich usuwania takich mikrozanieczyszczeń jak mikroplastik. Rozdział ten przedstawia także opis metod usuwania mikroplastiku ze ścieków, ze szczególnym uwzględnieniem metod biologicznych, które stanowią główny obszar dalszych rozważań i badań. Doktorant podkreśla, że zrozumienie wpływu obecności mikroplastiku w ściekach na mikrobiom i strukturę tlenowego osadu granulowanego (AGS) może mieć kluczowe znaczenie dla utrzymania efektywnego oczyszczania ścieków. Doktorant we **Wstępie** wskazał także ogólnie zakres pracy doktorskiej, dotyczący analizy możliwości usuwania mikroplastiku ze ścieków oraz oceny oddziaływania mikroplastiku na procesy biologicznego oczyszczania ścieków.

W kolejnym rozdziale **Cel i zakres badań** Doktorant wymienia cele pracy. Głównym celem naukowym rozprawy doktorskiej było określenie efektywności usuwania mikroplastiku ze ścieków przy zastosowaniu flokulantów/koagulantów, oraz wpływu rodzaju i dawki mikroplastiku w ściekach na efektywność usuwania mikroplastiku i produktów jego degradacji, procesy biologicznego oczyszczania ścieków i mikrobiom w reaktorach z tlenowym osadem granulowanym. Ponadto, jako dodatkowy cel wskazał analizę wpływu stężenia związków azotowych w środowisku na rozwój mikroorganizmów zdolnych do kolonizacji powierzchni mikroplastiku. Zakres badań podzielony został na trzy etapy. W pierwszym etapie Doktorant określał wpływ dawki dostępnych na rynku flokulantów (Flopan EM 840, Praestrol k 255 I, Flocculant F 290) i koagulantów (PIX, PAX) na usuwanie mikroplastiku ze ścieków [P1]. W drugim etapie określał efektywność usuwania mikroplastiku z opon (TM) i produktów jego biodegradacji przez AGS [P2] oraz określał wpływ stężenia i rodzaju mikroplastiku (PET - politereftalan etylenu, PE - polietylen oraz TM) w ściekach dopływających na efektywność

mikroplastik; zastosowanie koagulantów i flokulantów znacząco wpływało na rozkład mikroplastiku w toni ścieków oraz skuteczność usuwania mikroplastiku [P1];

- usuwanie mikroplastik ze ścieków w GSBR zachodziło głównie w wyniku akumulacji mikroplastiku w biomasie; najlepiej akumulowany był TM [P2, P3];
- dawka i rodzaj mikroplastik wpływały na efektywność usuwania związków azotu i fosforu ze ścieków [P2, P3];
- obecność mikroplastik w ściekach wpływała na aktywność i strukturę mikrobiologiczną AGS [P2, P3];
- mikrobiom AGS efektywnie degradował zanieczyszczenia wypłukiwane z TM [P2];
- długa ekspozycja mikroplastiku na wysokie stężenie azotu amonowego powodowała zmiany morfologiczne oraz chemiczne powierzchni mikroplastiku, świadczące o jego degradacji [P4];
- stężenie azotu amonowego w środowisku wpływało na mikrobiom zasiedlający powierzchnię mikroplastiku [P4];
- na powierzchni mikroplastik rozwijają się mikroorganizmy potencjalnie patogenne, więc mikroplastik może służyć jako wektor zanieczyszczeń [P4].

Analizując treść pracy, opis wyników i wnioski można stwierdzić, że hipotezy zostały potwierdzone, a cele osiągnięte i udokumentowane wynikami badań. Tematyka badań wpisuje się w zakres inżynierii środowiska w obszarze usuwania wybranych mikrozanieczyszczeń ze środowiska wodnego. Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska potwierdza ogólną wiedzę teoretyczną i praktyczną Doktoranta w tym zakresie. Prezentowane w rozprawie doktorskiej rezultaty prac, w szczególności metody i mechanizmy usuwania mikroplastiku ze ścieków mają niewątpliwie oryginalny charakter. Uzyskany materiał badawczy pozwala na stwierdzenie, że cel oraz zakres recenzowanej rozprawy zostały w całości zrealizowane. Zaprezentowane w rozprawie rezultaty wnoszą znaczący wkład poznawczy w dziedzinie nauk inżynieryjno - technicznych, w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

4. Uwagi merytoryczne i zagadnienia do wyjaśnienia

Usuwanie mikroplastiku ze ścieków jest wyzwaniem, które staje się coraz bardziej istotne w kontekście ochrony środowiska. W ostatnich latach bardzo dynamicznie rozwijają się różne metody usuwania mikroplastiku ze środowiska wodnego, w tym np. w procesach filtracji, koagulacji, flokulacji, metody biologiczne i inne. Proszę o wskazanie kryteriów doboru wybranych koagulantów (PIX, PAX) i flokulantów (Flopam EM 840, Praestrol k 255 1, Flocculant F 290) do usuwania mikroplastiku ze ścieków, wskazania wad i zalet stosowania.

Usuwanie mikroplastiku ze ścieków jest coraz ważniejszym elementem polityki środowiskowej, szczególnie w kontekście ochrony zasobów wodnych, zdrowia publicznego oraz bioróżnorodności. Przedstawione do oceny prace stanowią szczegółowe analizy kontekstu inżynieryjnego. Proszę jednak przedstawić jak zakres prowadzonych badań wpisuje się w obecne kierunki polityki środowiskowej Unii Europejskiej oraz Polski, a także wskazać jak przedstawione wyniki mogą wpływać na dalsze trendy w zakresie inżynieryjno-technicznym oraz nowych modeli biznesu w oczyszczalniach ścieków.

