

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

Warszawa, 21.04.2023 r.

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Grażyny Pęciak-Foryś

pt. „**Usuwanie azotu z odcieków po odwadnianiu przefermentowanych osadów
ściekowych w oczyszczalni ścieków Śródmieście w Zabrzu**”

Promotor: prof. dr hab. inż. Krzysztof Barbusiński

Promotor pomocniczy: mgr inż. Piotr Niemiec

1. Przedmiot recenzji i podstawa jej opracowania

Recenzja dotyczy rozprawy doktorskiej pt. „Usuwanie azotu z odcieków po odwadnianiu przefermentowanych osadów ściekowych w oczyszczalni ścieków Śródmieście w Zabrzu”, wykonanej przez Panią mgr. inż. Grażynę Pęciak-Foryś. Praca obejmuje 145 stron tekstu, zawiera 20 tabel, 22 rysunki, 42 wykresy oraz 10 zdjęć. Uzupełnienie rozprawy stanowi spis zamieszczonych w tekście tabel, rysunków, wykresów i zdjęć, wykaz literatury obejmujący 148 pozycji oraz załącznik, w którym przedstawiono projekt procesowy w skali technicznej badanego w dysertacji rozwiązania.

Recenzję opracowano na podstawie umowy o dzieło zawartej w dniu 17-02-2023 r pomiędzy Politechniką Śląską reprezentowaną przez prof. dr hab. inż. Mariusza Dudziaka, Dziekana Wydziału Inżynierii Środowiska i Energetyki, a opiniodawcą.

2. Charakterystyka i ocena rozprawy

2.1. Ocena zasadności podjęcia tematu

Od momentu, gdy w 2001 roku udało się po raz pierwszy wdrożyć w bocznym ciągu oczyszczania ścieków proces beztlenowego utleniania amoniaku (Anammox), z roku na roku przybywa obiektów, które wykorzystują ten proces do usuwania azotu z odcieków powstających po odwadnianiu przefermentowanych osadów ścieków. Wykorzystanie procesu

Anammox wiąże się przeprowadzeniem tzw. deamonifikacji, która najczęściej składa się z nitrytacji (tj. utleniania azotu amonowego do azotu azotynowego) oraz przedmiotowego procesu. Istotne korzyści technologiczne w stosunku do usuwania azotu na drodze autotroficznej nitryfikacji i heterotroficznej denitryfikacji, polegające na: 1) obniżeniu zapotrzebowania na tlen, a tym samym zmniejszeniu kosztów napowietrzania, 2) braku konieczności dozowania zewnętrznego źródła węgla organicznego, 3) mniejszej produkcji osadów, 4) mniejszej emisji CO₂ oraz 5) mniejszej emisji N₂O, sprawiły, że zagadnienia związane z wykorzystaniem procesu Anammox do usuwania azotu są od czasów odkrycia tego procesu (lata dziewięćdziesiąte XX wieku) jednym z głównych nurtów badawczych wśród zespołów zajmujących się usuwaniem związków biogenych ze ścieków. Wiedza, którą posiadamy obecnie na temat czynników wpływających na przebieg i efektywność usuwania azotu na drodze deamonifikacji pozwala na sformułowanie rekomendacji każdorazowego prowadzenia badań przed wdrażaniem tej metody usuwania azotu w oczyszczalniach ścieków w celu weryfikacji przyjętych koncepcji technologicznych. Nie zawsze bowiem udaje się uzyskać stabilny przebieg usuwania azotu z wykorzystaniem tej metody, powodowany zarówno czynnikami wpływającymi niekorzystnie na proces Anammox, jak również na proces nitrytacji.

