

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Pawła Lejwody

**pt. „Model procesu oczyszczania ścieków z wykorzystaniem związków ceru
pochodzących z odpadów przemysłowych” przygotowanej pod kierunkiem naukowym
promotora prof. dr hab. inż. Barbary Bialeckiej
i promotora pomocniczego dr hab. inż. Macieja Thomasa**

Podstawą formalną niniejszej recenzji jest pismo Dyrektora Głównego Instytutu Górnictwa – Państwowego Instytutu Badawczego w Katowicach z dnia 16.01.2026 roku, Pana Jarosława Zagórowskiego, informujące o powołaniu mnie przez Radę Naukową GIG Państwowego Instytutu Badawczego na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Pawła Lejwody.

1. Ocena wyboru tematu pracy i jej celu

W 2016 roku Unia Europejska wskazała na konieczność traktowania odpadów jak cennych surowców, których wykorzystanie będzie stanowiło możliwość zamykania obiegów, w taki sposób, aby stawały się one surowcem do kolejnych procesów produkcji. Gospodarka o obiegu zamkniętym stała się jednym z priorytetów polityki gospodarczej Komisji Europejskiej i nową koncepcją rozwoju, w której surowce powinny pozostawać w gospodarce tak długo, jak jest to możliwe, a wytwarzanie odpadów powinno być jak najbardziej zminimalizowane. Idea ta uwzględnia wszystkie etapy cyklu życia produktu, zaczynając od jego projektowania, poprzez produkcję, konsumpcję, zbieranie odpadów, aż do ich zagospodarowania.

W marcu 2024 roku Rada Europy przyjęła europejski akt o surowcach krytycznych. W akcie zidentyfikowano 34 surowce krytyczne, które są nieodzowne dla funkcjonowania i integralności szeregu ekosystemów przemysłowych. Niektóre są szczególnie ważne strategicznie z uwagi na cele UE w dziedzinie energii odnawialnej, cyfryzacji, kosmosu

i obronności. Wśród nich są metale lekkie ziem rzadkich, do których należy cer oraz pierwiastki takie jak fosfor. Popyt na nie ma rosnąć wykładniczo, a ich produkcja jest złożona, dlatego istnieje wyższe ryzyko wystąpienia problemów z podażą.

Większość metali ziem rzadkich jest importowana spoza UE, ale europejska ustawa o surowcach krytycznych ma na celu dywersyfikację i zabezpieczenie dostaw, w tym pozyskiwanie 25% potrzebnych materiałów poprzez recykling. Każdego roku UE importuje około 12 900 ton pierwiastków ziem rzadkich. Przewiduje się, że popyt na ww. grupę pierwiastków wzrośnie sześciokrotnie do 2030 roku i siedmiokrotnie do 2050 roku, a obecnie mniej niż 1% pierwiastków ziem rzadkich jest poddawane recyklingowi w Unii Europejskiej.

Akt o surowcach krytycznych wzmacnia wszystkie etapy europejskiego łańcucha wartości, dywersyfikuje import do Unii Europejskiej w celu zmniejszenia strategicznych zależności, zwiększa zdolność Unii Europejskiej do monitorowania i łagodzenia ryzyka zakłóceń w dostawach surowców krytycznych oraz usprawnia gospodarkę o obiegu zamkniętym i zrównoważony rozwój.

W ramach realizacji pracy doktorskiej prowadzono badania obejmujące syntezę soli ceru z odpadu przemysłowego, zastosowanie jonów tego pierwiastka jako koagulantu w oczyszczaniu ścieków browarniczych oraz ocenę efektywności procesu w usuwaniu fosforanów(V). Dodatkowo przeprowadzono badania nad możliwością odzysku ceru z osadu powstającego po koagulacji. Rozwiązanie to wpisuje się w założenia gospodarki o obiegu zamkniętym, umożliwiając zarówno znaczne obniżenie zanieczyszczeń, jak i ponowne wykorzystanie cennych surowców.

Wybór tematyki badawczej wynika z potrzeby analizy i rozwoju rozwiązań technologicznych ukierunkowanych na rozwiązanie zidentyfikowanego problemu badawczego o istotnym znaczeniu naukowym i aplikacyjnym. Podejmowane zagadnienie odnosi się do aktualnych wyzwań technicznych i środowiskowych, wymagających zastosowania zaawansowanych metod badawczych oraz podejścia systemowego.

Tematyka pracy obejmuje ilościową ocenę badanych procesów oraz ich modelowanie przy użyciu metod analitycznych i narzędzi statystycznych. Pozwala to na identyfikację zależności pomiędzy kluczowymi parametrami procesowymi oraz ocenę ich wpływu na efektywność działania analizowanego rozwiązania. Takie podejście umożliwia nie tylko weryfikację hipotez badawczych, lecz także optymalizację warunków prowadzenia procesów.

W odniesieniu do wyżej opisanych założeń Doktorant dokonał bardzo trafnego wyboru tematu swojej dysertacji. W świetle powyższego wysoko oceniam podjętą tematykę.

