

Lublin, dnia 12.12.2024 r.

prof. dr hab. Krzysztof Józwiakowski
Katedra Inżynierii Środowiska
Uniwersytet Przyrodniczy w Lublinie
ul. Leszczyńskiego 7, 20-069 Lublin
tel./fax. 81 53 206 44
e-mail: krzysztof.jozwiakowski@up.lublin.pl

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Olgi Zając
pt. „Analiza wpływu naprzemiennego napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nityfikacji w reaktorach ze złożem ruchomym”

1. Podstawa opracowania

Zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej – Pana prof. dr hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego z dnia 17.10.2024 r.

2. Ogólne omówienie rozprawy

Podjęty temat rozprawy doktorskiej mgr inż. Olgi Zając, dotyczący analizy wpływu naprzemiennego napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nityfikacji w reaktorach ze złożem ruchomym jest bardzo ważnym zagadnieniem w inżynierii środowiska. Szczególne znaczenie w tym zakresie mają prace eksperymentalne, które pozwalają na wybór najskuteczniejszych technologii oczyszczania ścieków ze związków biogenych. W przypadku ocenianej rozprawy dotyczy to procesu usuwania azotu.

Problemy oczyszczania ścieków są przedmiotem licznych publikacji naukowych, które są efektem badań prowadzonych zarówno w obiektach modelowych w skali laboratoryjnej, jak również realizowanych w obiektach pracujących w pełnej skali technicznej. Pomimo tego, że istnieje wiele prac naukowych dotyczących różnych metod i technologii oczyszczania ścieków, to niezbędne są badania dotyczące wpływu napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nityfikacji.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska pt. „*Analiza wpływu naprzemiennego napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nityfikacji w reaktorach ze złożem ruchomym*” obejmuje 6 oryginalnych prac naukowych opublikowanych w czasopiśmie z list Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego i przypisanych do dziedziny nauk inżynierijno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka:

Publikacja nr 1: Zając, O., Żubrowska-Sudoł, M., Godzieba, M., Ciesielski, S. (2024). Changes in Nitrification Kinetics and Diversity of Canonical Nitrifiers and Comammox Bacteria in a Moving Bed Sequencing Batch Biofilm Reactor - A Long-Term Study. Water,

16 (4), 534, <https://doi.org/10.3390/w16040534>. IF = 3,00; punkty MNiSW: 100 pkt. (**udział doktorantki – 60%**).

Publikacja nr 2: Zając, O., Żubrowska-Sudoł, M., Ciesielski, S., Godzieba, M. (2022). Effect of the Aeration Strategy on NOB Suppression in Activated Sludge and Biofilm in a Hybrid Reactor with Nitrification/Denitrification. *Water*, 14 (1), 72, <https://doi.org/10.3390/w14010072>. IF: 3,40; punkty MNiSW: 100 pkt. (**udział doktorantki – 60%**).

Publikacja nr 3: Zając, O., Żubrowska-Sudoł, M. (2023). Nitrification kinetics, N₂O emission, and energy use in intermittently aerated hybrid reactor under different organic loading rates. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 20 (9), 10061–10074, <https://doi.org/10.1007/s13762-022-04715-6>. IF: 3,00; punkty MNiSW: 70 pkt. (**udział doktorantki – 70%**).

Publikacja nr 4: Zając, O., Zielińska, M., Żubrowska-Sudoł, M. (2024). Enhancing wastewater treatment efficiency: A hybrid technology perspective with energy-saving strategies. *Bioresource Technology*, 399, 130593, <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2024.130593>. IF: 9,70; punkty MNiSW: 140 pkt. (**udział doktorantki – 65%**).

Publikacja nr 5: Zając, O., Żubrowska-Sudoł, M., Godzieba, M., Ciesielski, S. (2023). Activated sludge vs. biofilm – effect of temperature on ammonia and nitrite oxidation rate in the hybrid reactor. *Desalination and Water Treatment*, 288, 165–177, <https://doi.org/10.5004/dwt.2023.29304>. IF: 1,00; punkty MNiSW: 100 pkt. (**udział doktorantki – 70%**).

Publikacja nr 6: Zając, O., Żubrowska-Sudoł, M., Godzieba, M., Ciesielski, S. (2024). Changes in the activity and abundance of canonical nitrifiers and Comammox bacteria during stream switching: Shifting from a mainstream hybrid reactor for C, N, and P removal to a sidestream biofilm nitrification reactor. *Journal of Water Process Engineering*, 57, 104655, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.104655>. IF: 6,30; punkty MNiSW: 100 pkt. (**udział doktorantki – 60%**).

