

dr hab. inż. Izabel Kruszelnicka, prof. PP

Poznań, 10.12.2024 r.

Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki

Instytut Inżynierii Środowiska i Instalacji Budowlanych

Zakład Zaopatrzenia w Wodę i Biogospodarki

Politechnika Poznańska

ul. Berdychowo 4

60-965 Poznań

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Olgi Zajęc

pt. „Analiza wpływu naprzemiennego napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nitryfikacji w reaktorach ze złożem ruchomym”

Promotor: dr hab. inż. Monika Żubrowska - Sudół

1. Przedmiot recenzji i podstawa jej opracowania

Recenzję opracowano na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej nr 90/II/2024 z 15 października 2024 r. Opinię wykonano zgodnie z obowiązującymi aktami prawnymi na podstawie dostarczonych dokumentów (monografii podsumowującej w której znalazły się: wykaz opublikowanych prac naukowych, oświadczenia współautorów publikacji, kopie publikacji z cyklu rozprawy doktorskiej wraz z materiałami dodatkowymi stanowiącymi integralną część publikacji).

Przedstawiona do recenzji rozprawa ma formę zbioru monotematycznych publikacji opublikowanych w języku angielskim. Wydana została jako opracowanie monograficzne zawierające przedmiotowe sześć publikacji wraz z wprowadzeniem, streszczeniami (polskim i angielskim), opisami zakresu i celów badań, a także omówieniem całokształtu dorobku naukowego Doktorantki. Dołączone są również konsekwentnie oświadczenia współautorów publikacji. W efekcie publikacja jest połączeniem monografii z dokumentacją faktów wymaganą w przewodzie doktorskim.

Przedstawiony cykl publikacji pod tytułem „Analiza wpływu naprzemiennego napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nitryfikacji w reaktorach ze złożem ruchomym” jest w mojej ocenie jednoznacznie monotematyczny i spełnia wymogi

stawiane w tym zakresie przez Ustawę i Regulamin Rady Dyscypliny. Wszystkie czasopisma posiadają impact factor (od 1,00 do 9,70) oraz są wymieniane na liście czasopism punktowanych MEiN (jedna pozycja 70 pkt., trzy za 100 pkt. i dwie odpowiednio 140 punktów). Poziom czasopism, w których opublikowano prace z cyklu, nie wymaga dodatkowego komentarza. Prace zostały rozpowszechnione w międzynarodowym środowisku naukowym, w czasopismach o szerokim zasięgu. Tematyka rozprawy jest bardzo aktualna, daje to Autorce pewien komfort badawczy, albowiem stan wiedzy w tym zakresie jest jeszcze ciągle w fazie kumulowania faktów i szczegółów badawczych.

Wybrany dorobek publikacyjny obejmuje prace, które ukazały się w latach 2022-2024. Artykuły zamieszczone w monotematycznym cyklu prac doktorskich opublikowane zostały w czasopismach z dziedziny inżynierii środowiska. Są to pozycje znajdujące się na łamach periodyków bazy Journal Citation Report (JCR): *Water* [P1][P2], *Journal of Environmental Science and Technology* [P3], *Bioresource Technology* [P4], *Desalination and Water Treatment* [P5] oraz *Journal of Water Process Engineering* [P6]. Łączna punktacja prac wchodzących w skład zbioru opublikowanych i powiązanych tematycznie artykułów naukowych zgodnie z rokiem opublikowania wynosi wg listy czasopism punktowanych MNiSW – 610 punktów, natomiast $\sum IF=26,40$. W ocenianym zbiorze zidentyfikowałam cztery prace czteroautorские [P1, P2, P5, P6], jedna dwuautorскую [P3] oraz jedną pracę trzyautorскую [P4]. W każdej z wymienionych prac Pan mgr inż. Olga Zajac jest pierwszym autorem. W dokumentacji znajdują się komplementarne oświadczenia Doktorantki i wszystkich współautorów. Wynika z nich, że Jej wkład własny oscylował między 60 a 70% i obejmował przede wszystkim: opracowanie metodyk badań technologicznych, fizykochemicznych i mikrobiologicznych, wykonanie eksperymentów, opracowanie i interpretację wyników oraz przygotowanie tekstu manuskryptów. Dobór oryginalnych publikacji do zwięzłego cyklu, pod wspólnym tytułem „Analiza wpływu naprzemiennego napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nityfikacji w reaktorach ze złożem ruchomym”, uważam za prawidłowy i uzasadniony. Prace Doktorantki wpisują się właśnie w ten nurt badań.

