POLITECHNIKA GDAŃSKA
WYDZIAŁ INŻYNIERII LĄDOWEJ I ŚRODOWISKA

UCZELNIA BADAWCZA
INICJATYWA DOSKONAŁOŚCI

Prof. dr hab. inż. Ewa Wojciechowska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
Politechnika Gdańska
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
ewa.wojciechowska@pg.edu.pl

Gdańsk, 23.08.2023

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Kamila Łukasza Bryszewskiego pt. „Efektywność oczyszczania ścieków z uprawy bezglebowej w sekwencyjnym reaktorze porcjowym z błoną biologiczną (SBBR) z zastosowaniem stałego prądu elektrycznego"

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Joanna Rodziewicz, prof. UWM
Promotor pomocniczy: dr inż. Artur Mielczarek

1. Podstawa formalna

Podstawą formalną sporządzenia recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, prof. dr hab. inż. Marcina Dębowskiego z dnia 11.07.2023 r. oraz towarzysząca mu umowa o dzieło na sporządzenie recenzji.

Recenzja została opracowana zgodnie z wymaganiami określonymi w Art. 179 ust. 1 Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1669, z późn. zmianami).

2. Ocena układu rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do oceny rozprawa liczy 133 strony. Struktura i układ pracy są typowe dla rozpraw doktorskich. Praca została podzielona na dziewięć rozdziałów. Trzy pierwsze rozdziały zawierają wprowadzenie oraz przegląd literatury. W tej części pracy Doktorant wskazał istotność podjętego problemu badawczego oraz syntetycznie i rzeczowo omówił najważniejsze zagadnienia badawcze powiązane z tematyką rozprawy, wykazując rozległą wiedzę zarówno w tematyce upraw bezglebowych i problematyki powstających w nich ścieków, jak i zastosowania metod bioelektrochemicznych do usuwania azotu i fosforu ze ścieków. W rozdziale 4 sformułowano cel i zakres pracy. Zasadniczą część rozprawy stanowią rozdziały 5 i 6, które

zawierają odpowiednio omówienie metodyki badań oraz omówienie wyników i ich dyskusję. W rozdziale 7 przedstawiono koncepcję zastosowania reaktora porcjowego z błoną biologiczną do oczyszczania ścieków szklarniowych. W rozdziale 8 zawarto wnioski, których jest trzydzieści. Wydaje się, że celowe byłoby wyodrębnienie w tej części kilku wniosków ogólnych, bezpośrednio odnoszących się do tez pracy oraz wniosków szczegółowych. Rozdział 9 zawiera spis literatury, obejmujący 206 pozycji, w większości w języku angielskim. Cytowane w pracy piśmiennictwo jest dobrane adekwatnie do jej tematyki. Większość cytowanych prac to pozycje z ostatnich 5-10 lat. Dobór piśmiennictwa świadczy o bardzo dobrej orientacji Doktoranta w aktualnej literaturze przedmiotu i umożliwia porównanie wyników przeprowadzonych w pracy eksperymentów z innymi pracami. Rozprawa zawiera także spis tabel, spis rysunków oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Badania wykonane w pracy doktorskiej zostały sfinansowane z projektu badawczego w ramach programu Lider X nr umowy LIDER/4/2019/L-10/18/NCBR/2019.

3. Ocena celu pracy i zastosowanej metodyki badawczej

Tematyka badawcza podjęta w rozprawie jest ważna i aktualna. Uprawy bezglebowe są odpowiedzią na wzrost zapotrzebowania na żywność spowodowany rosnącą liczbą ludności oraz na zmiany klimatu. Z roku na rok produkcja żywności tymi metodami wzrasta, a Polska należy do europejskich liderów w tym zakresie. Ze względu na ochronę zasobów wodnych ważne jest wprowadzenie skutecznych metod oczyszczania ścieków z tego rodzaju upraw, a w szczególności dążenie do zamknięcia obiegu wody w uprawach bezglebowych. Charakterystyczną cechą ścieków pochodzących z upraw bezglebowych jest niski stosunek C/N oraz wysoka zawartość azotanów (V), co utrudnia ich oczyszczanie na drodze heterotroficznej denitryfikacji. W ocenianej rozprawie doktorskiej przedstawiono kompleksowe badania nad wykorzystaniem sekwencyjnego reaktora porcjowego z błoną biologiczną (SBBR) z zastosowaniem stałego prądu elektrycznego do oczyszczania ścieków z bezglebowej uprawy pomidorów.