Wymienione prace opublikowano w latach 2022-2024, jako oryginalne artykuły naukowe, za które łączna liczba punktów, określona na podstawie list Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego wynosi **610**, a sumaryczny Impact Factor (IF) liczony według roku wydania publikacji pracy wynosi 26,40. Biorąc pod uwagę średni udział procentowy Doktorantki we wszystkich publikacjach składających się na rozprawę doktorską (**64,2%**), liczba punktów własnych wynosi **392 pkt**. Wszystkie czasopisma, w których opublikowano wymienione prace należą do dyscypliny inżynieria środowiska górnictwo i energetyka i są to renomowane czasopisma, takie jak: *Water* – 2 prace, *International Journal of Environmental Science and Technology* – 1 praca, *Bioresource Technology* – 1 praca, *Desalination and Water Treatment* – 1 praca, *Journal of Water Process Engineering* – 1 praca. We wszystkich 6 publikacjach stanowiących podstawę ubiegania się o stopień naukowy doktora mgr inż. Olga Zając jest pierwszym autorem. Publikacje zostały przygotowane wspólnie z Panią Promotor – dr hab. inż. Moniką Żubrowska-Sudoł, prof. uczelni, jak również przy

współpracy z 3 naukowcami z Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego. Przedstawione w publikacjach wyniki badań uzyskano dzięki realizacji projektu badawczego w ramach programu OPUS 14 finansowanego przez NCN oraz 2 grantów finansowanych przez Politechnikę Warszawską.

Przedłożony do recenzji Autoreferat rozprawy doktorskiej mgr inż. Olgi Zając składa się z 9 rozdziałów i zawiera również kopie 6 monotematycznych artykułów naukowych wraz z oświadczeniami o udziale procentowym poszczególnych współautorów. Tytuł rozprawy doktorskiej został sformułowany właściwie, a treść pracy jest zgodna z tematem podanym w tytule. Układ rozprawy doktorskiej oraz podział treści na rozdziały i kolejność rozdziałów są właściwe. Metodyka badań zastosowana w ocenianej rozprawie doktorskiej jest prawidłowa i pozwoliła na przeprowadzenie ciekawych prac eksperymentalnych oraz na analizę uzyskanych wyników badań i ich dyskusję z literaturą.

Badania zaprezentowane w ramach ocenianej rozprawy doktorskiej miały na celu rozwiązanie problemu naukowego dotyczącego analizy przebiegu i efektywności procesu nityfikacji 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 rozwijała się w reaktorach (błona biologiczna, osad czynny). W pracy podano 5 celi cząstkowych: 1) analiza wpływu strategii napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nityfikacji, 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) analiza wpływu różnych wariantów strategii napowietrzania na zużycie energii elektrycznej na napowietrzanie; 4) określenie wpływu temperatury na szybkość poszczególnych etapów procesu nityfikacji; 5) analiza przebiegu i efektywności procesu nityfikacji podczas przekształcenia hybrydowego reaktora ze złożem ruchomym do zintegrowanego usuwania związków C, N i P na nityfikacyjny reaktor pracujący w czystej technologii złoża ruchomego w warunkach ciągu bocznego.

Badania do rozprawy doktorskiej prowadzono w laboratoryjnych modelach sekwencyjnych reaktorów porcjowych o objętości czynnej 28 l. Jako nośniki biomasy wykorzystano złożo ruchome EvU-Pearl® o powierzchni czynnej $600 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Zakres badań obejmował: analizę jakości ścieków dopływających i odpływających z reaktorów (ChZT, BZT₅, N-NH₄⁺, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻, N_{og}, P_{og}, P-PO₄³⁻, pH, zasadowość), testy szybkości utleniania azotu amonowego, testy szybkości utleniania azotu azotynowego, pomiar emisji N₂O, ilościową reakcję łańcuchową polimerazy oraz sekwencjonowanie nowej generacji.

