



prof. dr hab. inż. Renata Gruca-Rokosz  
Katedra Inżynierii i Chemii Środowiska  
Wydział Budownictwa, Inżynierii Środowiska i Architektury  
Politechnika Rzeszowska

Rzeszów, 21 października 2024 r.

## **RECENZJA**

**rozprawy doktorskiej mgr inż. Joanny Ładyńskiej pt.: „Zastosowanie procesu wewnętrznej mikroelektrolizy do oczyszczania odcieków z ustabilizowanych składowisk odpadów komunalnych”**

opracowana na prośbę prof. dra hab. inż. Tomasza Wiśniewskiego, przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Warszawskiej, zawartą w piśmie nr RND.ÍŚGiE.137.2024 z dnia 17 września 2024 r.

### **1. Informacje wstępne**

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska zrealizowana została na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej. Promotorem pracy był dr hab. inż. Jeremi Naumczyk, prof. PW, a promotorem pomocniczym dr Małgorzata Kucharska.

Rozprawa zawiera 178 stron maszynopisu (dodatkowo 10 początkowych stron jest nieponumerowanych). Składa się ze wstępu, 13 rozdziałów głównych i licznych podrozdziałów, spisów rysunków i tabel oraz bibliografii. Ponadto zawiera (nie ujęte w spisie treści) streszczenie w języku polskim i angielskim oraz słowa kluczowe. Rozprawa zawiera 37 tabel i 39 rysunków. Cytowana literatura to 173 pozycje z czego zdecydowana większość to literatura anglojęzyczna. W bibliografii znajduje się 170 pozycji, ale pod numerem 124 znajdują się trzy pozycje (a, b i c), a pod numerem 136 – dwie (a i b). Wykorzystana literatura to głównie publikacje naukowe, ale również podręczniki, poradniki, akty prawne i strony internetowe, opublikowane w latach 1994 – 2022 (poza jedną pozycją z roku 1932).

Przedłożona do recenzji rozprawa przygotowana została zgodnie ze standardami prac naukowych, składa się z dwóch zasadniczych części, tj.: przeglądu aktualnego stanu wiedzy



związanego z tematem pracy oraz części doświadczalnej wraz z prezentacją, analizą i dyskusją uzyskanych wyników badań oraz z wnioskami końcowymi.

Rozprawa powstała na podstawie badań własnych Autorki.

## **2. Ocena trafności wyboru tematyki badawczej**

Recenzowana praca dotyczy zastosowania procesu wewnętrznej mikroelektrolizy (IME) do oczyszczania ustabilizowanych odcieków ze składowisk odpadów komunalnych. Wybór tej tematyki jest trafny i bardzo istotny, gdyż ustabilizowane odcieki ze składowisk są źródłem toksycznych i zarazem bardzo trudnych do usunięcia substancji chemicznych, które stanowią poważne zagrożenie dla środowiska, szczególnie w kontekście zanieczyszczenia gleb i wód gruntowych. Choć istnieje wiele metod oczyszczania odcieków ze składowisk, to proces wewnętrznej mikroelektrolizy jest stosunkowo nowym i innowacyjnym podejściem w zakresie oczyszczania trudnych do usunięcia zanieczyszczeń, który może sprostać rosnącym wymaganiom regulacyjnym w zakresie ochrony środowiska. Ponadto, proces ten ma potencjał do obniżenia kosztów związanych z oczyszczaniem odcieków, co ma istotne znaczenie ekonomiczne. Znaczny wzrost liczby publikacji naukowych na temat IME w ostatnich latach, świadczy o dużym zainteresowaniu tą technologią i jej potencjalnymi korzyściami, co dodatkowo potwierdza znaczenie i aktualność podjętych przez Doktorantkę badań. Badania w tej dziedzinie mają duże znaczenie zarówno poznawcze jak i praktyczne. Są źródłem wiedzy na temat kinetyki, skuteczności i optymalnych warunków operacyjnych dla tego procesu w kontekście specyficznych typów odcieków ze składowisk odpadów komunalnych, a to z kolei stanowi przyczynek do rozwoju innowacyjnych i bardziej efektywnych technologii ich oczyszczania.

