

prof. dr hab. Agata Rosińska  
Wydział Infrastruktury i Środowiska  
Katedra Inżynierii Środowiska i Biotechnologii  
Politechnika Częstochowska  
42-200 Częstochowa, ul. Brzeźnicka 60a

Częstochowa, 12.12.2023 r.

**Recenzja rozprawy doktorskiej  
mgr inż. Roberta Kowalika  
pt. „Model specjacyjny w analizie ryzyka translokacji metali ciężkich  
w osadach ściekowych”**

**1. Podstawa formalna sporządzenia recenzji**

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr inż. Roberta Kowalika wykonana na Wydziale Inżynierii Środowiska, Geodezji i Energetyki Politechniki Świętokrzyskiej pod kierunkiem Promotora rozprawy dr hab. inż. Jarosława Gawdzika, prof. Politechniki Świętokrzyskiej.

Podstawą formalną recenzji jest pismo Zastępcy Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka dr hab. inż. Łukasza Ormana, prof. PŚk, z dnia 30 października 2023 r. znak IAA-002-12/2023, informującego o powołaniu mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Roberta Kowalika pt. „Model specjacyjny w analizie ryzyka translokacji metali ciężkich w osadach ściekowych” oraz na podstawie Uchwały nr 32/2023 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka w Politechnice Świętokrzyskiej z dnia 25 października 2023 r. i umowy o dzieło nr IAA-D-14/2023.

**2. Przedstawienie podstawowych danych o kandydacie**

Pan mgr inż. Robert Kowalik tytuł zawodowy magistra inżyniera Inżynierii Środowiska, w specjalności Zaopatrzenie w Wodę, Unieszkodliwianie Ścieków i Odpadów uzyskał w 2017 roku broniąc pracę pt. „Projekt koncepcyjny przebudowy osadnika Imhoffa na reaktor ABR, na przykładzie oczyszczalni ścieków w Pińczowie”.

Analizując przedstawione w autoreferacie osiągnięcia naukowo-zawodowe Pana mgr inż. Roberta Kowalika należy stwierdzić, że dotyczą one gospodarki osadami ściekowymi, zanieczyszczeniami gleb metalami ciężkimi, odzyskiem ciepła ze ścieków oraz

wykorzystaniem wodoru. Kandydat jest autorem i współautorem 33 artykułów i prac, w tym 27 publikacji z listy A MEiN/MNiSW o sumarycznej liczbie punktów równej 1970, a z uwzględnieniem współautorstwa 768 punktów. Sumaryczny IF wynosi 49,324. Kandydat swoje prace opublikował w znanych czasopismach takich jak np.: International Communications in Heat and Mass Transfer (140 pkt.), International Journal of Environmental Research and Public Health (140 pkt.), Applied Sciences (100 pkt.), Desalination and Water Treatment (100 pkt.), Water (100 pkt.). Pan mgr inż. Robert Kowalik brał udział w 11 konferencjach i 4 szkoleniach. Wykonał 11 recenzji artykułów do czasopism MDPI takich jak: Applied Sciences, International Journal of Environmental Research and Public Health. W 2023 roku Pan mgr inż. Robert Kowalik przygotował rozprawę doktorską pt. „Model specjacyjny w analizie ryzyka translokacji metali ciężkich w osadach ściekowych”. Kandydat nie ubiegał się uprzednio o nadanie stopnia doktora.

Od 2019 roku do chwili obecnej Kandydat jest członkiem Polskiego Zrzeszenia Inżynierów i Techników Sanitarnych Oddział w Kielcach. W kwietniu 2023 roku odbył dwutygodniową praktykę w ramach programu Erasmus+, podczas której brał udział w szkoleniu w zakresie wykorzystania kuli do badania prędkości laminarnej spalania wodoru i metanu.

### **3. Ocena celowości podjęcia tematu**

Wzrost urbanizacji, rozwój i zastosowanie nowoczesnych, efektywniejszych technologii oczyszczania ścieków stanowią przyczynę systematycznego wzrostu ilości osadów ściekowych, których jakość rzadko odpowiada wymogom ochrony środowiska. Wobec tego problemu istotne jest uzyskanie osadów spełniających określone wymagania jakościowe oraz racjonalne ich zagospodarowanie. Wykorzystanie przyrodnicze i rolnicze osadów ściekowych w pełni wpisuje się w ideę gospodarki o obiegu zamkniętym. Obserwuje się wzrastające zainteresowanie wykorzystaniem osadów ściekowych w rolnictwie ze względu na potrzebę obniżenia kosztów usuwania i recyklingu składników odżywczych w systemie uprawy gleby. W przypadku rolniczego wykorzystania, osady mogą stanowić cenne źródło azotu, fosforu, węgla, materii organicznej oraz makroskładników niezbędnych do prawidłowego rozwoju roślin. Niewątpliwą zaletą takiego zagospodarowania są stosunkowo niskie koszty. Istnieją jednak poważne ograniczenia związane z wykorzystaniem osadów ściekowych ponieważ poza ich zaletami glebotwórczymi oraz właściwościami nawozowymi, charakteryzują się obecnością zanieczyszczeń mikrobiologicznych i chemicznych np. mineralnych (metali ciężkich) oraz związków organicznych, takich jak WWA, PCB czy dioksyny, które stanowią czynnik szkodliwy dla środowiska i żywych organizmów, w tym ludzi. Głównym źródłem metali ciężkich w ściekach doprowadzanych do oczyszczalni miejskich są ścieki przemysłowe, pochodzące m.in. z galwanizerni, garbarni, z zakładów przemysłu samochodowego i lotniczego. Pewne ilości cynku i miedzi mogą być również wymywane z domowych instalacji wodociągowych, a ołów może dostawać się wraz ze splywami ulicznymi. Podczas oczyszczania ścieków zawartość metali ciężkich może ulec zmniejszeniu od 50% do ok. 90%. Usuwane ze ścieków metale ciężkie kumulują się w osadach ściekowych i mogą ujemnie wpływać na aktywność bakterii odpowiedzialnych za procesy biochemicznej przeróbki osadów. Obecność metali ciężkich w osadach ściekowych limituje ich przyrodnicze i rolnicze