Doktorantka w swojej rozprawie doktorskiej wykazała, że:

1) Istotnym czynnikiem wpływającym na przebieg procesu nityfikacji w sekwencyjnych reaktorach porcjowych ze złożem ruchomym była strategia napowietrzania. Czynnikiem ten determinował aktywność i liczebność poszczególnych grup mikroorganizmów nityfikacyjnych, czego konsekwencją było wykorzystywanie różnych szlaków metabolicznych (konwencjonalna dwuetapowa autotroficzna nityfikacja, skrócona nityfikacja, nityfikacja heterotroficzna, Comammox), które pozwalały na uzyskanie porównywalnej efektywności procesu nityfikacji, ale przy różnym zapotrzebowaniu na energię elektryczną niezbędną do procesu napowietrzania, wpływając dodatkowo na wielkość emisji N_2O .

2) W przypadku czystej technologii złoża ruchomego zmiany strategii napowietrzania miały większy wpływ na aktywność i liczebność bakterii zdolnych do utleniania azotu amonowego (AOB) niż na drobnoustroje utleniające azotyny do azotanów (NOB). Aktywność bakterii AOB malała wraz ze wzrostem wartości stosunku czasu trwania podfaz bez i z napowietrzaniem (R) i zwiększała się po obniżeniu stężenia tlenu (DO). Dodatkowo udokumentowano, iż niezależnie od zastosowanej strategii napowietrzania (R: 0, 1/4, 1/3, 1/2; DO: 3,5 mg O_2/l , 6,0 mg O_2/l), bakterie NOB charakteryzowały się wyższą aktywnością i liczebnością niż bakterie AOB.

3) W przypadku hybrydowej technologii złoża ruchomego, istotny wpływ na aktywność poszczególnych grup mikroorganizmów nityfikacyjnych miała forma w jakiej biomasa rozwijała się w reaktorze. Bakterie zdolne do utleniania azotu amonowego wykazywały wyższą aktywność rozwijając się w postaci kłaczek osadu czynnego, podczas gdy bakterie utleniające azotyny do azotanów były bardziej aktywne w błonie biologicznej porastającej ruchome nośniki. Aktywność bakterii zdolnych do utleniania azotu amonowego malała wraz ze wzrostem wartości R i zwiększała się po obniżeniu stężenia tlenu.

4) Porównując liczebność mikroorganizmów nityfikacyjnych, które zasiedlały błonę biologiczną i osad czynny, wykazano, że błona biologiczna stanowiła środowisko sprzyjające rozwojowi tych drobnoustrojów. Dominującą grupą nityfikatorów zarówno w błonie biologicznej, jak i w kłaczkach osadu czynnego, były bakterie NOB.

5) Głównym czynnikiem powodującym supresję bakterii NOB w obu formach biomasy występujących w reaktorze hybrydowym było zwiększenie wartości R.

6) Na zwiększenie emisji podtlenku azotu w hybrydowym reaktorze ze złożem ruchomym wpłynęło skrócenie czasu trwania podfaz z napowietrzaniem (z 30 minut do 20 minut). Współczynnik emisji N_2O wzrósł wówczas z 0,896% do 1,091%.

7) Na podstawie badań nad wpływem wykształcenia biomasy w postaci osadu czynnego w reaktorze pracującym w czystej technologii złoża ruchomego wykazano, że rozwój tej formy biomasy przyczynił się do zwiększenia efektywności procesów denitryfikacji i biologicznej defosfatacji. Współwystępowanie błony biologicznej i osadu czynnego w jednym układzie zwiększało różnorodność mikroorganizmów uczestniczących w procesach oczyszczania ścieków, sprzyjając rozwojowi zarówno bakterii autotroficznych, jak i heterotroficznych. Wykształcenie biomasy w postaci osadu czynnego pozwoliło także na znaczące zmniejszenie zużycia energii elektrycznej na napowietrzanie, wskazując na duży potencjał tego rozwiązania w kontekście zrównoważonego zarządzania zasobami energetycznymi.

8) Na znaczące obniżenie zużycia energii na napowietrzanie, zwłaszcza w kontekście hybrydowych reaktorów ze złożem ruchomym, wpływ miały modyfikacje strategii napowietrzania, polegające na założeniu, że czasy trwania podfaz bez napowietrzania będą dwukrotnie dłuższe od podfaz z napowietrzaniem. Uzyskane wyniki wskazują również, że w układach hybrydowych z naprzemiennym napowietrzaniem, gdzie działanie dmuchaw jest kontrolowane zarówno przez wartość współczynnika R, jak i zadane stężenie tlenu, efektem skrócenia czasu trwania podfaz z napowietrzaniem nie zawsze jest zmniejszenie zużycia energii, co sugeruje konieczność precyzyjnej regulacji tych parametrów w celu maksymalizacji efektywności energetycznej.

