

dr hab. Agata Rosińska, prof. PCz
Katedra Chemii, Technologii Wody i Ścieków
Wydział Infrastruktury i Środowiska
Politechnika Częstochowska

Częstochowa, 22.05.2018 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej
mgr inż. SEBASTIANA KUJAWIAKA
pt. „Wpływ warunków hydraulicznych w reaktorach barbotażowych ze
złożem ruchomym na efektywność oczyszczania ścieków”**

1. Podstawa formalna recenzji

Recenzja rozprawy doktorskiej przygotowana została na podstawie pisma Dziekana Wydziału Budownictwa, Architektury i Inżynierii Środowiska Uniwersytetu Zielonogórskiego dr hab. inż. Andrzeja Greinerta, prof. UZ, z dnia 20 kwietnia 2018 r. znak WI-P/101/2018, informującego o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Sebastiana Kujawiaka oraz na podstawie umowy o dzieło nr WIOP/08/D/2018.

2. Ocena celowości podjęcia tematu

Tematyka pracy dotyczy ważnego, aktualnego i nie do końca rozwiązanego problemu efektywnego oczyszczania ścieków pochodzących z gospodarstw domowych i zakładów przemysłowych. Wzrastające tempo rozwoju systemów zaopatrzenia w wodę zlokalizowanych poza aglomeracją, powoduje systematyczny wzrost ilości odprowadzanych ścieków. Stwarza to konieczność modernizacji już istniejących lub budowy nowych systemów kanalizacji i oczyszczania ścieków na tych terenach. Są to jednak przedsięwzięcia kosztowne będące wyzwaniem finansowym szczególnie dla małych gmin. Zgodnie z nowym Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie warunków, jakie należy spełnić przy wprowadzaniu ścieków do wód lub do ziemi oraz w sprawie substancji szczególnie szkodliwych dla środowiska wodnego (Dz.U. 2014 poz. 1800) obniżono wartości progowe wielu wskaźników np. azotu i fosforu w ściekach odprowadzanych do gruntu. Na zaostrzenie wymagań nie jest przygotowanych wiele oczyszczalni ścieków i nadal część z nich ma problemy z utrzymaniem stężeń azotu i fosforu w ściekach oczyszczonych na ustalonym poziomie. W związku z tym bardzo istotnym zagadnieniem naukowym i inżynierskim pozostaje usprawnienie biologicznych procesów oczyszczania ścieków. Dużą nadzieję w tym zakresie wiąże się z rozwiązaniami technologicznymi opartymi na wykorzystaniu reaktorów barbotażowych, które stanowią innowacyjną alternatywę do tradycyjnych systemów oczyszczania. Ze względu na prostą i niezawodną konstrukcję ułatwiają modyfikowanie danego

procesu technologicznego oczyszczania ścieków i dają możliwość dostosowywania się układu do zmieniającego się natężenia dopływających ścieków i poprawy jakości oczyszczanych ścieków. Zastosowanie złoża ruchomego pozwala na dopasowanie wypełnienia w reaktorze barbotażowym do aktualnych potrzeb i w konsekwencji wpływa na zwiększenie obciążenia hydraulicznego oczyszczalni, bez konieczności zmiany wielkości reaktorów. Zastosowanie podnośnika powietrznego umożliwi transport małych ilości ścieków i natlenienie środowiska, co odgrywa kluczową rolę w metodzie biologicznego oczyszczania ścieków. W celu zaplanowania optymalnej pracy reaktora barbotażowego ze złożem ruchomym istotna jest znajomość parametrów/wskaźników hydraulicznych oraz technologicznych. W rozprawie podjęto próbę wyznaczenia warunków hydraulicznych i wypełnienia złożem ruchomym w reaktorach barbotażowych na hydrodynamikę, efektywność procesu napowietrzania i usuwania wybranych zanieczyszczeń ze ścieków. Przeanalizowano procesy podnoszenia i transportu, napowietrzania oraz oczyszczania małych ilości ścieków, pochodzących z kanalizacji odciążonej i miejskiej, w prototypowym bioreaktorze biologicznym. Na podstawie otrzymanych wyników badań opracowano model matematyczny napowietrzania reaktora, optymalizację dwukryterialną, model przepływu mieszaniny dwufazowej w podnośniku oraz analizę statystyczną wyników badań. Analizowane zagadnienia należy uznać za aktualne ze względu na obowiązujące akty prawne, które stawiają oczyszczalniom ścieków określone wymagania dotyczące wysokiej efektywności usuwania między innymi związków azotu i fosforu. Uważam, że prezentowane w pracy doktorskiej wyniki badań wpisują się w obszar inżynierii środowiska, mają duże znaczenie praktyczne oraz wnoszą nowe elementy wiedzy dotyczącej wpływu warunków hydraulicznych w reaktorach barbotażowych ze złożem ruchomym na efektywność oczyszczania ścieków w rzeczywistych warunkach pracy oczyszczalni.