W swojej rozprawie, mgr inż. Kamil Bryszewski postawił sobie za cel określenie wpływu, dawki i sposobu dozowania zewnętrznego źródła węgla organicznego oraz prądu stałego na efektywność procesów biologicznych i elektrochemicznych zachodzących podczas oczyszczania ścieków z bezglebowej uprawy pomidorów w sekwencyjnym reaktorze porcjowym z błoną biologiczną (SBBR). W rozprawie postawiono dwie hipotezy, z których pierwsza zakłada, że rodzaj, dawka i sposób dozowania zewnętrznego źródła węgla organicznego ma wpływ na sprawność oczyszczania ścieków z uprawy bezglebowej w SBBR. Druga z hipotez zakłada, że zastosowanie procesów elektrochemicznych wraz z procesami biologicznymi zwiększy efektywność usuwania związków azotu i fosforu ze ścieków.

Prace badawcze podzielono na kilka etapów, w których analizowano wpływ poszczególnych czynników na przebieg procesów biologicznych i elektrochemicznych. Do analizowanych zmiennych należały: rodzaj substratu organicznego (kwas octowy lub octan sodu), jego dawka, sposób dozowania (Etapy I i IIa), gęstość prądu elektrycznego i czas jego oddziaływania (Etapy I i IIb). Analizowano również wpływ rozdzielenia procesów biologicznych i elektrochemicznych oraz ich kolejności na efektywność usuwania związków azotu i fosforu ze

POLITECHNIKA GDAŃSKA
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
tel. +48 58 347 27 93
fax: +48 58 347 24 21
e-mail: ewa.wojciechowska@pg.edu.pl
www.pg.edu.pl

ścieków oraz na wykorzystanie substratu organicznego (Etap III a i b). Ideę i przebieg kolejnych etapów badań zilustrowano schematycznie na Rys. 4-8, które stanowią dużą pomoc dla czytelnika rozprawy. Zabrakło natomiast ogólnego schematu, który prezentowałby całą koncepcję badań i przepływ informacji pomiędzy poszczególnymi etapami. Przyjęty w rozprawie tok postępowania wymagał bardzo przemyślanego zaplanowania prac eksperymentalnych i pozwolił na całościową ocenę znaczenia poszczególnych czynników warunkujących przebieg procesów oczyszczania ścieków z bezglebowej uprawy pomidorów w reaktorach SBBR z zastosowaniem stałego prądu elektrycznego, a także wybór najlepszych warunków dla efektywnego usuwania azotu i fosforu, przy jednocześnie zachowaniu dużej sprawności wykorzystania substratu organicznego.

Badania prowadzono w laboratoryjnych reaktorach SBBR o objętości czynnej 2 litry. Wewnątrz reaktorów zainstalowano anodę wykonaną z żelaza, natomiast katodę stanowiły tarcze ze stali nierdzewnej zamontowane na obracającym się pionowym wale. Elektrody podłączono do źródła prądu stałego. W badaniach wykorzystano rzeczywiste ścieki z bezglebowej uprawy pomidorów na wełnie mineralnej, co uważam za dużą zaletę, chociaż wiązało się to z pewną nieuniknioną zmiennością składu ścieków pomiędzy poszczególnymi etapami badań. Zastosowany układ badawczy umożliwiał współwystępowanie procesów denitryfikacji hydrogenotroficznej i heterotroficznej, elektrochemicznej redukcji azotanów (V) i elektrokoagulacji związków fosforu.

Układ badawczy oraz zastosowana metodyka badań nie budzą zastrzeżeń. Proszę natomiast o doprecyzowanie jak długo trwały badania w poszczególnych etapach? Czy były to eksperymenty jednorazowe, czy też badania powtarzano, a jeśli tak to ilokrotnie. Jaka była temperatura pomieszczenia oraz temperatura ścieków doprowadzanych do reaktorów SBBR? Należałoby również podać warunki transportu i przechowywania, w tym czas przechowywania, ścieków z bezglebowej uprawy pomidorów, które wykorzystano w badaniach.