9) Gwałtowne obniżenie temperatury z 20°C do 12°C w hybrydowym reaktorze ze złożem ruchomym wywołało większe różnice w wartościach szybkości utleniania azotu amonowego, niż w wartościach szybkości utleniania azotu azotynowego. Bakterie NOB zasiedlające biofilm wykazywały większą wrażliwość na spadek temperatury, niż te występujące w osadzie czynny. Wyznaczony na podstawie zebranych danych współczynnik korekcji temperatury (Θ : 1,107–1,087) może znaleźć praktyczne zastosowanie w projektowaniu i optymalizacji hybrydowych systemów oczyszczania ścieków, umożliwiając precyzyjne dostosowanie procesów do zmiennych warunków termicznych.

10) Przeprowadzone badania pozwoliły także na analizę występowania bakterii Comammox w reaktorach ze złożem ruchomym i ocenę ich roli w procesie nityfikacji. Na podstawie uzyskanych wyników stwierdzono, że:

- bakterie Comammox odegrały istotną rolę w procesie nityfikacji w przypadku obu analizowanych konfiguracji technologii złoża ruchomego;
- obniżenie obciążenia reaktora ładunkiem związków organicznych z 384 g ChZT/m³·d do 213 g ChZT/m³·d i całkowite wyeliminowanie związków organicznych ze ścieków

dopływających do układu spowodowało, że liczebność bakterii Comammox była wyższa niż kanonicznych bakterii utleniających azot amonowy;

- czynnikami mającymi istotny wpływ na liczebność bakterii Comammox były: zmiana strategii napowietrzania z ciągłego na naprzemienne, obniżenie stężenia tlenu, eliminacja związków organicznych ze ścieków doprowadzanych do reaktora, przejście z warunków symulujących główny ciąg oczyszczania ścieków na warunki symulujące ciąg boczny.

Doktorantka zaproponowała kontynuację badań nad wpływem strategii napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nityfikacji, poprzez realizację następujących zagadnień:

- Analiza szlaków metabolicznych procesu nityfikacji dla poszczególnych konfiguracji technologii złoża ruchomego, przy równoczesnym uwzględnieniu formy w jakiej biomasa rozwija się w reaktorze, i ocena roli alternatywnych azotu amonowego.

- Ocena efektywności energetycznej poszczególnych szlaków metabolicznych procesu nityfikacji oraz ich potencjalnego wpływu na eliminację związków azotu ze ścieków (analiza sprawności procesu denityfikacji prowadzonego przez mikroorganizmy nityfikacyjne).

- Poszukiwanie powiązań pomiędzy występowaniem poszczególnych grup mikroorganizmów nityfikacyjnych a emisją podtlenku azotu oraz określenie wpływu formy, w jakiej w reaktorze rozwija się biomasa, na emisję tego gazu cieplarnianego.

- Ocena możliwości optymalizacji strategii napowietrzania w reaktorach ze złożem ruchomym poprzez wprowadzenie zaawansowanych technik monitoringu i kontroli procesu nityfikacji, w tym zastosowanie sztucznej inteligencji i uczenia maszynowego.

- Analiza wpływu nowoczesnych technik napowietrzania opartych na nanopęcherzykach, w kontekście aktywności poszczególnych grup mikroorganizmów nityfikacyjnych.

- Ocena wpływu strategii napowietrzania na stabilność procesów biologicznych w obecności substancji inhibitujących proces nityfikacji, takich jak metale ciężkie, pestycydy i farmaceutyki.

Wyniki badań zaprezentowane w ocenianej rozprawie doktorskiej wnoszą nową wiedzę do dyscypliny inżynieria środowiska górnictwo i energetyka i mogą być wykorzystane do optymalizacji strategii napowietrzania ścieków w oczyszczalniach wykorzystujących technologię złoża ruchomego, szczególnie w aspekcie minimalizacji zużycia energii elektrycznej, zmniejszenia emisji podtlenku azotu oraz śladu węglowego oczyszczalni.