3. Analiza i ocena pracy

Rozprawa doktorska mgr inż. Sebastiana Kujawiaka liczy 165 stron i składa się z 7 rozdziałów, w tym wstęp, przegląd literatury (rozdział 2), cel i zakres pracy (rozdział 3) oraz 2 rozdziały poświęcone części badawczej, która stanowi 55% objętości pracy. Na końcu rozprawy zamieszczono podsumowanie i wnioski końcowe oraz spis literatury, tabel oraz rycin.

Pierwsza część składowa pracy tj. przegląd literatury rozpoczyna się od rozdziału zatytułowanego *Wstęp*. Jest to rozdział krótki, w którym Autor wprowadza czytelnika w zagadnienia podejmowanego tematu i uzasadnia celowość podjęcia badań. Wstęp do problematyki związanej z efektywnym oczyszczaniem ścieków świadczy o dużej wiedzy Doktoranta i doskonałym rozeznaniu w zagadnieniach związanych z mechanizmem działania reaktora barbotażowego ze złożem ruchomym oraz warunkami hydraulicznymi wpływającym na jego optymalną pracę i skuteczne oczyszczanie ścieków.

Rozdział 2 zatytułowany *Przegląd dotychczasowych badań* obejmuje szczegółowy i wyczerpujący opis doniesień literaturowych związany z tematyką pracy doktorskiej. Rozdział ten składa się z trzech porozdziałów: *2.1 Podstawy mechaniki przepływu ciecz-gaz*, *2.2 Techniki napowietrzania, znaczenie i rodzaje napowietrzaczy*, *2.3 Metody oczyszczania ścieków*. W podrozdziale *2.1* Autor w sposób logiczny uporządkował wiedzę dotyczącą właściwości fizycznych mieszanin dwufazowych, omawiając zagadnienia prędkości przepływu,

powierzchni międzyfazowej, gęstości mieszanin dwufazowych oraz lepkości mieszaniny ciec-z-gaz. Następnie omówił schemat i struktury przepływów w podnośnikach powietrznych i wyjaśnił sposoby obliczania jednego z parametrów wykorzystywanych w części badawczej pracy tj. sprawności napowietrzania. W podrozdziale 2.2 Doktorant wprowadził czytelnika w tematykę technik napowietrzania zaczynając o wyjaśnienia mechanizmu procesu barbotażu w oparciu o teorię van Krevelena. W tym procesie istotny jest odpowiedni system napowietrzania dlatego wskazano rodzaje napowietrzaczy i wyjaśniono mechanizm ich działania. Omawiając parametry napowietrzania Doktorant szczegółowo opisał równania na podstawie, których obliczał kolejne parametry wykorzystywane w części badawczej pracy tj. zdolność natleniania OC (równanie 2.39), współczynnik wnikania tlenu SOTR (równanie 2.42), efektywność wykorzystania tlenu SOTE (równanie 2.45). W tym podrozdziale opisano również konstrukcje reaktorów barbotażowych oraz charakterystykę stref hydrodynamicznych. Dość obszernie omówiono proces przenikania tlenu analizując parametry napowietrzania, a szczególną uwagę poświęcono zastosowaniu napowietrzania w oczyszczaniu ścieków. Kontynuacja tego tematu znajduje się w podrozdziale 2.3, w którym omówiono skład ilościowo-jakościowy ścieków bytowych, podatność ścieków na oczyszczenie biologiczne głównie w aspekcie usuwania związków węgla i azotu. Doktorant wskazuje na rolę wskaźników ChZT i BZT₅ w ocenie podatności ścieków na rozkład biochemiczny wyjaśniając, że dla ścieków surowych istotna jest znajomość wartości ilorazu ChZT/BZT₅, która określa czy substrat jest łatwo lub trudno rozkładalny. Jednocześnie iloraz BZT₅ do TKN (*Total Kjeldahl Nitrogen*) jest najważniejszym czynnikiem wpływającym na szybkość wzrostu nitryfikantów w mieszanej populacji bakterii nitryfikacyjnych i heteroficznych. Celowość omówienia tych zagadnień jest słuszna ponieważ w części badawczej Doktorant analizuje jakość badanych ścieków i wpływ warunków hydraulicznych w reaktorach barbotażowych między innymi na zmiany związków azotu, ChZT i BZT₅. W końcowej części tego podrozdziału Doktorant scharakteryzował reaktory hybrydowe i podkreślił znaczącą rolę złożeń ruchomych w efektywnym oczyszczaniu ścieków.