4. Ocena wyników badań

Wyniki badań wraz z dyskusją przedstawiono w rozdziale 6. W Etapie I określono wpływ rodzaju i dawki zewnętrznego źródła węgla organicznego oraz samego prądu stałego na usuwanie związków azotu i fosforu ze ścieków. W przypadku reaktorów biologicznych analizowano dwa substraty organiczne, każdy w trzech różnych dawkach wyrażonych stosunkiem C/N równym 1, 1,5 oraz 2. Natomiast w przypadku reaktorów elektrochemicznych badano gęstości prądu stałego wynoszące 0,4 A/m^2, 1,2 A/m^2 oraz 2,0 A/m^2. W reaktorach biologicznych dla obu analizowanych substratów organicznych stwierdzono istotny wpływ zastosowanej dawki na stężenie związków organicznych w ściekach oczyszczonych. Uzyskano bardzo wysokie sprawności usuwania azotu ogólnego, przy czym były one wyższe w przypadku zastosowania octanu sodu. Najniższe stężenia azotu ogólnego w oczyszczonych ściekach odnotowano dla dawki C/N równej 2 dla obu substratów organicznych. Większą szybkość denitryfikacji stwierdzono w przypadku dozowania octanu sodu niż kwasu octowego, co Doktorant tłumaczy inhibicyjnym działaniem obniżonego przez kwas octowy pH na początku każdego cyklu. W reaktorach biologicznych uzyskano również bardzo wysokie sprawności usuwania fosforu ogólnego.

POLITECHNIKA GDAŃSKA
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
tel. +48 58 347 27 93
fax: +48 58 347 24 21
e-mail: ewa.wojciechowska@pg.edu.pl
www.pg.edu.pl

W reaktorach elektrochemicznych, bez dodatku źródła węgla, usuwanie azotu przebiegało na drodze elektrochemicznej redukcji azotanów na katodzie i desymilacyjnej redukcji azotu azotanowego (V) do azotu amonowego. Zaobserwowano istotny wpływ gęstości prądu elektrycznego na stężenie związków organicznych w oczyszczonych ściekach. Szybkość usuwania azotu wzrastała wraz ze wzrostem gęstości prądu elektrycznego, zaś najbardziej korzystną gęstością prądu stałego z punktu widzenia usuwania fosforu ogólnego było 1,2 A/m^2. W przypadku zwiększenia gęstości prądu do 2,0 A/m^2 nie uzyskano istotnego spadku stężenia fosforu ogólnego w oczyszczanych ściekach.

Na podstawie wyników Etapu I stwierdzono, że odpowiednia dawka obu substratów organicznych z punktu widzenia stężeń azotu ogólnego i związków organicznych w ściekach oczyszczonych wynosi C/N 1,5. Taka dawka została zastosowana w kolejnych etapach badań.

W Etapie IIa określono wpływ sposobu dawkowania substratu organicznego do reaktora biologicznego na efektywność oczyszczania ścieków, przyjmując trzy sposoby dozowania. Najwyższe szybkości reakcji uzyskano przy dawkowaniu 100% substratu na początku cyklu i ten wariant dozowania zastosowano w dalszych badaniach.

W Etapie IIb badano wpływ czasu oddziaływania prądu stałego na procesy usuwania zanieczyszczeń w reaktorach bioelektrochemicznych, w których zastosowano dawkę węgla wynoszącą C/N 1,5 oraz dozowanie całości substratu na początku cyklu. Zastosowano trzy warianty czasowe oddziaływania prądu. Odnotowano bardzo wysoką efektywność wykorzystania związków organicznych reaktorach z octanem sodu, niezależnie od wariantu oddziaływania prądu elektrycznego. Natomiast sprawność wykorzystania związków organicznych w reaktorach z kwasem octowym była niższa, zwłaszcza wówczas gdy zastosowano 24 godzinny cykl oddziaływania prądu. Ograniczenie efektywności wykorzystania związków organicznych Doktorant wytłumaczył spadkiem pH, który był spowodowany zarówno dozowaniem kwasu octowego jak i przepływem prądu. W rezultacie, pH uzyskane reaktorach, do których dawkowano kwas octowy było poza zakresem optymalnym dla procesu denitryfikacji heterotroficznej. Wykazano, że czas oddziaływania prądu stałego miał istotne znaczenie dla usuwania związków azotu, niezależnie od zastosowanego substratu, a najniższe sprawności uzyskano w przypadku 24 godzinnego oddziaływania prądu elektrycznego. Najwyższe skuteczności usuwania fosforu otrzymano stosują prąd elektryczny przez pierwsze 12 godzin cyklu.