Z uwagi na aktualność zagadnienia, niezwykle istotne było określenie czynników wpływających na obecność bakterii Comammox w systemach oczyszczania ścieków, zwłaszcza tych wykorzystujących nowe procesy, takie jak deamonifikacja lub skrócona nityfikacja denityfikacja poprzez azotyny (tzw. "nitrite shunt"). Nadmierny rozwój bakterii Comammox w tego typu układach, może w krótkim czasie doprowadzić do całkowitej destabilizacji układu, a w rezultacie całkowitego zahamowania procesów nityfikacji oraz

deamonifikacji. Skuteczna inhibicja bakterii utleniających azotyny stanowi jedno z największych wyzwań wśród wielu zespołów badawczych. Do głównych czynników mających inhibitujący wpływ na rozwój bakterii utleniających azotyny możemy zaliczyć wysokie stężenie wolnego amoniaku (NH_3), temperaturę, pH, stężenie tlenu rozpuszczonego oraz czas zatrzymania w reaktorze.

Przedmiotem dysertacji była właśnie analiza przebiegu i efektywności procesu nitryfikacji w sekwencyjnych reaktorach porcjowych ze złożem ruchomym, ze szczególnym uwzględnieniem wpływu strategii napowietrzania (zdefiniowanej stosunkiem czasu trwania podfaz bez i z napowietrzaniem oraz stężeniem tlenu) i formy, w jakiej biomasa rozwija się w reaktorach (błona biologiczna, osad czynny).

W pracy Doktorantka zdefiniowała następujące cele cząstkowe:

- 1) analizę wpływu strategii napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nitryfikacji, przy uwzględnieniu różnych konfiguracji pracy reaktorów ze złożem ruchomym (czysta i hybrydowa);**
- 2) określenie wpływu wykształcenia biomasy w postaci osadu czynnego w reaktorze pracującym w czystej technologii złoża ruchomego na efektywność oczyszczania ścieków;**
- 3) analizę wpływu różnych wariantów strategii napowietrzania na zużycie energii elektrycznej na napowietrzanie;**
- 4) określenie wpływu temperatury na szybkość poszczególnych etapów procesu nitryfikacji;**
- 5) analizę przebiegu i efektywności procesu nitryfikacji podczas przekształcenia hybrydowego reaktora ze złożem ruchomym do zintegrowanego usuwania związków C, N i P na nitryfikacyjny reaktor pracujący w czystej technologii złoża ruchomego w warunkach ciągu bocznego.**

Realizacja celów badawczych miała zaowocować weryfikacją bardzo konkretnych hipotez badawczych dotyczących wpływu procesu naprzemiennego napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nitryfikacji w reaktorach ze złożem ruchomym.

Publikacje złożone w cykl dokumentują realizację założonych celów badawczych. Ponieważ zostały one wydane w recenzowanych czasopismach, czuję się zwolniona z konieczności ich szczegółowej recenzji, a oceniam jedynie ich spójność i wartość w kontekście tychże założonych celów. Ewentualne uwagi traktuję jako niezbędny element dyskusji naukowej. Bardzo wysoko oceniam całościowy plan badawczy zrealizowany w toku prac nad doktoratem Pani Olgi Zajac. Te kilkuletnie prace przyniosły wartościowe wyniki, które w istotny sposób przyczyniły się do zwiększenia poziomu wiedzy w podjętym

temacie. Praca powstała w wyniku przemyślanych badań, będących konsekwentną realizacją projektów badawczych, od OPUS 14 (Identyfikacja, charakterystyka i modelowanie procesu COMAMMOX - nowego ogniwa w obiegu azotu w układach oczyszczania ścieków 2017/27/B/NZ9/01039, OPUS 14, NCN), grant dziekański (Analiza wpływu konfiguracji technologicznej sekwencyjnego reaktora porcjowego na przebieg i efektywność procesu nitryfikacji” grant dziekański nr 504/04613) i grant dla pracowników Politechniki Warszawskiej (Wpływ naprzemiennego napowietrzania na aktywność i liczebność poszczególnych grup mikroorganizmów nityfikacyjnych rozwijających się w hybrydowym reaktorze z nityfikacją/denitryfikacją). Udział w nich, z oczywistych względów Doktorantka zawdzięcza aktywności Pani Promotor dr hab. inż. Monika Żubrowska – Sudoł, prof. uczelni. Doktorantka jednak w pełni wykorzystwała stworzone możliwości, co przełożyło się na przygotowanie publikacji i ostatecznie dysertacji, Należy podkreślić, że układ i zakres prac badawczych został dobrze zaplanowany i zrealizowany. Publikacje przedstawione w cyklu potwierdzają zrealizowanie założonych celów badawczych, są bardzo dobrze i starannie przygotowane, zawierają przejrzystą, właściwie dobraną do prezentowania określonego typu wyników dokumentację graficzną. Publikacje zawierają również obszerne materiały uzupełniające, co stanowi ich integralną część.