Odpowiedzią na tę rekomendację jest przedstawiony do oceny doktorat wdrożeniowy, którego celem było „wykazanie korzyści i zasadności wdrożenia innowacyjnej technologii deamonifikacji do usuwania azotu z odcieków po odwadnianiu przefermentowanych osadów ściekowych w bocznym ciągu technologicznym w oczyszczalni ścieków Śródmieście w Zabrze”. Warto również zaznaczyć, że pomimo szerokiej wiedzy na temat deamonifikacji, usuwanie azotu na tej drodze uznawane jest nadal za rozwiązanie innowacyjne, co Doktorantka słusznie uwypukliła formułując cel pracy. Odnosząc się dodatkowo do warunków krajowych należy wziąć pod uwagę, że obecnie tylko kilka oczyszczalni ścieków wdrożyło usuwanie azotu z wykorzystaniem tej metody. W tym kontekście wybór tematyki rozprawy uznać należy za trafny i wpisujący się w światowe trendy w obszarze usuwania azotu w komunalnych oczyszczalniach ścieków.

2.2. Charakterystyka rozprawy

Praca została podzielona na 10 głównych rozdziałów. Rozdział 1. jest wstępem do zasadniczej części pracy, w którym można znaleźć jasno sformułowane uzasadnienie podjętego w dysertacji tematu. W kolejnym rozdziale Doktorantka przedstawiła zagadnienia związane z obiegiem azotu w przyrodzie, ze szczególnym uwzględnieniem występowania

tego pierwiastka w ściekach. Logiczną kontynuację tego wątku stanowi omówienie jednostkowych procesów zaliczanych do grupy biologicznych przemian związków azotu występujących podczas oczyszczania ścieków. W zakres rozdziału 3. wchodzi mianowicie charakterystyka amonifikacji, autotroficznej i heterotroficznej nitryfikacji, heterotroficznej i autotroficznej denitryfikacji, z uwzględnieniem różnych możliwych szlaków metabolicznych. Istotnym z punktu widzenia tematu rozprawy doktorskiej elementem tego rozdziału jest omówienie następujących zagadnień dotyczących procesu beztlenowego utleniania amoniaku: zasady oraz mechanizmu procesu, charakterystyki mikroorganizmów odpowiedzialnych za prowadzenie procesu, czynników wpływających na jego przebieg i efektywność oraz najczęściej stosowanych w praktyce rozwiązań technologicznych pozwalających na implementację tego procesu w bocznym ciągu oczyszczania ścieków. W kolejnym rozdziale Doktorantka w syntetyczny sposób przedstawiła celowość oraz uwarunkowania wprowadzania w oczyszczalniach ścieków bocznego ciągu technologicznego mającego na celu usunięcie azotu na drodze deamonifikacji.

W ten sposób skonstruowany opis doniesień literaturowych stanowi podstawę do stwierdzenia, że „instalacje usuwania azotu z odcieków po odwadnianiu przefermentowanych osadów ściekowych w bocznym ciągu technologicznym stają się ważnym (a nawet niezbędnym) elementem strategii oczyszczania ścieków” i pozwala Doktorantce na sformułowanie następującej tezy doktoratu wdrożeniowego: „zastosowanie innowacyjnej technologii deamonifikacji do oczyszczania odcieków pofermentacyjnych pozwoli na zwiększenie efektywności usuwania azotu całkowitego w głównym ciągu technologicznym oczyszczalni ścieków Śródmieście w Zabrze.” W rozdziale 5 oprócz tezy pracy przedstawiono jej cel z uwzględnieniem poszczególnych zadań cząstkowych wchodzących w zakres dysertacji.

Następny rozdział poświęcony jest omówieniu problemów eksploatacyjnych występujących podczas usuwania azotu w przedmiotowej oczyszczalni ścieków oraz sposobów podejmowanych w obiekcie w celu zabezpieczenia wymaganego stężenia azotu ogólnego w ściekach oczyszczonych. Jest to jeden z istotnych fragmentów dysertacji, gdyż dokumentuje, że ładunek azotu w strumieniu odcieków powstających w procesie odwadniania przefermentowanych osadów ściekowych stanowi średnio 20 % ładunku dopływającego do oczyszczalni ze ściekami surowymi, i tym samym uzasadnia kroki mające na celu wprowadzenie w oczyszczalni ścieków bocznego ciągu technologicznego, w którym usuwanie azotu odbywałoby się na drodze deamonifikacji. Rozważania dotyczące wartości stężenia oraz ładunku azotu ogólnego i azotu amonowego w różnych strumieniach ścieków

występujących w analizowanym obiekcie zaprezentowano na tle charakterystyki układu technologicznego ciągu ściekowego i osadowego.