Cały rozdział drugi *Przegląd dotychczasowych badań* jest bardzo dobrze skonstruowany. Na podstawie przeglądu literatury wskazano obszary wiedzy, które wymagają szczegółowego rozpoznania i na tej podstawie sformułowano problemy i hipotezy badawcze. Autor pracy postawił sobie za zadanie zmodyfikowanie podnośnika powietrznego w celu podczyszczania i transportu ścieków. Doktorant niesłusznie zatytułował **rozdział 3** *Cel i zakres badań* ponieważ w tym rozdziale przedstawił cele i hipotezy pracy doktorskiej.

Postawiono dwa cele: naukowy i niezwykle ważny cel praktyczny (użyteczny). Celem naukowym była *analiza warunków hydraulicznych pracy podnośników powietrznych i reaktorów barbotażowych, warunków tlenowych w reaktorze barbotażowym bez wypełnienia i z wypełnieniem złożem ruchomym oraz ich wpływu na efektywność usuwania zanieczyszczeń ze ścieków*.

Celem praktycznym było *podczyszczenie ścieków poprzez redukcję zanieczyszczeń organicznych i biogenych przy stężeniu tlenu rozpuszczonego min. 1 mg O₂/dm³ dla najkorzystniejszego wariantu konstrukcji reaktora*.

Sformułowano zostały trzy hipotezy badawcze:

1. Zainstalowanie dodatkowego króćca w podnośniku wodno – powietrznym wpływa na cyrkulację cieczy, zdolność natleniania i stężenie tlenu w reaktorze oraz wysokość podnoszenia cieczy.
2. Wypełnienie reaktora kształtkami o powierzchni właściwej $350 \text{ m}^2/\text{m}^3$ wpłynie korzystnie na czas zatrzymania tlenu w reaktorze, a zarazem poprawi zdolność natleniania i efektywność natleniania cieczy w reaktorze barbotażowym.
3. Skuteczność napowietrzania i usuwania zanieczyszczeń ze ścieków zależy od warunków hydraulicznych i tlenowych w reaktorze, wynikających z jego konstrukcji (położenie króćca i wypełnienie złożem ruchomym).

Tezy i cel pracy są jasno sformułowane i uzasadnione nie tylko przesłankami naukowymi ale odpowiadają współczesnemu zapotrzebowaniu na innowacyjne rozwiązania technologiczne umożliwiające coraz bardziej efektywne oczyszczanie ścieków.

W sposób przejrzysty i czytelny jest przygotowany **rozdział 4** zatytułowany *Metodyka badań*. Zaplanowane badania są bardzo szczegółowe i układają się w logiczną całość, obejmując część laboratoryjną, a następnie weryfikację otrzymanych wyników w warunkach terenowych. Część pierwsza pracy dotyczyła badań hydraulicznych i technologicznych podnośnika powietrznego prowadzonych w laboratorium. Podzielono ją na 3 etapy. Etap L1 składał się z trzech serii mających na celu:

- wyznaczenie wydajności podnośnika powietrznego w zależności od natężenia doprowadzanego powietrza Q_p i wysokości podnoszenia podnośnika H_t (Seria I),
- ocenę wpływu położenia króćca do recyrkulacji i napowietrzania w reaktorze barbotażowym na jego wydatek Q_w i wysokość podnoszenia H_t (Seria II),
- wybór najkorzystniejszego wariantu konstrukcji podnośnika powietrznego metodą przeglądu zupełnego (Analiza I),

Etap L2 składał się z trzech serii badań dotyczących:

- wpływu wypełnienia reaktora barbotażowego złożem ruchomym na hydraulikę pracy wytypowanych wcześniej konstrukcji podnośnika powietrznego (Seria III),
- wyznaczenia natężenia przepływu powietrza w instalacji reaktora, w zależności od położenia króćca H i wypełnienia złożem ruchomym W (Seria IV),
- wyznaczenia parametrów mieszaniny dwufazowej (Analiza II).

Etap L3 obejmował badania technologiczne reaktora barbotażowego przeprowadzone dla położenia króćca napowietrzającego w wysokości H_{34} i H_{84} (cm). Badania miały na celu ocenę wpływu położenia króćca H do cyrkulacji i napowietrzania na warunki tlenowe w reaktorze oraz określenie wpływu wypełnienia reaktora złożem W na warunki tlenowe. Do oceny proces napowietrzania wykorzystywano następujące parametry:

- zdolność natleniania OC ,
- współczynnik wnikania tlenu $SOTR_{20}$ (*Standard Oxygen Transfer Rate*),
- efektywność wykorzystania tlenu $SOTE$ (*Standard Oxygen Transfer Efficiency*),
- efektywność natleniania EN (ekonomia natleniania).

Druga część badań określana jako *Instalacja terenowa* obejmowała badania technologiczne reaktora wykonanego w skali półtechnicznej w terenowej stacji badawczej. Badania terenowe wykonano w dwóch etapach (T1 i T2) pracy urządzenia.

Etap T1 przeprowadzono w wybudowanej instalacji terenowej reaktora zlokalizowanej na stacji badawczej Katedry Inżynierii Wodnej i Sanitarnej Uniwersytetu Przyrodniczego w Poznaniu w miejscowości Tadeuszewo (gmina Środa Wlkp.) do oczyszczania ścieków pochodzących z indywidualnych gospodarstw.

Etap T2 przeprowadzono w wybudowanej instalacji terenowej modelu zlokalizowanej na terenie Lewobrzeżnej Oczyszczalni Ścieków w Poznaniu wykorzystującej reaktor zbudowany analogicznie do instalacji terenowej T1, który był zasilany ściekami dopływającymi do miejskiej oczyszczalni.

W celu kontroli działania pracy modelu reaktora barbotażowego i oceny skuteczności usuwania zanieczyszczeń analizowano jakość ścieków. Materiałem badawczym były próbki ścieków doprowadzanych do instalacji po reaktorze oraz po osadniku wtórnym. Ocenę składu ścieków wykonano zgodnie z obowiązującym Rozporządzeniem Ministra Środowiska i oznaczano: pH, temperaturę, zawiesinę ogólną (ZO), TKN, potencjał Redox, BZT₅ i ChZT, azot amonowy (N-NH₄⁺), azot azotynowy (N-NO₂⁻), azot azotanowy (N-NO₃⁻) oraz fosforany (P-PO₄⁻³).

Analiza parametrów hydraulicznych i technologicznych podnośnika powietrznego oraz wskaźników fizyczno-chemicznych ścieków była prowadzona przez Doktoranta wnikliwie, ze znajomością obowiązujących procedur analitycznych. Przeprowadzona analiza statystyczna wyników umożliwiła sprawdzenie współzależności pomiędzy badanymi zmiennymi. Stwierdzam, że zastosowane metody są nowoczesne i kompleksowe, a ich wykonanie nie budzi zastrzeżeń.