## **3. Ocena merytoryczna i formalna pracy**

Po stronie tytułowej i podziękowaniach Autorka zamieściła streszczenie w języku polskim, które we właściwy sposób syntezuje treść rozprawy. Zaraz po nim znajduje się streszczenie w języku angielskim, będące tłumaczeniem wersji polskiej. Następny w kolejności jest „Spis treści”, a po nim rozpoczynają się zasadnicze części dysertacji. Mankamentem pracy jest brak wykazu stosowanych skrótów i oznaczeń, których w pracy jest bardzo dużo. Taki spis powinien zostać umieszczony bezpośrednio po „Spisie treści”, co znacznie ułatwiłoby czytanie i zrozumienie treści dysertacji.

We wstępie do pracy Autorka nakreśliła problem rosnącej ilości odpadów komunalnych oraz wyzwania związane z ich zagospodarowaniem, a także poruszyła kwestię odcieków ze składowisk odpadów, które mogą stanowić potencjalne zagrożenie ekologiczne. Do tej części pracy mam jednak pewne zastrzeżenie. Wprowadzenie do pracy naukowej powinno nie tylko



przedstawić kontekst problemu i wprowadzić czytelnika w tematykę badawczą, ale także jasno określić cel badania wraz z uzasadnieniem. Niestety, we wstępie zaproponowanym przez Autorkę brakuje precyzyjnego sformułowania, co dokładnie zamierza ona osiągnąć lub zbadać w odniesieniu do przedstawionego problemu.

Teoretyczną część pracy stanowią rozdziały od 1 do 6 (łącznie 43 strony), w których zaprezentowano kolejno:

- zagadnienia związane z bilansem wodnym składowiska wraz z ogólnym równaniem bilansu,
- opis procesów biochemicznych i chemicznych zachodzących na składowiskach odpadów, które prowadzą do powstawania odcieków,
- informacje o zmienności składu odcieków w różnych fazach eksploatacji składowisk odpadów,
- syntetyczny opis sposobów postępowania z odciekami oraz przegląd metod stosowanych w oczyszczaniu odcieków składowiskowych, ze szczególnym naciskiem na proces wewnętrznej mikroelektrolizy (IME), który był przedmiotem badań Autorki.

Rozdziały te przygotowane zostały na podstawie literatury z ostatnich kilkunastu lat. Zaprezentowane zagadnienia opracowane zostały logicznie, dobrze wprowadzają w tematykę pracy i potwierdzają znaczenie podjętego problemu badawczego. Na szczególną uwagę zasługuje wnikliwa analiza opublikowanych dotychczas wyników badań dotyczących zastosowania procesu wewnętrznej mikroelektrolizy (IME) do oczyszczania różnego rodzaju ścieków przemysłowych i odcieków ze składowisk odpadów komunalnych. Szczególnie wartościowe jest zestawienie różnych parametrów procesu i ich wpływu na efektywność oczyszczania, co pozwala na lepsze zrozumienie, jakie czynniki mają największe znaczenie dla skuteczności tego procesu. Przegląd literatury tematu Autorka zakończyła podsumowaniem, w którym przedstawiła główne wnioski płynące z analizy wyników dotychczasowych badań, uwypukliła kluczowe odkrycia i przedstawiła jakie wyzwania pozostają nierozwiązane. Wskazała i uzasadniła również nowe kierunki badań, których podjęła się w trakcie realizacji pracy doktorskiej, a mianowicie: badanie wpływu zastosowania koagulacji wstępnej na efektywność procesu IME oraz badanie jednostkowego procesu sorpcji w procesie IME zastosowanym do oczyszczania ustabilizowanych odcieków ze składowiska komunalnego, w zależności od różnych parametrów procesu.

Podczas analizy tej części pracy zwrócono uwagę na kilka niedociągnięć/braków, które w żadnym stopniu nie podważają wartości merytorycznej, lecz mogą być wykorzystane w dalszej pracy naukowej doktorantki. Uwagi wymieniono w porządku chronologicznym czytania pracy:

- Str. 2 – brak przywołania przepisów prawnych dotyczących wytycznych dotyczących budowy, eksploatacji, zamykania składowisk, oraz procesu składowania odpadów.