wykorzystanie. Transfer metali z osadów ściekowych do łańcucha pokarmowego następuje przez rośliny uprawiane na glebach nawożonych tymi osadami. Pomimo, że pewne metale (w tym metale ciężkie) w ilościach śladowych (makro i mikroelementy) są niezbędne do metabolizmu roślin i zwierząt, to jednak w stężeniach ponadnormatywnych mogą wykazywać działanie toksyczne i stanowić zagrożenie zarówno dla roślin, zwierząt jak i ludzi. Metale w środowisku wykazują dużą trwałość oraz wysoki poziom bioakumulacji. W związku z ich znikomym stopniem degradacji, raz wprowadzone do środowiska pozostają w nim i oddziałują przez długi czas. Metale ciężkie mogą migrować pomiędzy warstwami gleby, przenikając do wód gruntowych i powierzchniowych, a w konsekwencji do roślin, które poprzez spożycie stanowią źródło tych substancji dla człowieka. Ocena ryzyka zanieczyszczenia środowiska w przypadku przyrodniczego wykorzystania osadów, opierająca się na zjawisku mobilności metali ciężkich w osadach jest kluczowa do podjęcia decyzji o ich przyrodniczym wykorzystaniu i musi być oparta na dokładnej analizie osadu oraz miejsca jego potencjalnego wykorzystania. Jednak znajomość całkowitej zawartości metali ciężkich w osadach nie odzwierciedla w pełni zagrożenia jakie mogą one stwarzać dla ekosystemu. Ich dostępność dla organizmów żywych jest uwarunkowana mobilnością, co jest związane z formą występowania. Sumaryczna zawartość metali ciężkich, przy ocenie ryzyka, nie jest więc obiektywnym kryterium. W celu oznaczenia połączeń w jakich występują metale ciężkie wykonuje się tzw. analizę specjacyjną opartą na ekstrakcji sekwencyjnej. Najpowszechniej stosowaną obecnie metodą specjacji metali ciężkich w osadach ściekowych jest procedura BCR (Community Bureau of Reference). Ocena mobilności metali ciężkich w osadach ściekowych pozwala oszacować ryzyko migracji pierwiastków toksycznych do biosfery, i dalszego ich obiegu w środowisku. Z drugiej strony osady ściekowe pochodzące z różnych oczyszczalni ścieków są złożoną i niejednorodną matrycą pod względem fizycznym i chemicznym, a tym samym charakteryzują się zmienną zawartością metali ciężkich. Dlatego kluczowe jest poznanie korelacji pomiędzy stosowaną technologią pracy oczyszczalni, formą przeróbki osadu, pH, sezonowością, liczbą RLM a zawartością metali ciężkich w osadach. Istotna jest również kontrola stężenia metali ciężkich w glebach wykorzystywanych do celów rolniczych. Konieczne jest stosowanie dokładnych i precyzyjnych instrumentów do oceny zanieczyszczenia gleby metalami ciężkimi. Wobec powyższego bardzo istotnym zagadnieniem naukowym i inżynierskim jest analiza ryzyka translokacji metali ciężkich w osadach ściekowych oraz analiza ryzyka rozprzestrzeniania się tych pierwiastków w środowisku. W tym celu Doktorant opracował wskaźnik ryzyka przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych opierającego się na mobilności metali ciężkich, dokonał analizy fizykochemicznej gleby przeznaczonej do rekultywacji. Ponadto opracował model matematyczny symulujący zawartość metali ciężkich i ich form specjacyjnych w osadzie, opierając się na technologii pracy oczyszczalni, formie przeróbki osadu, pH, sezonowości oraz liczbie RLM. Przeprowadzone przez Doktoranta badania mają istotne znaczenie z uwagi na fakt, że osady ściekowe z wielu oczyszczalni mogłyby być wykorzystywane jako cenne nawozy, jednak niedostateczne rozpoznanie tego zagadnienia stanowi ograniczenie w ich przyrodniczym i rolniczym wykorzystaniu.