Podobnie wysoką jakością jak publikacje odznacza się monografia wprowadzająca. Autorka potrafiła w niej w bardzo przystępnej, syntetycznej formie przedstawić całość zagadnienia, naświetlić cele i przebieg badań oraz podkreślić ważność uzyskanych wyników, wskazując na wkład w badania podstawowe jak i w rozwój technologii oczyszczania ścieków. Monografia składa się z 9 rozdziałów: w tym wykazu publikacji wchodzących w skład rozprawy doktorskiej - rozdział 1, opisu przedmiotu pracy - rozdział 2, wprowadzenia literaturowego - rozdział 3, opisu metodyki badawczej - rozdział 4, omówienia zagadnień badawczych - rozdział 5, wniosków w rozdziale 6, spisu bibliografii w rozdziale 7, spisu tabel (rozdział 8) spisu rysunków i zdjęć (rozdział 9), streszczenia w języku polskim i angielskim oraz spisu ważniejszych skrótów i załączonych publikacji stanowiących rozprawę doktorską.

Wprowadzenie obejmuje podstawowe informacje na temat wyzwań w zakresie oczyszczania ścieków. W dalszych rozdziałach mgr inż. Olga Zając omawia podstawowe zagadnienia dotyczące:

- technologii złoża ruchomego (historię, rodzaje nośników, podział reaktorów ich zalety i wady),
- podstaw procesu nityfikacji (czynniki wpływające na przebieg i efektywności procesu nityfikacji),

- strategii napowietrzania i ich znaczenia dla efektywnej nitrifikacji i redukcji zużycia energii w oczyszczalniach ścieków,
- oraz tematów związanych ze zużyciem energii elektrycznej na realizację procesu napowietrzania.

W rozdziale 4 „Metodyka badań” Doktorantka przybliżyła koncepcję realizacji pracy badawczej, charakterystykę stanowisk badawczych i zastosowanego złoza ruchomego oraz wykorzystane metodyki analityczne i obliczeniowe. W rozdziale 5 znalazło się dokładne omówienie pięciu założonych zagadnień badawczych, a w rozdziale 6 syntetyczne wnioski i opis przyszłych planów badawczych. Ta charakterystyka jest napisana jasno i świetnie zilustrowana (przejrzyste tabele i schematy), co pozwala nawet osobie do tej pory niezaznajomionej z tematem uzyskać najważniejsze informacje.

Poszczególne rozdziały pracy są logicznie ułożone i stanowią kompleksową całość. W tej części zacytowano aż 209 pozycji literaturowych, co świadczy o ogromie pracy wykonanej przez Doktorantkę w zakresie przeglądu najnowszej literatury.

Reasumując recenzowana rozprawa doktorska jest kompleksowym opracowaniem, którego niewątpliwymi osiągnięciami są:

1. Dokonanie oceny wpływu strategii napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nitrifikacji przy uwzględnieniu różnych konfiguracji pracy reaktorów ze złożem ruchomym. W pracy przeanalizowano dwa warianty technologii złoza ruchomego: czystą (MBSBBR) i hybrydową (IFAS-MBSBBR). Wyniki badań dotyczące pierwszego z wymienionych wariantów zaprezentowano w publikacji pt.: *„Effect of the Aeration Strategy on NOB Suppression in Activated Sludge and Biofilm in a Hybrid Reactor with Nitrification/Denitrification”* (Water, 2024 - P1). Natomiast hybrydowej technologii złoza ruchomego poświęcono dwie następujące prace: *„Effect of the Aeration Strategy on NOB Suppression in Activated Sludge and Biofilm in a Hybrid Reactor with Nitrification/Denitrification”* (Water, 2022-P2) oraz *„Nitrification kinetics, N₂O emission, and energy use in intermittently aerated hybrid reactor under different organic loading rates”* (International Journal of Environmental Science and Technology, 2023-P3).