- Str. 3 – w równaniu bilansu brakuje jednostki dla zmiennych  $N$  oraz  $Q_p$ .
- Tytuł rozdziału 2 tj.: „Sposób powstawania odcieków i zachodzące procesy” powinien bardziej precyzyjnie odzwierciedlać prezentowaną treść, a mianowicie etapy degradacji materii organicznej w składowiskach odpadów. Słowo „sposób” powinno być zastąpione np. słowem „mechanizmy”.
- Brakuje wyjaśnienia skrótów i akronimów ChZT, BZT<sub>5</sub>, OWO, AOX, Da i innych parametrów wymienionych w tabeli 1, na rysunku 3 oraz w tekście rozdziałów 4, 5 (np. SBR, MBR, MBBR, SHARON, USAB, SAMBR, ANAMMOX itd.).
- Niekonsekwencja w jednostkach ChZT i BZT<sub>5</sub> ( $\text{mg}/\text{dm}^3 \text{O}_2$  i  $\text{mgO}_2/\text{dm}^3$ ).
- Opisy rysunków 1 i 2 są nieprawidłowe gdyż rysunki nie przedstawiają zmienności składu związków organicznych i nieorganicznych, lecz zmienność składu odcieków w różnych fazach eksploatacji składowiska. Ponadto, ChZT i amoniak nie są związkami organicznym, jak wynika z opisu rysunku 1.
- Zapis jednostki SUVA w postaci  $\text{m}^{-1}/\text{g}/\text{m}^3$  jest nietypowy i może być mylący. Dodatkowo, w tekście pojawia się błędnie zapisana jednostka tj.  $\text{m}^1/\text{g}/\text{m}^3$ .
- Tabela 1 zawiera zakresy wartości różnych parametrów fizyko-chemicznych odcieków ze składowisk „młodych” i ustabilizowanych, a Doktorantka podaje, że jest to jej własne opracowanie. Nie jest jednak jasne czy są to wyniki badań własnych Autorki, czy dane te pochodzą z innych publikacji? W drugim przypadku należałoby wskazać oryginalne źródła.
- Fragment tekstu bezpośrednio pod tytułem rozdz. 4 jest za długi na wprowadzenie do rozdziału i powinien stanowić oddzielny podrozdział 4.1, konsekwencją tego byłaby zmiana numeracji pozostałych podrozdziałów.

W dalszej części pracy, tj. w rozdziale 7 i 8 Autorka przedstawiła odpowiednio tezę i cele pracy oraz szeroki zakres realizowanych badań. Sformułowana teza jasno określa zarówno możliwość zastosowania procesu wewnętrznej mikroelektrolizy (IME) do oczyszczania odcieków ze składowisk odpadów komunalnych, jak i możliwość jego modyfikacji poprzez dodatek nadtlenu wodoru w celu stworzenia procesu hybrydowego IME/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Wprowadzenie hybrydowego podejścia sugeruje, że praca może mieć na celu nie tylko potwierdzenie skuteczności procesu IME, ale także jego ulepszenie, co dodaje wartości badaniom. Skupienie się na ustabilizowanych składowiskach odpadów komunalnych czyni tezę istotną z punktu widzenia inżynierii środowiska, gdyż odcieki z tych składowisk mogą być trudne do oczyszczenia. Zdaniem recenzenta, uzasadnione byłoby sformułowanie dodatkowej tezy (lub tez), która bardziej szczegółowo odnosiłaby się do dodatkowych aspektów badań Autorki, takich jak zastosowanie koagulacji wstępnej oraz określenie udziału adsorpcji zanieczyszczeń na węglu aktywnym. Ponadto, w zakresie pracy pojawiają się skrót, których rozwinięcie pojawia się dużo później (np. z-IME, z-IME/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>).



Metodyczna część pracy została przedstawiona w rozdziałach 9 i 10, które łącznie obejmują 16 stron. Najpierw Autorka dokonała krótkiej prezentacji zamkniętego i zreaktywowanego składowiska odpadów w Łubnej, z którego odcieki były przedmiotem badań. W dalszej kolejności scharakteryzowała materiały elektrodowe używane w badaniach, wymieniła metody analityczne oraz aparaturę i urządzenia, a także opisała sposób przygotowania mikroelektrod oraz procedury badawcze. Eksperymentalne podejście, obejmujące szeroki zakres warunków operacyjnych, jest dobrze zaprojektowane i umożliwia szersze zrozumienie wpływu kluczowych zmiennych na efektywność oczyszczania odcieków w badanych procesach.

Rozdział 11, który składa się z 12 podrozdziałów (łącznie 66 stron) zawiera wyniki badań własnych Autorki. Warto podkreślić wyjątkowo szeroki zakres przeprowadzonych badań, które wymagały znacznego nakładu pracy.