Analizowane zagadnienia należy uznać za aktualne ze względu na aspekt środowiskowy, kierunki zagospodarowania osadów ściekowych w Polsce oraz ideę gospodarki o obiegu zamkniętym. Uważam, że prezentowane w pracy doktorskiej wyniki badań wpisują się w obszar inżynierii środowiska, mają duże znaczenie praktyczne oraz wnoszą nowe elementy wiedzy dotyczącej przyrodniczego i rolniczego wykorzystania osadów ściekowych.

#### 4. Analiza i ocena pracy

Rozprawa doktorska Pana mgr inż. Roberta Kowalika liczy 159 stron. Doktorant nie zachował klasycznego układu pracy składającej się z części teoretycznej oraz badawczej. W części badawczej brakuje rozdziału metodyka badań gdzie opisano by przedmiot badań, sposób prowadzenia badań, oznaczenia analityczne. Te informacje tylko częściowo znajdują się w rozdziale 6 Charakterystyka obiektów poboru próbek osadów ściekowych oraz w rozdziale 8 Wyniki badań metali ciężkich w osadach ściekowych.

Praca składa się z wprowadzenia i przeglądu literatury opisanego w rozdziałach do 2 do 5. Następnie zamieszczono rozdział 6 dotyczący charakterystyki obiektów badań. Rozdział 7 przedstawia problem, cel i hipotezy badawcze, po którym Doktorant od razu przedstawia wyniki badań (rozdziały 8, 9). W rozdziale 10 Doktorant opisał matematyczny model sieci Bayesa. Następnie zamieszczono rozdział 11 z podsumowaniem oraz wnioskami. Na końcu rozprawy znajduje się spis literatury, załączniki oraz spis rysunków i tabel. Według mojej opinii przedstawiony układ pracy doktorskiej bez uporządkowanego opisu prowadzonych badań odbiega od standardowego.

**W rozdziale 1** zatytułowanym *Wstęp* Autor zaznajamia czytelnika z tematem rozprawy doktorskiej i uzasadnia celowość podjęcia badań. Wstęp do tematyki związanej z oceną możliwości zagospodarowania osadów ściekowych i problematyką zawartości w nich metali ciężkich świadczy o dużej wiedzy teoretycznej i praktycznej Doktoranta. Potwierdza Jego dobre rozeznanie w aktualnych trendach i wymaganiach dotyczących przyrodniczego i rolniczego wykorzystania osadów ściekowych oraz konieczności opracowania modelu matematycznego symulującego zawartość metali ciężkich i ich form specyficznych w osadach.

**Rozdział 2** zatytułowany *Osady ściekowe* składa się z czterech podrozdziałów: *2.1 Charakterystyka ilościowa osadów ściekowych*, *2.2 Charakterystyka jakościowa osadów ściekowych*, *2.3 Metody przetwarzania osadów ściekowych*, *2.4 Aspekty formalno-prawne w zakresie komunalnych osadów ściekowych*. W tym rozdziale Doktorant scharakteryzował osady ściekowe w zależności od sposobu i stopnia oczyszczania ścieków. Następnie omówił regulacje prawne dotyczące przetwarzania oraz zagospodarowania osadów ściekowych, a także przepisy związane z wykorzystaniem ustabilizowanych komunalnych osadów ściekowych do produkcji nawozu lub środka wspomagającego uprawę roślin.

**Rozdział 3** zatytułowany *Metale ciężkie* składa się z dwóch podrozdziałów: *2.1 Remediacja gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi* oraz *2.2 Toksyczność metali ciężkich*. W tym rozdziale Autor zwraca uwagę na różnorodność definicji pojęcia „metale ciężkie”, co doprowadziło do dezinformacji w terminologii metali ciężkich. Zdaniem Autora można kontynuować używanie tego terminu, ale powinien on zostać zdefiniowany w sposób bardziej wszechstronny i naukowy lub należy wprowadzić bardziej precyzyjną definicję pojęcia "metali