2. Poznanie wpływu zmiany formy w jakiej w sekwencyjnym reaktorze porcjowym ze złożem ruchomym rozwija się biomasa na efektywność oczyszczania ścieków opisano w artykule pt.: *„Enhancing wastewater treatment efficiency: A hybrid technology perspective with energy-saving strategies”* opublikowanym w czasopiśmie Bioresource Technology (2024-P4). Uzyskane wyniki wskazywały na potencjał hybrydowych

reaktorów ze złożem ruchomym jako rozwiązań pozwalających na zwiększenie efektywności biologicznego oczyszczania ścieków. Doktorantka wykazała, że jednocześnie występowanie biofilmu i osadu czynnego w jednym reaktorze sprzyja wzrostowi bakterii autotroficznych i heterotroficznych, co prowadzi do intensyfikacji usuwania azotu i fosforu oraz skutecznej eliminacji związków węgla organicznego. Udokumentowano również, że strategia napowietrzania realizowana przy założeniu, że czas trwania podfaz z napowietrzaniem będzie dwukrotnie niższy niż ten bez napowietrzania może w znacznym stopniu zwiększyć aktywność bakterii nitryfikacyjnych rozwijających się w postaci kłaczków osadu czynnego i biofilmu prowadząc jednocześnie do znacznego skrócenia czasu trwania podfaz z napowietrzaniem.

3. Udowodnienie, że zarówno hybrydowa technologia złoża ruchomego, jak i odpowiednie modyfikacje strategii napowietrzania, prowadzą do znaczących oszczędności energetycznych. Uzyskane wyniki wskazują na wysoki potencjał systemów hybrydowych w kontekście zrównoważonego zarządzania zasobami energetycznymi. Wyniki badań opisano w publikacjach: „*Nitrification kinetics, N₂O emission, and energy use in intermittently aerated hybrid reactor under different organic loading rates*” (International Journal of Environmental Science and Technology, 2023-P3) oraz „*Enhancing wastewater treatment efficiency: A hybrid technology perspective with energy-saving strategies*” (Bioresource Technology, 2024-P4).

4. Zbadanie i opisanie wpływu temperatury na szybkość poszczególnych etapów procesu nitryfikacji, tj. utleniania azotu amonowego i utleniania azotu azotynowego oraz wyznaczenie współczynnika korekcji temperatury dla reaktora hybrydowego, który może znaleźć praktyczne zastosowanie w projektowaniu i optymalizacji hybrydowych systemów oczyszczania ścieków, umożliwiając precyzyjne dostosowanie do zmiennych warunków termicznych. Zostało to szczegółowo opisane w artykule pt.: „*Activated sludge vs. biofilm-effect of temperature on ammonia and nitrite oxidation rate in the hybrid reactor*” opublikowanym w czasopiśmie Desalination and Water Treatment (2023-P5).

Na szczególne podkreślenie w rozprawie doktorskiej mgr inż. Olgi Zajac zasługuje, również:

- ocena roli bakterii COMAMMOX w reaktorach ze złożem ruchomym w procesie nitryfikacji
- opisanie czynników mających istotny wpływ na liczebność bakterii COMAMMOX – czyli między innymi wpływ zmiany strategii napowietrzania, obniżenia stężenia tlenu, eliminacji związków organicznych ze ścieków doprowadzanych do reaktora, przejścia z warunków

symulujących główny ciąg technologiczny oczyszczania ścieków na warunki symulujące ciąg boczny.

Wyniki opisane w recenzowanej rozprawie doktorskiej mają znaczący wkład w opisie wpływu naprzemiennego napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nityfikacji w reaktorach ze złożem ruchomym. Są niezwykle istotne z punktu widzenia poznawczego i aplikacyjnego.