W rozdziale 11.1 przedstawiono wyniki analiz odcieków składowiskowych pobieranych w okresie od czerwca 2017 do września 2022 roku. Rezultaty wykazały istotne różnice w składzie odcieków, które były uzależnione od pory roku i warunków atmosferycznych. W okresach suchych, charakteryzujących się wysokimi temperaturami i intensywnym parowaniem, stężenie związków organicznych było znacznie wyższe niż po okresach roztopów czy opadów deszczu, co przekładało się na wartości ChZT. Niski stosunek BZT<sub>5</sub>/ChZT potwierdził niską biodegradowalność materii organicznej w badanych odciekach, co potwierdza zasadność badań nad zastosowaniem procesu IME do ich oczyszczania. Drobne uwagi do tego fragmentu dysertacji:

- Sformułowanie: „wyższe stężenie związków organicznych przekraczające 2000 mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>”, powinno być zastąpione: „wyższe stężenie związków organicznych, co przekładało się na wartości ChZT przekraczające 2000 mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>”.
- Tabela 7 – jednostką Nog. i N-NH<sub>4</sub> jest g/dm<sup>3</sup>?
- Tabela 7 – brak jednostki dla parametru SUVA.

W rozdziale 11.2 Autorka zaprezentowała rezultaty badań dotyczących wpływu pH, dawki mikroelektrod, sposobu mieszania, czasu oraz wpływu koagulacji wstępnej na efektywność obniżania ChZT w odciekach w wyniku zastosowania procesu IME.

Wyniki badań eksperymentalnych przedstawiono w 10 tabelach i na 3 rysunkach, a najważniejsze wnioski i spostrzeżenia zostały wypunktowane po wynikach każdego wariantu eksperymentu. Zdaniem recenzenta przedstawienie wyników w formie graficznej znacząco poprawiłoby czytelność i przystępność prezentowanych danych (ta uwaga dotyczy również większości wyników zaprezentowanych w kolejnych rozdziałach). Wykresy i diagramy pozwalają bowiem na szybsze i bardziej intuicyjne porównanie wyników między różnymi warunkami eksperymentalnymi oraz pomagają lepiej dostrzec trendy w danych. Ponadto, wykresy umożliwiają odbiorcom szybkie uchwycenie kluczowych wniosków, co jest



trudniejsze przy analizie samych wartości liczbowych, zwłaszcza gdy są one rozproszone w różnych tabelach.

Uwaga do tej części pracy:

- Rys. 16 – Czy, biorąc pod uwagę, że różne dawki mikroelektrod były stosowane dla odcieków o różnych składach chemicznych, można jednoznacznie stwierdzić, że to dawka mikroelektrod miała kluczowy wpływ na przebieg procesu z-IME, a nie zmienne charakterystyki tych odcieków?

Rozdział 11.3 prezentuje wyniki badań nad zmianami wartości pH podczas procesu z-IME dla wybranej próbki. Doktorantka odnotowała istotne zmiany pH, zwłaszcza w pierwszych 30 minutach procesu, co może mieć znaczenie dla zrozumienia mechanizmu procesu z-IME.

Rozdział 11.4 dostarcza istotnych informacji na temat kinetyki procesu z-IME. Do wyznaczenia rzędowości reakcji Autorka zastosowała metodę graficzną, dopasowując ostatecznie model pseudo-drugiego rzędu.

Uwaga:

- Doktorantka nie podaje informacji na temat zastosowania innych modeli kinetycznych oraz przyczyn ich ewentualnego odrzucenia.

W rozdziale 11.5 Autorka przedstawiła szczegółowy raport z badań nad efektywnością klasycznego i zmodyfikowanego procesu ZVI w zależności od zmieniających się parametrów takich jak: wartość pH, dawka żelaza, czas trwania procesu i sposób mieszania. Wyniki badań zaprezentowano w formie tabelarycznej oraz rysunkowej, a najważniejsze spostrzeżenia wypunktowano na końcu rozdziału. Badania wykazały, że kluczowymi czynnikami optymalizującymi proces redukcji ChZT w odciekach składowiskowych przy użyciu żelaza (ZVI) są niskie wartości pH, odpowiednie dawki żelaza oraz wybór materiału żelaznego. Potwierdziły także, że w odpowiednich warunkach zmodyfikowany proces ZVI jest bardziej efektywny niż klasyczny.