ciężkich". Następnie Doktorant omawia metody stosowane do remediacji gleb skażonych metalami ciężkimi. Kolejnym ważnym zagadnieniem, które opisuje Doktorant jest toksyczność metali ciężkich zależna głównie od rodzaju metalu, formy chemicznej, a także stopnia utlenienia. Metale ciężkie występują w środowisku w formie stabilnej (trwale związanej z matrycą), w formie warunkowo mobilnej (pod wpływem zmian czynników środowiskowych, mogą ulec przekształceniu z formy stabilnej na mobilną) oraz w formie mobilnej (jonowymiennej). Metale ciężkie mogą tworzyć różnorodne połączenia mineralne oraz metaloorganiczne. Doktorant omawia poszczególne pierwiastki zaliczane do metali ciężkich, zwracając uwagę na wysoki stopień toksyczności arsenu, kadmu, chromu, ołowiu i rtęci, które mają największy wpływ na zdrowie ludzi. Są one również klasyfikowane jako czynniki rakotwórcze organizmu człowieka (znane lub prawdopodobne) według Amerykańskiej Agencji Ochrony Środowiska oraz Międzynarodowej Agencji Badań nad Rakiem. Kontynuacją tego rozdziału jest **rozdział 4** zatytułowany ***Mobilność metali ciężkich***, który składa się z trzech podrozdziałów: **4.1 Oznaczanie metali ciężkich w osadach ściekowych**, **4.2 Cykl biochemiczny metali ciężkich**, **4.3 Parametry fizykochemiczne gleby wpływające na mobilność metali ciężkich**. Doktorant porównał różne metody ekstrakcji sekwencyjnej stosowane do identyfikacji form metali ciężkich w osadach ściekowych, zwracając w podrozdziale 4.1.1 szczególną uwagę na metodę BCR. W tym podrozdziale zamieścił autorskie rysunki przedstawiające schemat przebiegu analizy specyjnej metali ciężkich metodą BCR oraz przebieg czterech etapów ekstrakcji sekwencyjnej tą metodą. Moim zdaniem ta część pracy powinna być zamieszczona w części badawczej ponieważ Autor wykorzystuje w swoich badaniach procedurę BCR do oznaczania metali ciężkich w osadach i glebie, a w części badawczej nie umieszczono szczegółowego opisu stosowanych metod analitycznych. W kolejnym podrozdziale Doktorant zwraca uwagę na mobilność i dostępność metali ciężkich, która zależy od procesów chemicznych i biochemicznych zachodzących w glebie. Dlatego ważne jest zrozumienie głównych reakcji, które kontrolują uwalnianie tych pierwiastków w glebie i środowisku, aby rozwiązać problemy związane z ich niedoborem lub zanieczyszczeniem. Jak podkreśla Doktorant, oznaczenie tylko całkowitej zawartości metali w glebie nie jest dobrą miarą biodostępności oraz ich toksyczności, ponieważ metale występują w różnych formach w fazie stałej i mogą się znacznie różnić pod względem potencjalnej biodostępności. Autor dostrzega luki w przepisach i wytycznych stosowanych do ochrony gleby przed zanieczyszczeniem metalami podkreślając, że akty prawne w wielu krajach nadal opierają się jedynie na ocenie całkowitego stężenia metali obecnych w glebie. Dlatego konieczne jest wprowadzenie pojęcia biodostępności w regulacjach dotyczących ochrony środowiska i rekultywacji. W podrozdziale 4.3 Autor szczegółowo omawia czynniki, które w znaczący sposób wpływają na mobilność metali ciężkich, w tym: pH gleby, pojemność sorpcyjną, warunki oksydacyjno-redukcyjne oraz aktywność różnych form życia znajdujących się w glebie.

W **rozdziale 5** zatytułowanym ***Wskaźniki ryzyka zanieczyszczenia gleby metalami ciężkimi*** Doktorant poruszył bardzo ważny problem prawidłowej oceny ryzyka metali ciężkich obecnych w glebie. Zdaniem Doktoranta konieczne jest stosowanie dokładnych i precyzyjnych metod obliczeniowych w celu wykrycia i powstrzymania postępującej degradacji gleby. Analiza całkowitej zawartości metali ciężkich w glebie nie zawsze jest wystarczająca jako metoda oceny ryzyka stąd do oceny zanieczyszczenia gleby metalami ciężkimi konieczne jest

zastosowanie wskaźników zanieczyszczeń. Doktorant omawia ważniejsze wskaźniki takie jak: wskaźnik geoakumulacji (Igeo), kod oceny ryzyka (RAC), wskaźnik potencjalnego ryzyka ekologicznego (PERI), współczynnik indywidualnego skażenia (ICF), ekologiczny czynnik ryzyka (ERF) oraz autorski wskaźnik – środowiskowy czynnik ryzyka (ERD). Ten ostatni jest bardzo ciekawą i nowatorską propozycją Autora. Wskaźnik ten wykorzystuje potencjał mobilności metali i odwzorowuje faktyczne ryzyko migracji poprzez wprowadzenie wagi dla poszczególnych frakcji metali, czego nie uwzględniają wymienione wcześniej wskaźniki. W ERD określa się zawartość pierwiastków z grupy metali ciężkich według ich zawartości w czterech frakcjach. Każdej frakcji Doktorant przypisał odpowiednią wagę w skali 0-1.

**Rozdział 6** zatytułowany *Charakterystyka obiektów poboru próbek osadów ściekowych* jest nieuporządkowany tematycznie. Sugeruje, że uzyskamy informacje o przedmiocie badań i charakterystyce miejsc poboru próbek natomiast Doktorant zamieścił zarówno dane teoretyczne i niepełne informacje związane z metodyką. Uważam, że pierwsza część tego rozdziału tj. podrozdział 6.1 nie jest zgodna z głównym tytułem (Charakterystyka obiektów poboru próbek osadów ściekowych) ponieważ w tym podrozdziale Autor szczegółowo opisuje technologie oczyszczania ścieków omawiając złoża biologiczne, metody oczyszczania osadu czynnego, sekwencyjne reaktory SBR, membranowe reaktory biologiczne MBR, zalety reaktorów membranowych, co moim zdaniem powinno stanowić osobny rozdział w części teoretycznej pracy. Informacje w podrozdziale 6.2 *Obszar badań – oczyszczalnie ścieków komunalnych* nie są kompletne ponieważ brakuje opisu jak pobierano próbki, czy były to próbki reprezentatywne, jak przygotowywano próbki do badań, w jakim okresie prowadzono badania? W tym podrozdziale wskazano przedmiot badań tj. próbki osadów, które były pobierane z wybranych oczyszczalni ścieków komunalnych charakteryzujących się zróżnicowaną technologią, przepustowością oraz sposobem stabilizacji osadu. Do badań wykorzystano ustabilizowane osady ściekowe pobrane z 14 oczyszczalni ścieków (oznaczonych jako O1, O2, O3 itd. do O14) zlokalizowanych na terenie województwa Świętokrzyskiego.