Zasadność badań nad usuwaniem azotu z odcieków pofermentacyjnych w bocznym ciągu technologicznym, potwierdzono również w kolejnym rozdziale. W pierwszej kolejności przedstawiono w nim wyniki badań wstępnych, w których sprawdzano różne warianty obciążenia układu laboratoryjnego, który odzwierciedlał węzeł usuwania azotu występujący w skali technicznej, ładunkiem azotu pochodzącego ze ścieków surowych oraz z odcieków z wirówek. Badania te obejmowały cztery serie badawcze, w których udział odcieków z procesu odwadniania przefermentowanych osadów utrzymywano na poziomie 20 %, 30 % i 40 %, jak również na poziomie „typowym dla pracy oczyszczalni” oraz serię badawczą podczas której do reaktora biologicznego dopływały tylko ścieki surowe (bez udziału odcieków z odwadniania osadów). W drugiej kolejności szczegółowo omówiono przesłanki, które skłoniły Doktorantkę do wyboru technologii ANITATMMox[®] jako rozwiązania, które zostanie przetestowane w ramach badań właściwych zaplanowanych w niniejszej dysertacji. Następnie przedstawiono metodykę badawczą, a w szczególności opis laboratoryjnego stanowiska badawczego, wytyczne techniczne i technologiczne odnoszące się do realizacji badań nad usuwaniem azotu na drodze deamonifikacji oraz harmonogram prac eksperymentalnych. Uzupełnienie informacji dotyczących przyjętej metodyki badawczej stanowi rozdział 8., w którym omówiono zakres przeprowadzonych analiz fizykochemicznych jakości ścieków/odcieków.

Omówieniu wyników badań własnych poświęcony jest rozdział 9. Składa się on z klarownie wydzielonych dwóch podrozdziałów, w których Doktorantka zaprezentowała wyniki badań dwóch serii badawczych. Każdy z nich zorganizowano w analogiczny sposób, co tworzy logiczną strukturę i ułatwia śledzenie przewodniej myśli dysertacji. Doktorantka rozpoczyna od prezentacji warunków oraz parametrów pracy bioreaktora przyjętych podczas jego uruchamiania. Następnie szczegółowo omawia te aspekty dla całego przebiegu procesu deamonifikacji. Na tym tle przechodzi do analizy uzyskanych wyników. Jej głównymi wątkami są: i) omówienie zmian poszczególnych form azotu w dopływie i odpływie (azot amonowy, azot azotynowy, azot azotanowy) z reaktora oraz efektywności usuwania azotu amonowego, ii) poszukiwanie korelacji pomiędzy parametrami technologicznymi/czynnikami determinującymi przebieg i efektywność deamonifikacji (odczyn, stężenie tlenu, temperatura). Podrozdział 9.1 zawiera dodatkowo prezentację wyników testu mającego na celu określenie aktywności bakterii odpowiedzialnych do prowadzenie procesu beztlenowego utleniania amoniaku.

Po tym rozdziale Doktorantka przechodzi do podsumowania, które rozpoczyna od przypomnienia przedmiotu dysertacji oraz przyjętej koncepcji badawczej, a następnie przedstawia parametry pracy bioreaktora ANITATMMox[®], przy których uzyskano zakładaną efektywność oczyszczania odcieków z odwadniania przefermentowanych osadów ściekowych, tym samym potwierdzając sformułowaną przed przystąpieniem do badań tezę przedmiotowego doktoratu wdrożeniowego. Istotnym uzupełnieniem pracy doktorskiej jest wstępna koncepcja technologiczna implementacji badanego rozwiązania w oczyszczalni ścieków Śródmieście w Zabrze. Należy przy tym podkreślić, że efektem przeprowadzonych w ramach dysertacji badań było umieszczenie w wieloletnim planie rozwoju Zabrzeńskiego Przedsiębiorstwa Wodociągów i Kanalizacji Sp. z o.o. punktu o rozpisaniu przetargu na projekt oraz budowę instalacji deamonifikacji, co stanowi potwierdzenie wdrożeniowego charakteru ocenianej rozprawy doktorskiej.