W III Etapie prac badano wpływ kolejności procesów biologicznych i elektrochemicznych na efektywność usuwania związków azotu i fosforu ze ścieków. Stwierdzono, że kolejność procesów istotnie wpływała na stężenie związków organicznych w ściekach oczyszczonych w przypadku obu substratów. Wyższą skuteczność usuwania azotu ogólnego uzyskano stosując w pierwszej kolejności reaktor elektrochemiczny, a potem biologiczny. Jedynie rozdzielenie procesów umożliwiło uzyskanie stężenia fosforu w ściekach oczyszczonych poniżej 3 mg/L.

Oprócz analizy efektywności oczyszczania ścieków w kolejnych etapach badano również wpływ zastosowanych wariantów na pH, przewodność elektrolityczną i stężenie żelaza w oczyszczonych ściekach, co ma duże znaczenie dla ewentualnego zastosowania układu

POLITECHNIKA GDAŃSKA
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
tel. +48 58 347 27 93
fax: +48 58 347 24 21
e-mail: ewa.wojciechowska@pg.edu.pl
www.pg.edu.pl

zamkniętego w uprawach bezglebowych. Autor przeanalizował również ilość i jakość osadów ściekowych powstających w kolejnych etapach badawczych.

Uzyskane w pracy wyniki są interesujące i stanowią oryginalne rozwiązanie problemu badawczego, a także w pełni potwierdzają postawione w pracy hipotezy. Równolegle z omówieniem wyników, Autor rozprawy odnosi się do piśmiennictwa, cytując liczne prace naukowe, co dowodzi bardzo dobrej orientacji w tematyce badawczej. W pracy wykazano, że w reaktorze SBBR z zastosowaniem prądu stałego można uzyskać bardzo wysoką skuteczność usuwania azotu ogólnego i fosforu ogólnego ze ścieków pochodzących z bezglebowej uprawy pomidorów. Z uwagi na fakt, że zaproponowany sposób oczyszczania jest złożony i opiera się na wielu zmiennych, wyniki uzyskane w rozprawie doktorskiej pozwalają jednoznacznie wskazać czynniki o największym znaczeniu dla skuteczności usuwania zanieczyszczeń (np. dawka źródła węgla, gęstość prądu, kolejność zastosowania procesów biologicznych i elektrochemicznych).

W rozdziale 7 rozprawy Doktorant zaproponował koncepcję układu technologicznego zastosowania reaktora SBBR do oczyszczania ścieków szklarniowych. Dopiero w tym rozdziale Autor odnosi się do wymagań stawianych ściekom szklarniowym, zaznaczając przy tym, że obecnie są one dość ogólne oraz brak jest zaleceń dotyczących ponownego wykorzystania pożywki, co przeważnie skutkuje jej całkowitą wymianą i odprowadzeniem zużytej pożywki do środowiska. Układ technologiczny został zaproponowany w oparciu o wyniki prac laboratoryjnych i z pewnością wymagałby przed wdrożeniem przeprowadzenia dodatkowych testów w większej skali. Dodatkowo, rozważając w przyszłości możliwość wprowadzenia zamkniętego obiegu pożywki, nieodzownym elementem wydaje się sprawdzenie wpływu oczyszczonych ścieków na plon uprawy pomidorów.