3. Uwagi krytyczne i dyskusyjne o charakterze merytorycznym i edytorskim

Oceniana rozprawa została opracowana wzorowo, jednak poniżej podano kilka uwag dotyczących treści zawartych w autoreferacie rozprawy i proszę o ich wyjaśnienie:

- W streszczeniu rozprawy oraz w metodyce badawczej na str. 47 Doktorantka podała, że zakres badań obejmował: analizę jakości ścieków dopływających i odpływających z reaktorów, który obejmował m.in.: ChZT, BZT₅, N-NH₄⁺, N-NO₂⁻, N-NO₃⁻, N_{og}, P_{og}, P-PO₄³⁻, pH, zasadowość. Jednak w tabelach 4.2., 4.3., 4.4, 4.5b, 4.6, 4.7c w charakterystyce ścieków syntetycznych brakuje wartości parametrów takich, jak: BZT₅, N-NO₂⁻. Ponadto w tabeli 4.7c w etapie 1, w serii 3 badań oraz w etapach 2 i 3 badań nie podano wartości dla ChZT. Proszę o wyjaśnienie tych braków. Jeśli BZT₅ było określane w ściekach podczas badań to proszę o podanie wartości tego wskaźnika dla poszczególnych eksperymentów.

- W rozprawie nie odnaleziono informacji na temat obciążenia hydraulicznego badanych układów badawczych. Proszę o podanie jaki był dobowy dopływ ścieków do badanych stanowisk badawczych.

- Str. 62 – wiersz 2 od dołu: jest „do reaktor”, powinno być: do reaktora.

- Str. 62 – wiersz 1 od dołu: jest „odpływających do reaktora”, powinno być: odpływających z reaktora.

- Str. 63 – wiersz 5, 10 i 15 od góry: jest „w ściekach odpływających do reaktora”, powinno być: w ściekach odpływających z reaktora.

Na podstawie analizy treści podanych w rozprawie nasuwają się również pytania do doktorantki. W związku z tym proszę o wyjaśnienie:

1. Czy wyniki badań laboratoryjnych przeprowadzonych przez Doktorantkę dotyczące optymalizacji procesu nitryfikacji w technologii złoża ruchomego zostały już wykorzystane w praktyce w oczyszczalni w pełnej skali technicznej lub czy planuje się ich wykorzystanie w najbliższym czasie?
2. Jaka może być maksymalna przepustowość oczyszczalni, w której mogłaby zostać zastosowana technologia złoża ruchomego? Czy są w tym zakresie jakieś ograniczenia?

Uwagi krytyczne i dyskusyjne podane powyżej nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy doktorskiej, którą oceniam jako wzorowe opracowanie naukowe. Tematyka rozprawy przedstawiona przez Doktorantkę jest jak najbardziej aktualna i potrzebna ze względu na konieczność wdrażania rozwiązań technologicznych mających na celu ochronę środowiska wodnego w aspekcie realizacji wymagań Ramowej Dyrektywy Wodnej UE.

4. Wniosek końcowy

Uważam, że rozprawa doktorska mgr inż. Olgi Zając jest bardzo cennym opracowaniem, w którym osiągnięto zamierzone cele badań i rozwiązano założony problem naukowy. Doktorantka wykazała się odpowiednim przygotowaniem teoretycznym i praktycznym, znajomością współczesnej literatury dotyczącej tematu pracy oraz umiejętnością planowania

i prowadzenia badań. Autorka pokazała, że potrafi właściwie wykonać zamierzone prace eksperymentalne oraz prawidłowo i wnikliwie zinterpretować uzyskane wyniki badań. Tematyka i zakres rozprawy doktorskiej jest ściśle związany z ważnym problemem, który dotyczy optymalizacji procesu nityfikacji w reaktorach ze złożem ruchomym, dlatego podjętą problematykę badawczą należy zaliczyć do grupy prac badawczo-rozwojowych.

Biorąc po uwagę zaprezentowaną powyżej analizę rozprawy doktorskiej pt. „Analiza wpływu naprzemiennego napowietrzania na przebieg i efektywność procesu nityfikacji w reaktorach ze złożem ruchomym” stwierdzam, że przedłożona dysertacja spełnia wymagania stawiane rozprawom doktorskim (art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r., poz. 742, z późn. zm.). dotyczące ubiegania się o stopień naukowy doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka. Dlatego wnioskuję o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Olgi Zając i dopuszczenie Jej do publicznej obrony przed Radą Dyscypliny Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej. Jednocześnie biorąc pod uwagę całokształt badań przeprowadzonych przez Doktorantkę i wysoką jakość rozprawy doktorskiej **proponuję jej wyróżnienie.**

Krzysztof Józwiakowski

Lublin, 12.12.2024 r.