Kolejne dwa rozdziały, tj. 11.6 i 11.7, prezentują wyniki badań nad efektywnością roztwarzania różnych materiałów żelaznych odpowiednio w procesach ZVI oraz IME. Doktorantka wykazała, że chociaż w obu procesach stężenie żelaza ogólnego w roztworze wzrastało wraz ze wzrostem dawki materiału żelaznego, to efektywność rozpuszczania różniła się w zależności od zastosowanej technologii. Zwiększenie dawki węgla aktywnego (GAC) w procesie IME, w krótkim czasie zapewniało wyższe stężenia  $Fe_{og}$  w porównaniu do procesu ZVI, który wykazywał się gorszymi efektami, szczególnie przy wyższych dawkach materiału żelaznego.

Rozdział 11.8 przedstawia obszerny raport z badań nad efektywnością redukcji ChZT poprzez sorpcję na węglu aktywnym, który w kontekście procesu IME pełni dwojaką funkcję: działa jako katoda w procesie elektrochemicznym oraz pełni rolę sorbentu dla zanieczyszczeń



organicznych. Efektywność usuwania ChZT z odcieków składowiskowych badano dla dwóch typów węgla aktywnego (Fantom i GAC 4H), w kontekście zmieniających się parametrów procesowych. Autorka wykazała, że skuteczność redukcji ChZT jest silnie zależna od kluczowych warunków operacyjnych, takich jak pH, dawka węgla aktywnego oraz sposób mieszania. Ponadto udowodniła, że wprowadzenie koagulacji przed procesem sorpcji znacząco poprawia efektywność redukcji ChZT, co sugeruje konieczność łączenia różnych metod w celu osiągnięcia maksymalnej skuteczności. Wyniki badań pokazały również, że efektywność sorpcji zanieczyszczeń organicznych na węglu aktywnym wzrastała w czasie, a czas potrzebny do osiągnięcia stanu równowagi zależał od dawki i rodzaju węgla. Zastosowanie wyższych dawek węgla skutkowało większą redukcją ChZT, lecz tylko do pewnego momentu, po którym dalsze wydłużanie czasu procesu sorpcji nie przynosiło istotnych korzyści. W dalszej kolejności Doktorantka określiła kinetykę procesu sorpcji, wyznaczyła izotermy adsorpcyjne oraz wartości stałych dla izotermy Freundlicha.

Uwagi:

- Zdaniem recenzenta tytuł rozdziału 11.8 „Badania nad efektywnością usuwania ChZT za pomocą węgla aktywnego w procesie sorpcji” powinien brzmieć np.: „Badania nad efektywnością redukcji ChZT za pomocą węgla aktywnego w procesie sorpcji”, gdyż ChZT nie jest zanieczyszczeniem, które można bezpośrednio usunąć. Usunąć można natomiast zanieczyszczenia, np. organiczne, co skutkować będzie obniżeniem/redukcją wartości wskaźnika ChZT.
- W części teoretycznej Autorka wspomina o trzech modelach izoterm sorpcji – Langmuira, Freundlicha i Temkina – jako najczęściej stosowanych w opisie adsorpcji zanieczyszczeń na węglu aktywnym. Jednak w części eksperymentalnej zdecydowała się na wykorzystanie tylko jednego z nich, izotermy Freundlicha, bez wyjaśnienia, dlaczego pozostałe modele nie zostały uwzględnione. Wykorzystanie wszystkich trzech modeli umożliwiłoby bardziej kompleksową analizę procesu sorpcji i pozwoliłoby na ewentualne odrzucenie nieadekwatnych modeli.
- Na stronie 115 Doktorantka przytacza dwie formy izotermy Freundlicha: ogólną oraz zlinearyzowaną przez logarytmowanie. W opisie symboli pojawiają się m.in.  $x$  – liczba moli substancji zaadsorbowanej oraz  $C$  – stężenie. Ponieważ w badaniach nad sorpcją zanieczyszczeń z odcieków Autorka operuje przede wszystkim wielkością ChZT, konieczne jest wyjaśnienie związku tych parametrów z wielkościami  $x$  i  $C$  użytymi w modelu izotermy. Bez tego wyjaśnienia analiza parametrów izotermy staje się niekompletna i trudna do interpretacji.
- Na stronie 116, w tabelach 32 i 33, Doktorantka podaje wartości ustalonych eksperymentalnie wartości parametrów izotermy Freundlicha opisującej udział



zjawiska sorpcji w procesie usuwania zanieczyszczeń z odcieków. Niestety nie podaje jednostek obu wymienionych parametrów, co utrudnia interpretację tych wyników.