Ta część pracy została bogato poparta cytatami literaturowymi, co świadczy o szerokiej znajomości omawianej problematyki badawczej. Na podstawie przeglądu literatury wskazano obszary wiedzy, które wymagają szczegółowego rozpoznania i na tej podstawie sformułowano **problemy, cele pracy i hipotezy badawcze** przedstawione w **rozdziale 7**. Autor postawił sobie za zadanie analizę wpływu różnych czynników na zawartość metali ciężkich w poszczególnych frakcjach w osadach ściekowych oraz analizę faktycznego ryzyka ich przyrodniczego wykorzystania opierając się na zjawisku mobilności metali ciężkich: w mojej ocenie to jest główny cel pracy. Autor sformułował cele naukowe i niezwykle ważne cele utylitarne, które potwierdzają aspekt praktyczny pracy. Postawiono dwa cele naukowe:

1. *Opracowanie wskaźnika ryzyka przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych opierającego się na mobilności metali ciężkich.*
2. *Opracowanie modelu Bayesa z wykorzystaniem programu GENiE 3.0, do symulowania ryzyka przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych.*

Cele utylitarne sformułowane w formie pytań miały dać odpowiedź na dwa pytania:

1. *W jaki sposób technologia oczyszczania ścieków, sposób przeróbki osadu oraz wielkość oczyszczalni wpływa na możliwość przyrodniczego i rolniczego wykorzystania osadów ściekowych?*

2. *Jaki jest wpływ pory roku na całkowitą zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych oraz formy mobilność w jakiej występują?*

Hipotezy i cele pracy są jasno sformułowane i uzasadnione nie tylko przesłankami naukowymi ale odpowiadają współczesnemu zapotrzebowaniu na innowacyjne rozwiązania w ocenie ryzyka translokacji metali ciężkich w osadach ściekowych.

Po rozdziale „Problemy, cele pracy i hipotezy badawcze” Doktorant od razu przedstawia wyniki badań jako **rozdział 8 Wyniki badań specjacji metali ciężkich w osadach ściekowych** oraz **Rozdział 9 Wyniki wskaźników ryzyka zanieczyszczenia gleby metalami ciężkimi**. Z takiego układu pracy nie wynika zakres pracy i nie przedstawiono metodyki badawczej. **Rozdział 8** składa się z dwóch podrozdziałów przedstawiających wyniki badań specjacji metali ciężkich w osadach ściekowych z wybranych oczyszczalni ścieków oraz wpływu sezonowości na mobilność metali ciężkich. Do badań jakości osadów ściekowych oraz gleb zanieczyszczonych metalami ciężkimi Doktorant wykorzystał metodę BCR. Zastosowane w pracy metody są nowoczesne i kompleksowe, a ich wykonanie nie budzi zastrzeżeń. Wyniki dotyczące wpływu technologii oczyszczania ścieków, sposobu przeróbki osadu oraz wielkości oczyszczalni na możliwość przyrodniczego i rolniczego wykorzystania osadów ściekowych mają zarówno charakter naukowy, praktyczny jak i poznawczy. Nowe elementy wiedzy wnoszą również wyniki badań wpływu pory roku na całkowitą zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych oraz formy mobilności w jakiej występują.

**Rozdział 9** składa się z siedmiu podrozdziałów opisujących wyniki badań wskaźnika geoakumulacji (Igeo), wskaźnika potencjalnego ryzyka ekologicznego (PERI), kodu oceny ryzyka (RAC), współczynnika indywidualnego skażenia (ICF), ekologicznego czynnika ryzyka (ERF), środowiskowego czynnika ryzyka (ERD). Badania wskaźników ryzyka zanieczyszczenia gleby metalami ciężkimi wykazały, że wskaźniki które bazują jedynie na całkowitej zawartości metali ciężkich, oraz ich stężeniu w podłożu geochemicznym, były zdecydowanie bardziej rygorystyczne, w stosunku do badanych osadów ściekowych. Jednocześnie spośród wskaźników, które analizowały poziom mobilności metali, najbardziej tolerancyjnym i dokładnym okazał się wskaźnik ERD. Próbkę osadów pobranych, z 6 na 14 oczyszczalni ścieków spełniły wymogi wskaźnika ERD.