Przy lekturze rozprawy doktorskiej mgr inż. Olgi Zając nasunęły się pytania:

- 1. Proszę o wyjaśnienie dlaczego Doktorantka zdecydowała się na wykorzystywane nośników EvU-Pearl® (EvU Innovative Umwelttechnik GmbH, Gröditz, Niemcy) do wypełnienia złoża ruchomego?**
- 2. Proszę Doktorantkę o dyskusję i wyjaśnienie w jaki sposób pobierano reprezentatywne próbki do badań mikrobiologicznych (w jaki sposób wykonywano wymazy) i proszę o skrótowe omówienie metodyki badań metagenomicznych, które obejmowały sekwencjonowanie nowej generacji (NGS) oraz analizę statystyczną danych metagenomicznych.**
- 3. Czy oceniono stan kształtek EvU-Pearl® (nośników) po zakończeniu badań? Wykazując w ten sposób na ich trwałość – nie znalazłam takiej informacji – proszę o wyjaśnienie?**
- 4. Na jakich wytycznych Doktorantka wzorowała się przy wyborze strategii napowietrzania definiowanej poprzez stosunek czasu trwania podfaz bez napowietrzania (t_2) do podfaz z napowietrzaniem (t)- $R=t_2/t_1$ oraz stężenie tlenu (DO) w podfazach z napowietrzaniem – proszę o wyjaśnienie.**
- 5. Wzrost standardów oczyszczania ścieków obserwowany w ostatnim czasie powoduje dalsze zwiększenie zapotrzebowania na energię. W czasie eksploatacji oczyszczalni ścieków celowe staje się więc poszukiwanie optymalnych parametrów pracy poszczególnych obiektów lub urządzeń przy zachowaniu wymagań prawnych w zakresie ścieków oczyszczonych, które mogą zapewniać zmniejszenie zużycia energii elektrycznej. Efektem takich działań będzie redukcja kosztów oczyszczania ścieków. Prostem rozwiązaniem jest właśnie proponowana przez Doktorantkę zmiana sposobu napowietrzania lub w mojej ocenie wyposażenie komór osadu czynnego w nowoczesny, inteligentny system sterowania – czy taka analiza techniczno - ekonomiczna była w zamyśle Doktorantki – proszę o dyskusję.**
- 6. Proszę o dyskusję na jakim poziomie gotowości technologicznej (TRL) są prowadzone przez Panią badania? Proszę o odpowiedź, jak daleko od wdrożenia jest dana innowacja? To informacja, która jest ważna dla potencjalnego inwestora. Bardzo często, by starać się**

o dofinansowanie na transfer technologii konieczne jest osiągnięcie konkretnego poziomu gotowości technologicznej. Dlatego proszę o dyskusje na ten temat.

Moje pytania mają charakter dyskusyjny. Oczekuję, że staną się one przedmiotem dojrzałych, przemyślanych i rzeczowych odpowiedzi Doktorantki podczas publicznej obrony pracy.

Warto podkreślić, że na wyróżnienie zasługuje wysoka jakość opublikowanych prac będących podstawą rozprawy doktorskiej, która wskazuje, na to, że Doktorantka doskonale opanowała dodatkowe techniki mikrobiologiczne, biotechnologiczne a stosując je w pełni wywiązała się z zadań, jakie zostały postawione w celu pracy.

Recenzowana praca napisana została w sposób wskazujący na dużą wiedzę teoretyczną i praktyczną, dążenie do rozwiązywania problemów o charakterze aplikacyjnym oraz umiejętność interpretacji wyników, ich syntetycznego przedstawienia oraz wnikliwą, twórczą dyskusję. Rozprawa doktorska mgr inż. Olgi Zając jest opracowaniem spełniającym wszystkie warunki wymagane odpowiednią ustawą dla dysertacji doktorskich.

Wniosek końcowy

Uważam, że przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska spełnia wymagania zawarte w ustawie z dnia 20-07-2018 Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dziennik Ustaw 2018 poz. 1668 z późniejszymi zmianami) tj. stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego a doktorantka wykazała się ogólną wiedzą teoretyczną w dyscyplinie naukowej „inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka” oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Recenzowana rozprawa doktorska mgr inż. Olgi Zając prezentuje interesujące i cenne wyniki badań o walorach poznawczych i dużym potencjale aplikacyjnym. Wybrana tematyka, warsztat pracy Doktorantki w tym zgłębienie metod analitycznych, zaplanowany i przeprowadzany zakres doświadczeń, ich opis oraz wnioski są poprawne i na bardzo dobrym poziomie merytorycznym. W związku z powyższym wnioskuję do Rady Dyscypliny Inżynierii Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej o dopuszczenie mgr inż. Olgi Zając do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Oceniana praca reprezentuje wysoki poziom merytoryczny i jest dobrze opracowana pod względem edytorskim, zatem w zależności od przebiegu publicznej obrony rozważam wniosek o wyróżnienie rozprawy.

10.12.2024