- Zlinearyzowane izotermy Freundlicha wyraźnie odbiegają od liniowości, co sugeruje, że model Freundlicha może nie być w pełni adekwatny do opisu badanego zjawiska sorpcji. Być może w jego opisie pomocne byłyby inne modele izoterm, zwłaszcza z grupy modeli uwzględniających równoczesne procesy sorpcji powierzchniowej oraz fizycznego zatrzymywania (osadzania) składnika aktywnego w przestrzeni mikro i mezoporów.

W rozdziale 11.9 zaprezentowano rezultaty badań nad skutecznością zintegrowanego procesu mikroelektrolizy wewnętrznej z dodatkiem nadtlenu wodoru (z-IME/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>) w redukcji ChZT z odcieków. Badania przeprowadzono dla jednego rodzaju odcieków o początkowej wartości ChZT wynoszącej 1044 mg O<sub>2</sub>/dm<sup>3</sup>, a w procesie z-IME użyto mikroelektrody żeliwnej (Ch) oraz granulowanego węgla aktywnego (GAC 4H) w określonym stosunku wagowym. Badania obejmowały analizę wpływu różnych dawek nadtlenu wodoru, dodawanego na początku oraz po 120 minutach procesu, na jego efektywność w redukcji zanieczyszczeń. Doktorantka wykazała, że dodatek nadtlenu wodoru po 120 minutach procesu z-IME jest bardziej skuteczny w redukcji ChZT niż jego dodanie na początku, a korekta pH ma mniejsze znaczenie przy wyższych dawkach H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>.

W rozdziale 11.10 Doktorantka dokonała analizy efektywności procesów KW, z-IME, potraktowanych jako etapy całościowego procesu z-IME/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>. Badania przeprowadzono dla jednej próbki odcieku stosując mikroelektrody Ch i GAC 4H w stosunku Fe/GAC 40/10 [g/dm<sup>3</sup>], oraz dawkę H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/ChZT 2/1. Oceny efektywności poszczególnych etapów dokonano w oparciu o szereg parametrów charakteryzujących właściwości fizykochemiczne odcieków (ChZT, OWO, BZT<sub>5</sub>, pH, przewodność właściwa, stężenie azotu ogólnego i chlorków, absorbancję przy 254 nm, SUVA). Wykazano, że każdy z kolejnych etapów podczyszczania odcieków przynosił korzyści w kontekście usuwania zanieczyszczeń, poprawiając ich biodegradowalność. Potwierdzono to wykonując analizy chromatograficzne HPLC i GC-MS odcieków przed i po poszczególnych etapach podczyszczania (rozdział 11.11).

W rozdziale 11.12 przedstawiono wyniki badań, które koncentrowały się na wpływie sposobu przygotowania węgla aktywnego GAC 4H (wysycanie go w różnych odciekach) na efektywność redukcji ChZT w procesie IME oraz sorpcji. Doktorantka wykazała, że zastosowanie węgla aktywnego, który nie był poddawany wcześniejszemu wysyceniu w odciekach, prowadzi do wyraźnie lepszych rezultatów w zakresie redukcji ChZT w procesie z-IME w porównaniu z węglem wysycanym w odciekach.

Rozdział 12, obejmujący 21 stron, stanowi dyskusję wyników badań. Doktorantka szczegółowo omówiła uzyskane rezultaty, zwracając uwagę zarówno na różnice, jak i podobieństwa w porównaniu z wynikami innych autorów. Dokonała wnikliwej analizy





wpływu różnych parametrów na poszczególne etapy zmodyfikowanego procesu wewnętrznej mikroelektrolizy, wykorzystywanego do oczyszczania odcieków. Zaproponowała również mechanizmy odpowiedzialne za zaobserwowane zjawiska.

Uwaga:

- Rysunek 38 ilustruje udział poszczególnych procesów cząstkowych w zmodyfikowanym procesie IME (z-IME), jednak opis w legendzie „z-IME” (oznaczony kolorem zielonym) może wprowadzać w błąd. Zdaniem recenzenta, bardziej właściwe byłoby zastąpienie terminu „z-IME” określeniem „utlenianie elektrochemiczne”(?).

Pracę kończy rozdział 13, który zawiera wnioski z przeprowadzonych badań. Sformułowane wnioski, zarówno ogólne, jak i szczegółowe, potwierdzają osiągnięcie założonych celów pracy oraz stanowią dowód na poparcie tezy postawionej przez Doktorantkę. Wnioski wskazują na potencjał procesu IME w oczyszczaniu odcieków komunalnych. Są wyczerpujące i dobrze ugruntowane, mają charakter zarówno poznawczy, jak i aplikacyjny, co sprawia, że praca wnosi cenny wkład w rozwój efektywnych i innowacyjnych metod oczyszczania odcieków ze składowisk odpadów komunalnych.