Do symulowania ryzyka przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych Doktorant wykorzystał matematyczny model Bayesa i w **rozdziale 10** opisał etapy zmierzające do jego opracowania. Zastosował analizę Bayesa do testowania hipotez i opracował model sieci Bayesa w programie GeNI 3.0. W celu utworzenia modelu do przewidywania wartości wskaźnika ERD wszystkie dane specjacyjne otrzymane laboratoryjnie z próbek osadów ściekowych, a także informacje dotyczące oczyszczalni ścieków zgromadził, a następnie importował do programu GeNIe. Do sprawdzenia w jakim stopniu opracowany model, przewiduje wyniki dla nowych danych, Doktorant przeprowadził jego weryfikację. Wykorzystał metodę oceny niezależnych zestawów danych. Metoda ta polegała na przetestowaniu modelu na niezależnym zestawie danych, który nie był używany do trenowania modelu. Weryfikacja modelu sieci Bayesa jest procesem iteracyjnym, który wymaga ciągłej optymalizacji i dopasowania modelu do nowych danych dlatego do weryfikacji modelu Bayesa wybrał trzy oczyszczalnie: (1) pracującą w technologii osadu czynnego, RLM = 29550 (próbki pobrano wiosną), (2) pracującą w technologii SBR, RLM = 3700 (próbki pobrano zimą) oraz (3) pracującą w technologii złoża

biologicznego, RLM = 9550 (próbki pobrano zimą). Dla osadów ściekowych pobranych z ww. oczyszczalni ścieków, przeprowadzono analizę specjacyjną, a następnie obliczono wskaźnik ERD. Przeprowadzone symulacje potwierdziły skuteczność opracowanego modelu Bayesa.

Forma prezentacji wyników badań jest uporządkowana, opis wyników jasny i logiczny. Zawarte w niej wykresy jednoznacznie wyjaśniają otrzymane zależności. Uzyskane wyniki dobrze dokumentują złożony charakter zagadnień stanowiący przedmiot rozprawy. Jednak przy tak dużej liczbie zamieszczonych wykresów bardzo cenne dla czytelnika byłyby krótkie podsumowania rezultatów po poszczególnych seriach badań. Niestety Doktorant nie przeprowadził dyskusji otrzymanych wyników, która stanowiłaby podsumowanie całego tekstu naukowego. Dyskusja wyników jest standardem w pracach naukowych. Omówienie otrzymanych wyników w kontekście postawionego problemu badawczego, w odniesieniu do teorii dotyczącej danego zagadnienia oraz badań innych autorów podniosłoby rangę naukową rozprawy doktorskiej.

Merytoryczną część rozprawy zamyka **rozdział 11** zatytułowany **Podsumowanie i wnioski**. Na podstawie przeprowadzonych badań Doktorant wykazał, że różnice w technologiach oczyszczania ścieków wpływają na całkowitą zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych. Jednak, informacja o całkowitej zawartości metali nie jest wystarczająca do wyciągnięcia wniosków na temat rzeczywistego ryzyka związanego z ich wykorzystaniem ponieważ toksyczność metali ciężkich jest uzależniona od ich formy specjacyjnej. Pierwiastki te mogą występować w czterech różnych formach mobilności, w zależności od tendencji do migrowania w głąb podłoża geochemicznego. Doktorant wykazał, że sumaryczna zawartość metali ciężkich, przy ocenie ryzyka, nie jest obiektywnym kryterium dlatego zaproponował wskaźnik, który okazał się najbardziej tolerancyjnym w stosunku do badanych osadów. Na koniec podsumowania Doktorant sformułował 3 szeroko rozbudowane wnioski. Wnioski zostały dobrze zredagowane, świadczą o realizacji badań w pełnym zakresie w stosunku do zaplanowanych prac oraz zawierają wykaz najistotniejszych osiągnięć rozprawy. Doktorant udowodnił, że osady ściekowe pochodzące z oczyszczalni MBR wykazują podwyższone stężenia metali ciężkich w porównaniu do osadów z oczyszczalni stosujących inne technologie oczyszczania. Większość tych metali występowała głównie w stabilnych frakcjach osadów dlatego badane osady nie stanowią znaczącego zagrożenia dla skażenia gleby, co wskazuje na ich potencjalnie mniejszy wpływ na środowisko. W przypadku osadów pochodzących z oczyszczalni ścieków wykorzystujących technologie membranową, wykazano w nich małe zawartości metali ciężkich, co wskazuje na niższy potencjał zagrożenia osadów w przypadku ich wykorzystania w rolnictwie lub w przyrodniczym otoczeniu. Osady pochodzące z oczyszczalni w technologii osadu czynnego charakteryzowały się najmniejszą tendencją do migracji metali, podczas gdy osady z oczyszczalni SBR wykazywały największą skłonność do tego typu procesów. Badania sezonowości wykazały zwiększoną całkowitą zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych w próbkach pobranych jesienią. Największe tendencje występowania metali w formach mobilnych zaobserwowano dla prób pobranych w okresie wiosennym, natomiast zimą metale częściej występowały w frakcjach stabilnych. Doktorant wykazał, że mobilność metali ciężkich jest ściśle związana z rozmiarem oczyszczalni ścieków. Ustabilizowane osady ściekowe pobrane z mniejszych oczyszczalni charakteryzowały się niższą ogólną zawartością metali w porównaniu do tych pochodzących z większych obiektów,



jednak wykazywały podwyższoną skłonność do przyjmowania form mobilnych. Zastosowanie technologii oczyszczania osadu czynnego wykazało najmniejszą, statystycznie istotną tendencję do tworzenia osadów o zwiększonej mobilności metali ciężkich. Potwierdzono również, że sposób stabilizacji osadów i ich pH nie wywiera istotnego wpływu zarówno na mobilność, jak i zawartość metali ciężkich.