2.3. Pytania i uwagi do pracy

Wnikliwa 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 rozdziale 3.1.2 Doktorantka opisała proces autotroficznej nitryfikacji niezgodnie z obecnym stanem wiedzy. W rozdziale czytamy „Autotroficzna nitryfikacja to dwustopniowy proces tlenowy, składający się z dwóch etapów utleniania...”. W 2005 roku, gdy powstała praca, na którą powołuje się w tym miejscu Autorka, zdanie to odzwierciedlało ówczesną wiedzę w zakresie procesu nitryfikacji. Obecnie dowiedziono, że proces nitryfikacji przebiega zarówno dwu-, jak i jednoetapowo. Warto przy tym nadmienić, że Doktorantka w rozdziale 3.2.2 opisuje proces utleniania azotu amonowego do azotanów tzw. proces Comammox. Tak jak wspomniałam, wiedza ta powinna być uwzględniona również w rozdziale 3.1.2. Analogiczna nieścisłość znajduje się także na stronie 46.
2. Przeprowadzone przez Doktorantkę badania wstępne obejmowały pięć tygodniowych serii w modelu laboratoryjnym odzwierciedlającym technologiczny węzeł usuwania azotu w przedmiotowej oczyszczalni ścieków. Każda seria poprzedzona była siedmiodniowym okresem adaptacji osadu czynnego do „zadanych warunków”. Proszę o wyjaśnienie co było podstawą do przyjęcia takiej długości trwania etapu adaptacji oraz badań właściwych. Pragnę przy tym nadmienić, że były to dość krótkie okresy.

Proszę również o wyjaśnienie z czego wynikały różnice w wartościach zawiesiny ogólnej w poszczególnych seriach badawczych oraz w reaktorze nitryfikacyjnym i reaktorze denitryfikacyjnym dla pojedynczej serii. Dodatkowo zwraca uwagę różny procentowy udział zawiesiny organicznej w komorze nitryfikacji i denitryfikacji. Przykładowo w serii I wynosi od odpowiednio 75,7 % i 66,7 %.

3. W rozdziale 6 Doktorantka wielokrotnie odnosi się do wartości projektowych. Czytelnikowi łatwiej byłoby odebrać przygotowany opis, gdyby te wartości zostały zebrane np. tabelarycznie.
4. Str. 59: W mojej opinii warto było podać jakiego rodzaju zewnętrzne źródła węgla wykorzystywane są w oczyszczalni ścieków w Zabrze.
5. Str. 65, Tabela 7: Przypuszczam, że prawidłowa jednostka charakteryzująca przepływ w modelu laboratoryjnym to dm^3/d .
6. W rozdziale 9 zabrakło mi dyskusji wyników uzyskanych w badaniach własnych z wynikami dostępnymi w literaturze na temat przebiegu i efektywności usuwania azotu na drodze deamonifikacji.
7. Za dyskusyjne uważam stwierdzenie, że „wzrostowa tendencja wartości pH powodowała spadek wartości stężenia tlenu rozpuszczonego” oraz wyjaśnienie odnotowanego zjawiska. Sugerowałabym raczej następujący opis „wraz ze zwiększeniem wartości pH obserwowano zmniejszenie wartości stężenia tlenu rozpuszczonego”, a następnie analizę wszystkich przyczyn, które mogą podczas usuwania azotu na drodze deamonifikacji powodować takie zmiany wartości rozpatrywanych wskaźników.
8. Wzrost aktywności jakiej grupy bakterii mógł powodować „tendencję wzrostową pH” (str. 121)?
9. Sugeruję, aby w odniesieniu do wskaźników jakości ścieków nie używać sformułowania „parametry ścieków”. Te dwa sformułowania („wskaźniki”, „parametry”) dedykowane są innym wielkościom.
10. W tabeli 13 Autorka prezentuje „uśredniony... skład odcieków”. Warto w takim przypadku podać ilość wyników, na podstawie których obliczono wartość średnią oraz wyznaczyć odchylenie standardowe.
11. W pracy stężenia poszczególnych form azotu przedstawiono jako wartości odniesione do jonów np. $\text{mg NH}_4/\text{l}$, jak i do azotu np. $\text{mg N-NH}_4/\text{l}$. Oba sposoby są poprawne, wymagają jednak przeliczenia wartości biorąc pod uwagę masy molowe

poszczególnych pierwiastków. Pragnę przy tym zaznaczyć, że praca staje się bardziej czytelna, gdy stosujemy w niej ten sam sposób wyrażania jednostek.