Mikroplastik w wodzie staje się obszarem, na którym rozwijają się różne mikroorganizmy. Zjawisko to jest znane jako biofilmowanie, czyli proces, w którym mikroorganizmy osiedlają

się i rosną na powierzchni stałych materiałów, w tym na plastikowych cząstkach. Ponieważ mikroplastik może przez długi czas utrzymywać się w środowisku wodnym, staje się on dla wielu mikroorganizmów stabilnym substratem do życia. Na jego powierzchni rozwija się złożona społeczność mikroorganizmów, która może obejmować zarówno mikroorganizmy neutralne, jak i patogenne. Proszę rozwinąć dalsze możliwości potencjalnego zastosowania tych właściwości mikroplastiku, w kontekście usuwania zanieczyszczeń patogennych ze środowiska wodnego w skali krajowej i globalnej.

Doktorant wskazuje, że realizacja rozprawy doktorskiej była rezultatem wsparcia finansowego w ramach projektów przytoczonych na stronie drugiej rozprawy doktorskiej. Z przedstawionych publikacji wynika że praca [P1] powstała w ramach Programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Regionalna Inicjatywa Doskonałości”, 2019-2023, nr projektu 010/RID/2018/19 - finansowanie otwartego dostępu do publikacji. Prace [P2] i [P3] zawierają informacje o wsparciu w ramach stypendium dla wybitnych młodych uczonych Fundacji na Rzecz Nauki Polskiej oraz projektu nr 2020/37/N/NZ9/02090 pt. „Wpływ stężenia i rodzaju mikroplastiku na efektywność oczyszczania i strukturę biomasy w reaktorach z tlenowym osadem granulowanym” (Preludium, Narodowe Centrum Nauki). Praca [P4] również powstała w ramach projektu nr 2020/37/N/NZ9/02090. Proszę o wskazanie odpowiednich części niniejszej pracy, które powstały w ramach pozostałych przytoczonych inicjatyw, tj.: i) Międzynarodowy program stypendialny Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) dla krajów Europy Środkowej i Środkowowschodniej; ii) „PROM – międzynarodowa wymiana doktorantów i kadry akademickiej”, Narodowa Agencja Wymiany Akademickiej; iii) Erasmus+, fundusze Unii Europejskiej.

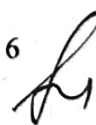
Jednym z podstawowych ograniczeń stosowania nowych metod usuwania mikrozanieczyszczeń ze ścieków są wysokie koszty inwestycyjne oraz operacyjne takich rozwiązań. Czy prowadzone były badania, lub są planowane w zakresie oceny kosztów wdrażania opracowanych metod w ramach niniejszej rozprawy doktorskiej. Ponadto, czy realizowane były, lub są planowane, badania dotyczące potencjalnego wpływu na środowisko z wykorzystaniem powszechnie stosowanych metod, np. oceny cyklu życia.

Proszę przedstawić dalsze możliwości wykorzystania rezultatów otrzymanych w niniejszej pracy w praktyce w kontekście możliwej współpracy z obiektami zainteresowanymi wynikami badań.

5. Uwagi redakcyjne i edycyjne

Całość tekstu opisu publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej oceniam bardzo wysoko. Doktorant starannie przygotował zarówno tekst, jak i rysunki. Publikacje naukowe [P1-P4] składające się na rozprawę doktorską są opublikowane w latach 2022-2024, zgodnie z wytycznymi redakcyjnymi czasopism *International Journal of Environmental Research and Public Health*, *Journal of Hazardous Materials* oraz *Science of the Total Environment*.

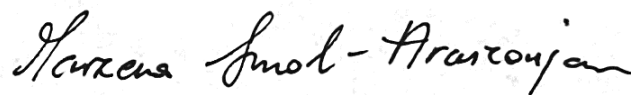
W pracach naukowych rekomenduje się stosowanie jednostek układu SI. Podstawową jednostką miary objętości w układzie SI jest metr sześcienny [m³] podczas gdy w rękopisie Doktorant stosuje jednostkę pochodną metra, co prawda dopuszczoną do stosowania, ale nie należącą do układu SI [1].



6. Wniosek końcowy

Podsumowując, należy stwierdzić, że recenzowana praca spełnia warunki prawne określone dla rozpraw doktorskich (Dz. U z 2018r. poz.1668). Rozprawa doktorska powinna stanowić oryginalne rozwiązanie problemu oraz potwierdzać umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Pracę oceniam pozytywnie, gdyż przedstawione informacje literaturowe oraz prezentacja i dyskusja wyników potwierdzają szeroką wiedzę teoretyczną i praktyczną Doktoranta, a prawidłowo zaplanowany i zrealizowany zakres pracy - potwierdzony osiągnięciem zamierzonych celów i weryfikacją hipotez badawczych - świadczą o umiejętności samodzielnego prowadzenia badań. Niewątpliwie niniejsza rozprawa doktorska stanowi oryginalne i ważne osiągnięcie naukowe mgr inż. Piotra Jachimowicza.

Biorąc pod uwagę przedstawione powyżej argumenty wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwa i Energetyki Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie o dopuszczenie mgr inż. Piotra Jachimowicza do dalszego postępowania kwalifikacyjnego przewidzianego w procedurze do uzyskania stopnia doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Ponadto, z uwagi na bardzo ambitny zakres badań, który został w pełni zrealizowany, a także doskonały poziom merytoryczny zrealizowanych badań opublikowanych w renomowanych czasopismach o zasięgu międzynarodowym, wnioskuję o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Piotra Jachimowicza. Głęboko wierzę, że jest to wybitny Młody Naukowiec, który w pełni zasługuje na wyróżnienie swoich ambitnych osiągnięć.



.....
(podpis)