Rozprawę zakończono obszernym spisem literatury składającym się z 234 pozycji w tym artykułów, książek naukowych, aktów prawnych, stron internetowych.

W podsumowaniu pozytywnie oceniam wybór przedmiotu badań, kompleksowe podejście do problemu występowania w osadach ściekowych metali ciężkich, co warunkuje ich rolnicze lub przyrodnicze wykorzystanie. Należy podkreślić, że tytuł pracy oraz cele zostały poprawnie sformułowane i umożliwiły ich realizację. Pomijając wyżej wymienione uwagi uważam, że studiowana przez Doktoranta problematyka ma istotne znaczenie dla poszerzenia wiedzy o zagospodarowaniu osadów ściekowych.

## 5. Uwagi

Autor nie ustrzegł się od błędów językowych, stylistycznych i merytorycznych, które wpływają na czytelność przekazu:

- Doktorant stosuje wiele skrótów myślowych i błędów stylistycznych np: str. 87 „jedynie ołów z oczyszczalni O1 i O2, oraz miedź z O3 nie przekroczyły wartości granicznej” powinno być zawartości ołowiu i miedzi; str. 84. „Ołów charakteryzował się zwiększoną zawartość frakcji FII”, powinno być zwiększoną zawartością; str. 102 „Wskaźnik ICF wskazał na wysokie ryzyko zanieczyszczenia wszystkich metali” powinno być wszystkimi metalami.
- Zamieszczone w rozprawie tabele i rysunki powinny być przywołane w tekście jednak niektóre np. rysunek 8.5, rysunek 9.5 nie są zacytowane w tekście,
- Rysunki 8.17 i 8.18 nie mają opisu osi OX i OY.
- Autor w bibliografii nie zachował jednolitego zapisu np.
  - w większości pozycjach literaturowych stosuje skróty tytułów czasopism, a w pozycjach 68, 76, 87 podaje pełne tytuły,
  - niektóre tytuły czasopism zapisuje małymi literami Journal of occupational and environmental medicine [111], American journal of industrial medicine [112]
  - w zapisie stron stosuje skrót pp. (np. 181-197); lub s. (s. 375-384); lub zapis 793-807
  - różna kolejność zapisu roku, nr czasopisma np.: Bolan, N. et al. Remediation of heavy metal(loid)s contaminated soils—to mobilize or to immobilize? J. Hazard. Mater. 266, 2014, 141–166 [75] lub Chiou Y., Wong R., Chao M., Chen C., Liou S., Lee H. Nickel accumulation in lung tissues is associated with increased risk of p53 mutation in lung cancer patients. Environ. Mol. Mutagen. 2014;55:624–632 [121].

Uwagi merytoryczne:

1. Na stronach 22-24 Autor omawiając najczęściej stosowane metody remediacji gleb skażonych metalami ciężkimi ograniczył się tylko do krótkich definicji szkoda, że nie podał przykładów praktycznego wykorzystania tych metod.
2. Strona 25 – stwierdzenie „W ostatnich latach obserwuje się rosnący ekologiczny i globalny niepokój o zdrowie publiczne związany z zanieczyszczeniem środowiska metalami ciężkimi” i powołanie się na pozycję literaturową z 2019 nie jest zgodne z innymi wcześniejszymi danymi literaturowymi z lat 90. sygnalizujących ten problem.
3. Podrozdział 6.2 *Obszar badań – oczyszczalnie ścieków komunalnych*, proszę o uzupełnienie danych: jak pobierano próbki, czy były to próbki reprezentatywne, jak przygotowywano próbki do badań, w jakim okresie prowadzono badania?
4. Rozdział 7. *Problem, cel pracy oraz hipoteza badawcze* nie zawiera zakresu badań, proszę o uzupełnienie tych informacji.
5. W rozdziale 8 *Wyniki badań specjacji metali ciężkich w osadach ściekowych* wymieniono wskaźniki jakie oznaczono dla osadów ściekowych „Zawartość suchej masy i substancji organicznej analizowano zgodnie z wytycznymi podanymi w PN-EN 12880:2004 i PN-EN 12879:2004. Pomiaru pH i potencjału redoks (Eh) osadów ściekowych dokonano przy użyciu miernika wielofunkcyjnego CPR-411 (Elmetron, Zabrze, Polska)” jednak w pracy nie zamieszczono wyników dla tych wskaźników, proszę o komentarz.
6. Tytuł rysunku 8.1 *Ekstrakty przygotowane na badania na spektrometrze ICP-OES (fotografia własna)* należy zmienić na *Ekstrakty przygotowane do badań z wykorzystaniem spektrometru ICP-OES (fotografia własna)*.
7. Rysunek 8.2 przedstawia zdjęcie spektrometru emisji optycznej ICP do analizy zawartości metali ciężkich, dlatego nie jest poprawny tytuł *Przebieg procesu analizy zawartości metali ciężkich z wykorzystaniem spektrometru ICP-OES (fotografia własna)*.
8. Proszę o wyjaśnienie na jakiej podstawie przyjęto postawione w pracy hipotezy badawcze?
9. W pracy nie zawarto dyskusji otrzymanych wyników dlatego proszę o skonfrontowanie wniosku pierwszego z wynikami i wnioskami innych naukowców w tym zakresie.
10. Proszę o wyjaśnienie, co może być przyczyną zwiększonej całkowitej zawartość metali ciężkich w osadach ściekowych w próbkach pobranych jesienią. Czym można tłumaczyć tendencję występowania metali w formach mobilnych dla prób pobranych w okresie wiosennym. Dlaczego w okresie zimowym wykazano, że metale częściej występowały w frakcjach stabilnych?
11. Proszę o komentarz dotyczący realności praktycznego wykorzystania przedstawionych w rozprawie wniosków do planowania wykorzystania przyrodniczego i rolniczego osadów ściekowych pochodzących z oczyszczalni ścieków stosujących różne technologie oczyszczania.