W trakcie czytania pracy nasunęło mi się klika pytań oraz uwag do dyskusji, które przedstawiam poniżej:

- Czy na podstawie przeprowadzonych w kolejnych etapach badań można jednoznacznie wskazać, które z zastosowanych źródeł węgla jest bardziej korzystne z punktu widzenia jakości oczyszczanych ścieków, a także możliwości ich recyrkulacji do bezglebowej uprawy pomidorów?
- Dlaczego wśród analizowanych parametrów pracy reaktorów biologicznych nie uwzględniono czasu zatrzymania ścieków? Dopiero w rozdziale 7 Autor wskazuje, że przy rozdzieleniu procesów elektrochemicznych i biologicznych zastosowany czas zatrzymania w reaktorze biologicznym wynoszący 12 godzin jest zbyt krótki i w rezultacie w odpływie znajdują się wysokie stężenia związków organicznych.
- Wydaje się, że gęstość prądu 1,2 A/m^2 została dość arbitralnie uznana za najbardziej korzystną, bez zbadania gęstości pośrednich z przedziału pomiędzy 0,4 A/m^2 a 1,2 A/m^2.
- Czy w ocenie Autora możliwe byłoby w przyszłości zastosowanie badanej metody oczyszczania ścieków z upraw bezglebowych do wprowadzenia zamkniętego obiegu pożywki?

POLITECHNIKA GDAŃSKA
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk
tel. +48 58 347 27 93
fax: +48 58 347 24 21
e-mail: ewa.wojciechowska@pg.edu.pl
www.pg.edu.pl

- Do jakich innych rodzajów ścieków oprócz upraw bezglebowych i szklarniowych można by było zastosować metodę bioelektrochemiczną?

Ze względu na dużą szczegółowości planu badawczego, liczne warianty eksperymentów i ich drobiazgową dyskusję, w pracy nieco zabrakło podsumowania, które powinno uwypuklić najbardziej istotne osiągnięcia pracy. Wspomniane już wcześniej wnioski w liczbie 30 są również za bardzo szczegółowe i korzystniej byłoby wyodrębnić najważniejsze wnioski o charakterze ogólnym.

Uwagi o charakterze redakcyjnym

- Tytuł rozdziału 4 powinien mieć brzmienie „Metodyka badań" zamiast „Metodyka". Z kolei rozdział 5 powinien nosić tytuł „Wyniki badań i dyskusja" a nie „Omówienie i dyskusja wyników".
- W rozdziale 6, w podpunktach 6.1 – 6.4 Doktorant omawia kolejne etapy eksperymentu. Kolejne etapy powinny być w bardziej wyraźny sposób rozgraniczone graficznie, np. poprzez zastosowanie pogrubienia lub większego odstępu.
- Zastanawia mnie, z jakiego powodu Autor nie zdecydował się na zastosowanie wykresów w kolorze. Zastosowanie różnych kolorów np. dla różnych reaktorów lub dla różnych źródeł węgla mogłoby znacznie ułatwić odbiór pracy.

5. Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Kamila Łukasza Bryszewskiego pt. „Efektywność oczyszczania ścieków z uprawy bezglebowej w sekwencyjnym reaktorze porcjowym z błoną biologiczną (SBBR) z zastosowaniem stałego prądu elektrycznego" stanowi oryginalne rozwiązanie problemu badawczego, a uzyskane wyniki są interesujące i mają znaczenie praktyczne. Praca wnosi nowe wartości poznawcze, a jej wyniki poszerzają wiedzę w zakresie bioelektrochemicznego oczyszczania ścieków z upraw bezglebowych. Doktorant wykazał rozległą wiedzę ogólną oraz znajomość aktualnych trendów badań realizowanych w kraju i zagranicą. Zakres i złożoność przeprowadzonych prac eksperymentalnych w pełni potwierdzają, że mgr inż. Kamil Łukasz Bryszewski posiada zdolność samodzielnego planowania i prowadzenia prac naukowych. Rozprawa doktorska spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz.U. nr 65 poz. 595 z późn. zmianami). Wobec powyższego wnioskuję do Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie o dopuszczenie Pana mgr inż. Kamila Łukasza Bryszewskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Ewa Wojciechowska

Prof. dr hab. inż. Ewa Wojciechowska

POLITECHNIKA GDAŃSKA
ul. G. Narutowicza 11/12
80-233 Gdańsk

tel. +48 58 347 27 93
fax: +48 58 347 24 21
e-mail: ewa.wojciechowska@pg.edu.pl
www.pg.edu.pl