W **rozdziale 5** Doktorant prezentuje wyniki przeprowadzonych badań i ich dyskusje. Forma prezentacji jest bardzo czytelna, opis wyników jasny i uporządkowany. Zawarte w niej wykresy jednoznacznie wyjaśniają otrzymane zależności. Uzyskane wyniki dobrze dokumentują złożony charakter zagadnień stanowiący przedmiot rozprawy. Przy tak obszernych badaniach i dużej liczbie otrzymanych wyników bardzo cenne dla czytelnika są podsumowania rezultatów po etapie badań hydraulicznych, technologicznych i terenowych. W podrozdziale **5.1** omówiono wyniki badań laboratoryjnych. Na podstawie przeprowadzonych badań hydraulicznych nad podnośnikiem powietrznym Doktorant wykazał zależność wydajności podnośnika od wysokości podnoszenia oraz ilości natężenia doprowadzanego powietrza i wyznaczył maksymalne wartości wydajności przy określonym natężeniu doprowadzanego powietrza. W tej części pracy Doktorant określił również natężenia strumieni powietrza w instalacji podnośnika powietrznego w reaktorze i największy zakres prędkości rzeczywistych cieczy w podnośniku powietrznym.

Na podstawie otrzymanych wyników Doktorant skonstruował model teoretyczny przepływu cieczy w podnośniku powietrznym z króćcem i ustalił kierunki przepływu cieczy w zależności od warunków hydraulicznych.

Podczas badań technologicznych wykazał wpływ wypełnienia złożem na warunki tlenowe w reaktorze w zależności od czasu aeracji. Ustalił optymalną wysokość króćca zainstalowanego w reaktorze z wypełnionego złożem ruchomym. Dla opracowanej konstrukcji króćca wyznaczył wartości maksymalnej zdolności natleniania OC_0 oraz $SOTR$ i $SOTE$. W podrozdziale **5.2** Doktorant prezentuje wyniki badań terenowych Etapu T1 (reaktor pracował jako urządzenie do oczyszczania ścieków pochodzących z indywidualnych gospodarstw) oraz

Etapu T2 (reaktor pracował na ściekach z kanalizacji miejskiej po oczyszczeniu mechanicznym). Na podstawie wyników badań Etapu T1 w systemie napowietrzania wykazano zbliżony rozkład tlenu na tej samej głębokości reaktora natomiast na różnych głębokościach reaktora był zróżnicowany. Maksymalne wartości stężeń tlenu uzyskiwano na poziomie zwierciadła ścieków. Uzyskane średnie wartości stężenia tlenu w reaktorze w systemie napowietrzania ciągłego, były powyżej wartości literaturowych niezbędnych do redukcji związków azotu w procesie nityfikacji. Dobranie odpowiednich parametrów hydraulicznych i technologicznych reaktora pracującego jako urządzenie do oczyszczania ścieków pochodzących z indywidualnych gospodarstw stworzyło dobre warunki tlenowe dla oczyszczania ścieków. Wskaźniki zanieczyszczeń ChZT i BZT₅ dla ścieków oczyszczonych osiągały wartości umożliwiające ich bezpośrednie odprowadzenie do wód zgodnie nowym Rozporządzeniem Ministra Środowiska z dnia 18 listopada 2014 r. (Dz.U. 2014 poz. 1800) dla RLM<2000. Stopień redukcji ChZT i BZT₅ w reaktorze był wyższy dla systemu napowietrzania ciągłego, w porównaniu do przemiennego. Uzyskano niską wartość ilorazu C/N w ściekach opływających do reaktora, która poprawiła sprawność usuwania związków azotu ze ścieków. Wyniki badań Etapu T2 pozwoliły Doktorantowi na wybór systemu napowietrzania reaktora i jego optymalizację pracy w systemie napowietrzania ciągłego, przy dwóch różnych wysokościach położenia króćca H. Wykazano, że lepszą redukcję ChZT i BZT₅ w czasie pracy reaktora uzyskano dla położenia króćca H34 odpowiednio o 33 i 50% natomiast duże zużycie chwilowe tlenu w ściekach i jego niskie stężenie spowodowały bardzo małą redukcję związków azotu.

Zakończenie rozprawy stanowią podsumowania i wnioski (**rozdziały 6 i 7**), w których Doktorant na podstawie przeprowadzonych badań sformułował 6 wniosków. Zostały one precyzyjnie zredagowane, są zgodne z tezami pracy i świadczą o realizacji badań w pełnym zakresie w stosunku do zaplanowanych prac.