Po zapoznaniu się z treścią rozprawy doktorskiej, za elementy nowości naukowej stanowiące oryginalny dorobek Doktorantki uważam:

- Zaproponowanie innowacyjnych modyfikacji mających na celu zwiększenie efektywności procesu mikroelektrolizy wewnętrznej (IME) w oczyszczaniu ustabilizowanych odcieków ze składowisk komunalnych, poprzez zastosowanie koagulacji wstępnej oraz dodatku nadtlenu wodoru ( $H_2O_2$ ).
- Oszacowanie roli koagulacji wstępnej oraz procesu sorpcji w całkowitym procesie mikroelektrolizy wewnętrznej, stosowanej do oczyszczania odcieków ze składowisk komunalnych.
- Analizę wpływu sposobu przygotowania węgla aktywnego przed procesem IME na efektywność tego procesu.
- Określenie wpływu szerokiego zakresu parametrów procesowych na efektywność zmodyfikowanego procesu IME w oczyszczaniu rzeczywistych odcieków ze składowiska odpadów łubna.

Rezultaty przeprowadzonych badań nie tylko wzbogacają teoretyczną wiedzę na temat procesu mikroelektrolizy wewnętrznej, lecz także stanowią solidną podstawę do dalszych badań i optymalizacji technologii oczyszczania odcieków, oferując bardziej zrównoważone i efektywne rozwiązania.



#### 4. Pytania dyskusyjne

Poza wymienionymi powyżej uwagami, chciałabym przedstawić pytania, które nasunęły mi się podczas czytania pracy i które mogą być istotne dla dalszej dyskusji w trakcie publicznej obrony:

1. W teoretycznej części pracy omówiono metody usuwania zanieczyszczeń, które można zastosować do oczyszczania odcieków ze składowisk odpadów. Dla wielu z nich wskazano ograniczenia do stosowania oraz wady. Jakie są potencjalne ograniczenia zastosowania procesu IME w warunkach rzeczywistych składowisk odpadów komunalnych? Z jakimi wyzwaniami można się spotkać przy implikacji tego procesu na większą skalę?
2. Jakie mogą być długoterminowe skutki ekologiczne stosowania procesu IME w technologii oczyszczania odcieków na dużą skalę? Jakie są potencjalne ryzyka związane z używaniem żelaza i węgla aktywnego w procesie IME?
3. W jaki sposób można odzyskać/zagospodarować GAC stosowany w procesie IME? Czy można stosować regenerację takiego węgla? Jak na cykl życia tego materiału wpływają zanieczyszczenia inne niż związki organiczne obecne w odciekach ze składowisk?
4. Mimo, że Doktorantka wspomina o potencjalnych korzyściach kosztowych, brakuje analizy ekonomicznej. Czy w oparciu o przeprowadzone badania podjęto wstępną próbę oceny ekonomicznej rozważanych procesów? Mając na uwadze efektywność usuwania zanieczyszczeń oraz ponoszone nakłady finansowe na przeprowadzenie danego procesu, który z wariantów można chociaż wstępnie wskazać jako najoptymalniejszy do zastosowania w skali technicznej?
5. Jakie kierunki dalszych badań byłyby zasadne w kontekście uzyskanych wyników i wyciągniętych wniosków? Czy są plany dotyczące analizy wpływu specyficznych rodzajów zanieczyszczeń organicznych na efektywność procesu IME? Czy w literaturze są dostępne informacje w jaki sposób różne profile zanieczyszczeń w odciekach mogą wpływać na efektywność tego procesu?

#### 5. Uwagi edytorskie i inne

Praca napisana jest poprawnym językiem, a styl jest właściwy dla tekstu naukowego. Niestety Autorce nie udało się zupełnie uniknąć pewnych błędów podczas edycji rozprawy. Należy jednak podkreślić, że poniższe uwagi w żadnym stopniu nie umniejszają wartości naukowej rozprawy.