12. Czy Doktorant przewiduje dalsze badania związane z tematyką pracy? Proszę o propozycję kierunków kolejnych badań.

## 6. Końcowa ocena rozprawy

Reasumując merytoryczną ocenę rozprawy stwierdzam, że Pan mgr inż. Robert Kowalik zaplanował i przeprowadził kompleksowe badania, które mają zarówno charakter naukowy, poznawczy jak i użyteczny. Cele pracy zostały określone prawidłowo, a wynikające z nich założenia osiągnięto w trakcie realizacji pracy. Doktorant wykazał umiejętność rozwiązywania zagadnień badawczych, samodzielnego prowadzenia prac laboratoryjnych i właściwej interpretacji wyników.

Recenzowana rozprawa doktorska dotyczy bardzo ważnego zagadnienia jakim jest ryzyko translokacji metali ciężkich w osadach ściekowych i ich rozprzestrzenianie się w środowisku. Analizowane przez Doktoranta zagadnienia należy uznać za aktualne ze względu na aspekt środowiskowy, kierunki zagospodarowania osadów ściekowych w Polsce oraz ideę gospodarki o obiegu zamkniętym. W tym kontekście podjęte w recenzowanej rozprawie badania są bardzo ważne pod względem naukowym i aplikacyjnym. Dotychczas badania w kierunku opracowania wskaźnika ryzyka przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych opierającego się na mobilności metali ciężkich nie były prowadzone w takim zakresie, co stanowi niezwykle nowatorski i aplikacyjny walor rozprawy. Nowy element wiedzy stanowi również opracowanie przez Doktoranta modelu Bayesa z wykorzystaniem programu GENiE 3.0, do symulowania ryzyka przyrodniczego wykorzystania osadów ściekowych. Przeprowadzone badania należy więc uznać za oryginalne i innowacyjne. Wobec powyższego stwierdzam, że przedstawione w rozprawie doktorskiej osiągnięcia są oryginalne i mają duże możliwości aplikacyjne.

## PODSUMOWANIE I WNIOSEK KOŃCOWY

W podsumowaniu pragnę podkreślić, że przedłożona do oceny praca Pana mgr inż. Roberta Kowalika pt. „*Model specjalny w analizie ryzyka translokacji metali ciężkich w osadach ściekowych*” stanowi znaczące i oryginalne osiągnięcia Autora oraz wnosi do dyscypliny naukowej inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka zarówno elementy poznawcze jak i aplikacyjne. Uzyskane wyniki poszerzają wiedzę w zakresie przyrodniczego i rolniczego wykorzystania osadów ściekowych. Wskazane w recenzji uwagi i błędy nie wpływają na wartość merytoryczną badań przeprowadzonych przez Doktoranta. Na wysoką ocenę pracy zasługuje zarówno teoretyczny jak i doświadczalny wkład Autora. Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego rozwiązywania problemów badawczych, udowadniając, że potrafi dobrać odpowiednie metody analityczne i z nich korzystać oraz interpretować wyniki. Biorąc pod uwagę formę, zakres oraz treść recenzowanej rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Roberta Kowalika w/w dysertację **opiniuję pozytywnie**.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr inż. Roberta Kowalika spełnia warunki wynikające z art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.). Praca stanowi oryginalne rozwiązanie problemu

naukowego, a Doktorant wykazał się wiedzą w zakresie dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.

**Wnioskuje zatem do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Świętokrzyskiej o dopuszczenie Pana mgr inż. Roberta Kowalika do dalszych etapów postępowania kwalifikacyjnego o nadanie stopnia naukowego doktora w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.**