4. Uwagi redakcyjne

Praca jest starannie przygotowana pod względem redakcyjnym chociaż są drobne błędy edycyjne szczególnie w Bibliografii, w której Autor nie zachował jednolitego zapisu pozycji literaturowych. Na podkreślenie zasługuje przejrzysta prezentacja wyników badań, bardzo dobrze udokumentowanych licznymi wykresami różnych zależności i zestawieniami tabelarycznymi.

5. Podsumowanie

Reasumując merytoryczną ocenę rozprawy stwierdzam, że Pan mg inż. Sebastian Kujawiak zaplanował i przeprowadził kompleksowe badania, które mają zarówno charakter naukowy, poznawczy jak i użytkowy. Tezy pracy zostały określone prawidłowo i wynikające z nich założenia osiągnięto w trakcie realizacji pracy. Rozprawa zawiera materiał badawczy, który wymagał znacznego zaangażowania Doktoranta zarówno podczas opracowania literaturowego jak i opanowania technik laboratoryjnych oraz prac w warunkach terenowych. Doktorant wykazał więc umiejętność samodzielnego prowadzenia badań i interpretacji wyników. Rezultaty badań w sposób znaczący poszerzają wiedzę dotyczącą efektywnego oczyszczania

ścieków. Za niezwykle wartościowy walor rozprawy należy uznać nowatorskie badania w zakresie zmodyfikowania podnośnika powietrznego i dostosowania go do warunków pracy reaktorów barbotażowych. Znaczący dla pracy jest fakt, że przedstawiony w pracy reaktor został zgłoszony jako prototyp urządzenia do Urzędu Patentowego RP pt. „Instalacja do transportu, napowietrzania i oczyszczania ścieków, zwłaszcza bytowych” nr P.414127 w 2015 roku i jest w trakcie oceny merytorycznej.

6. Uwagi szczegółowe

1. W pracy stosowano zapis wskaźników jako: N-NH₄, N-NO₃, N-NO₂, podobnie w tabeli 5.4 oraz ryc. 5.45. Poprawny zapis to: N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, N-NO₂⁻. Autor podaje średnie wartości wskaźników zanieczyszczeń w ściekach surowych jako: PO₄, NO₂, NO₃, NH₄, które wg nomenklatury chemicznej są zapisane niepoprawnie.
2. W przeglądzie literatury zwraca uwagę cytowanie stosunkowo starszych pozycji literaturowych wydanych w latach 1950-1989, które stanowią około 28% prezentowanej bibliografii, warto zastąpić je nowszą literaturą.
3. W tabelach 2.7 oraz 2.8 Autor podaje sformułowanie odczyn pH. Jest to błędne określenie. Proszę o komentarz.
4. W opisie procedury badawczej charakteryzując materiał badawczy dla kompletności wyników przedstawia się miejsce i częstotliwość poboru próbki, wielkość próbki i jej reprezentatywność. Niestety te procedury nie zostały omówione w pracy. Proszę o uzupełnienie w czasie publicznej rozprawy doktorskiej.
5. Jak wyznaczano zawiesinę mineralną i zawiesinę organiczną?
6. Czy rekomendowane w pracy rozwiązanie zastosowania zmodyfikowanego podnośnika powietrznego reaktora barbotażowego do oczyszczania ścieków można ocenić z punktu widzenia korzyści finansowych?

WNIOSEK KOŃCOWY

Przedłożona do oceny praca Pana mgr inż. Sebastiana Kujawiaka pt. *Wpływ warunków hydraulicznych w reaktorach barbotażowych ze złożem ruchomym na efektywność oczyszczania ścieków* stanowi znaczące, wartościowe osiągnięcia Autora i wnosi oryginalny wkład do rozwoju wiedzy o innowacyjnym wykorzystaniu reaktorów barbotażowych do oczyszczania ścieków.

Rozprawa spełnia w mojej ocenie wymagania stawiane rozprawom doktorskim zawarte w art. 13 ust. 1 Ustawy z dnia 14 marca 2003 z późniejszymi zmianami, o stopniach naukowych, tytule naukowym oraz stopniach i tytułach z zakresie sztuki (jedn. Tekst Dz. U. Nr 84 poz. 455 (2011)). Wobec powyższego wnioskuję o dopuszczenie Pana mgr inż. Sebastiana Kujawiaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Częstochowa, 22.05.2018 r.