Uwagi:



- Numeracja stron dysertacji powinna rozpoczynać się od strony tytułowej, a nie od „Wstępu”, który znajduje się na 11 stronie.
- Str. 8 – jest „chloro pochodne”, powinno być „chloropochodne”.
- Rys. 3 – literówka: jest „hybryfowe” i „anamox”, powinno być „hybrydowe” i „anammox”.
- Str. 16 – nieprawidłowo podana nazwa angielska PAC – powinno być: polyaluminum chloride.
- Str. 18 – jest „nie węglowe”, powinno być „niewęglowe” oraz jest „temp” a powinno być: „temperaturze”.
- Str. 20 – jest „Froundlicha”, powinno być „Freundlicha”.
- Str. 20 – jest „rozkład”, powinno być „rozkładzie”, jest „73,1”, powinno być „73,1%”.
- Str. 20 – jest „Ferraz i Yuan 2020 a i b”, powinno być „Ferraz i Yuan [70, X?]”. W bibliografii widnieje tylko jedna praca tych autorów, a nie dwie jak podaje Autorka.
- Str. 21 – jest „Feog.” i „Fe(og.)”, powinno być „Fe<sub>og</sub>”.
- Str. 23 – jest „chloro pochodnych”, powinno być „chloropochodnych”.
- Str. 23 – jest „foto katalityczne”, powinno być „fotokatalityczne”.
- W języku polskim funkcję separatora dziesiętnego pełni przecinek a nie kropka, tymczasem w pracy pojawiają się obie formy.
- Str. 27 – jest „pole powierzchni”, powinno być „powierzchnia właściwa”.
- Tabela 4 (str. 36) – jest „pH 75-8,2”, powinno być „pH 7,5-8,2”.
- Str. 38 – jest „Kontynuując proces ZVI/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> kolejne 105 min uzyskali ostatecznie ubytek ChZT 62,7%”, powinno być: „Kontynuując proces ZVI/H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> przez kolejne 105 minut, uzyskali ostatecznie 62,7% redukcji ChZT”.
- Rys. 10, 11 i 31 powinny być opisane odpowiednio jako Fot. 1, Fot. 2 i Fot. 3.
- Str. 115 – jest „linii pros tej”, powinno być „linii prostej”.
- Spis literatury opracowany został niestarannie. Przede wszystkim brak jest jednolitego schematu wykazu publikacji. W niektórych pozycjach brakuje danych bibliograficznych, np. roku publikacji (poz. 13, 47, 70, 78), a w niektórych (np. poz. 26) tytuł jest podany w języku polskim, gdzie w oryginale jest w j. angielskim. Ponadto, jeżeli w pracy stosuje się cytowania przy użyciu numerów w nawiasach kwadratowych, nie ma konieczności podawania w spisie literatury liter a, b, c po roku publikacji. Tym bardziej, nie ma potrzeby podawać ich po numerze np. [124a], [124b].
- Błędy interpunkcyjne – np. str. 5, 7, 18, 20, 24, 28, 31, 34, 38, 42, 43, 49, 52, 99, 138.

## 6. Podsumowanie i wniosek końcowy



Recenzowana **rozprawa doktorska** Pani mgr inż. Joanny Ładyńskiej pt.: „Zastosowanie procesu wewnętrznej mikroelektrolizy do oczyszczania odcieków z ustabilizowanych składowisk odpadów komunalnych” realizowana pod opieką promotorską dr hab. inż. Jeremiego Naumczyka, prof. PW oraz dr Małgorzaty Kucharskiej, **stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego**, prezentuje interesujące wyniki badań i cechuje się właściwym poziomem naukowym. Uzyskane rezultaty mają zarówno charakter poznawczy, jak i praktyczny, stanowiąc dobrą podstawę do dalszych badań naukowych. Przyjęta koncepcja pracy, metodyka badań, prawidłowa interpretacja wyników oraz właściwe wnioski dowodzą, że **doktorantka wykazała się wiedzą teoretyczną w zakresie dyscypliny inżynieria środowiska**, która obecnie zawiera się w **dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka**, w pełni pozwalającą na zrealizowanie założonych celów pracy. Treść rozprawy **świadczy o zdolności i pełnej gotowości doktorantki do samodzielnego prowadzenia pracy naukowej**.

Stwierdzam zatem, że przedłożona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Joanny Ładyńskiej pt.: „Zastosowanie procesu wewnętrznej mikroelektrolizy do oczyszczania odcieków z ustabilizowanych składowisk odpadów komunalnych” spełnia warunki określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. 2018 poz. 1668 z późn. zm.) i **wnioskuje** do Rady Naukowej Dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka na Wydziale Instalacji Budowlanych, Hydrotechniki i Inżynierii Środowiska Politechniki Warszawskiej **o dopuszczenie** mgr inż. Joanny Ładyńskiej do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.