12. Pragnę podkreślić, że doceniam pracowitość przeprowadzanych badań i nie mam wątpliwości, że ich wykonanie wymagało od Doktorantki bardzo dużego zaangażowania. Jednakże w przedłożonej do oceny dysertacji można się doszukać kilku niedociągnięć:

- równania reakcji nr 18 (str. 22) i nr 20 (str. 83) nie odpowiadają opisowi przedstawionemu w pracy;
- w wielu miejscach dysertacji Doktorantka zamiennie stosuje sformułowanie „proces Anammox” i „technologia Anammox”. Beztlenowe utlenianie amoniaku (Anammox) to proces, który może być implikowany w oczyszczalniach ścieków przy wykorzystaniu różnych technologii. Stąd poprawne sformułowanie to „proces Anammox”;
- powołując się na prace sprzed kilku lat, Autorka prezentuje zaczerpnięte z nich dane jako „aktualne” np. „Aktualnie również trwają prace przygotowawcze studium wykonalności w czterech miastach Mołdawii (...) (Hartwig, 2017)”;
- na str. 52 użyto sformułowania „ścieki deszczowe” zamiast wody opadowe;
- część zdjęć oraz tabel zamieszczonych w pracy jest niewyraźna np. Zdjęcie 7, Tabela 8;
- w Tabeli 16 nie podano, która wartość odnosi się do dopływu, a która do odpływu. Brakuje również jednej wartości zasadowości;
- na wykresie 10 nie wyjaśniono w legendzie czego dotyczą punkty oznaczone kolorem zielonym;
- w pracy można znaleźć wartości dla których brakuje jednostek np. str. 102: „... stężenia azotu azotynowego i azotanowego kształtują się na poziomie poniżej 1...”
- w dysertacji występują również błędy edytorskie np. str. 13 „ilość azotynów i azotanów w jest niewielka” (należy usunąć „w”), str. 24 „bazujących na procesach anammox” (poprawne brzmienie: „bazujących na procesie anammox”, „wpisują się założenia” (brakuje „w”), str. 112 „korygując obciążeniu” („korygując obciążenie”).

Jak już wspomniałam moje krytyczne uwagi i pytania mają charakter dyskusyjny. Oczekuję, że staną się one przedmiotem dojrzałych, przemyślanych i rzeczowych odpowiedzi Doktorantki podczas publicznej obrony pracy (w szczególności proszę o ustosunkowanie się wówczas do uwag nr 2, 6, 7 i 8).

2.4. Podsumowanie wartości merytorycznej pracy i wniosek końcowy

Po starannym zapoznaniu się z rozprawą doktorską mgr inż. Grażyny Pęciak-Foryś stwierdzam, że spełnia ona wymagania stawiane przed doktoratami wdrożeniowymi. Badania przeprowadzone w ramach niniejszej pracy wpisują się w aktualny nurt wdrażania w oczyszczalniach ścieków innowacyjnych rozwiązań usuwania azotu wykorzystujących proces beztlenowego utleniania amoniaku. Przedstawiony w dysertacji materiał badawczy jest spójny i wartościowy zarówno pod względem praktycznym, jak i naukowym. Dysertacja potwierdza znajomość ogólnej wiedzy teoretycznej Autorki w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka, a także umiejętność planowania i prowadzenia przez Nią 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 Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej o dopuszczenie Pani mgr inż. Grażyny Pęciak-Foryś do dalszego etapu postępowania w sprawie nadania stopnia doktora.

Podpisała Monika Żubrowska-Sudoł