2. Ocena formalna pracy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Pawła Lejwody stanowi spójny tematycznie zbiór czterech artykułów naukowych opublikowanych w latach 2023-2025. Opiniowana rozprawa doktorska obejmuje 130 stron. W pracy umieszczono 10 rysunków i 13 tabel. Wyniki prezentowanych przez Doktoranta prac badawczych zostały opracowane i opisane w następujących publikacjach:

- Lejwoda, P., Białecka, B., Thomas, M. (2023). Removal of phosphate from brewery wastewater by cerium(III) chloride originating from spent polishing agent: Recovery and optimization studies. *Science of The Total Environment*, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162643>, (IF = 9,8; 200 pkt MNiSW)
- Lejwoda, P., Białecka, B., Barbusiński, K., & Thomas, M. (2024). Recovery of Cerium Salts from Sewage Sludge Resulting from the Coagulation of Brewery Wastewater with Recycled Cerium Coagulant. *Materials*, 17(4), 938. <https://doi.org/10.3390/ma17040938>, (IF = 3,4; 140 pkt MNiSW)
- Lejwoda, P., Białecka, B., & Thomas, M. (2024). Holistic insight into the viability of employing cerium(IV) sulphate to oxidise toxic contaminants in effluent from the coal gasification process: Optimisation studies. *Journal of Water Process Engineering*, 67, 106243. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.106243>, (IF = 6,3; 100 pkt MNiSW)
- Lejwoda, P., Białecka, B., Śliwińska, A., Krawczyk, P., & Thomas, M. (2025). Innovative Integrated Model of Industrial Wastewater Treatment with the Circular Use of Cerium Compounds as Multifunctional Coagulants: Comprehensive Assessment of the Process and Environmental and Economic Aspects. *Molecules*, 30(16), 3428. <https://doi.org/10.3390/molecules30163428>, (IF = 4,6; 140 pkt MNiSW)

W pracy przedstawionej do recenzji znalazły się załączniki zawierające publikacje wchodzące w skład dysertacji o łącznym sumarycznym IF 24,1 i 580 punktach z listy MNiSW. Załączone oświadczenia współautorów wskazują na wysoki wkład, od 60% do 80%, mgr inż. Pawła Lejwody w badania.

Zbiór prac został opatrzony 45-stronicowym opisem osiągnięcia naukowego, który rozpoczyna wykaz skrótów (rozdział 2) oraz streszczenia w języku polskim i angielskim (rozdziały 3 i 4). Rozdział 5 stanowi syntetyczne wprowadzenie w tematykę prac badawczych oraz uzasadnienie jej wyboru.

W rozdziale 6 opisano główny cel pracy, którym jest opracowanie metodyki odzysku i zastosowania soli ceru jako innowacyjnych reagentów do oczyszczania wybranych ścieków przemysłowych. Doktorant dokonał podziału realizowanych prac badawczych na naukowe, dotyczące charakterystyki materiału badawczego i metodyki prowadzonych procesów, wykorzystania metody powierzchni odpowiedzi do modelowania i optymalizacji prowadzonych procesów oraz oceny aspektów ekologicznych i ekonomicznych zaproponowanych procesów. Jako cel użytkowy Doktorant wyznaczył optymalizację procesu usuwania fosforanów(V) z zastosowaniem koagulantu cerowego, optymalizację procesu ekstrakcji ceru z osadu ściekowego z zastosowaniem kwasu chlorowodorowego oraz optymalizację procesu utleniania zanieczyszczeń z symulacji procesu podziemnego zgazowania węgla kamiennego.

Rozdział 7 zwięźle i logicznie opisuje metodykę prowadzonych badań. Rysunek 2 stanowi dodatkowe podsumowanie przeprowadzonych eksperymentów, które stanowią całość, a każdy kolejny krok badawczy ma uzasadnienie w zakończonym etapie badań. Rozdział 8 uzasadnia dobór metod analitycznych i optymalizacyjnych, jak również wybór materiałów badawczych, które stanowiły bogate w cer odpady przemysłowe: muł węglowy, popiół ze współspalania węgla kamiennego z RDF, odpadowy materiał skalny z hałdy pochodzący z procesów przeróbki węgla kamiennego, powszechnie występujący w aglomeracji górnośląskiej oraz zużyty proszek polerski (z CeO_2 jako głównym składnikiem).

Na szczególną uwagę zasługuje ocena ekologiczna i ekonomiczna procesu. Pierwszą dokonano metodą LCA (*Life Cycle Assessment*). Druga stanowi wstępną ocenę wykonalności technologicznej proponowanej metody oczyszczania ścieków z koagulantem cerowym i jego recyklingiem. W ocenie uwzględniono przebieg reakcji chemicznych, parametry technologiczne, konfigurację aparatury oraz bilans masowy reagentów i produktów. Dodatkowo zidentyfikowano produkty uboczne (osady, odcieki, gazy reakcyjne) i ich potencjalny wpływ środowiskowy. Przyjęto założenia minimalizacji emisji poprzez odzysk HCl , wykorzystanie pozostałych osadów jako źródła energii oraz odzysk soli z wód poreakcyjnych.

Rozdział 9 omawia najważniejsze osiągnięcia przedstawione do oceny, zaś rozdział 10 odnosi się do postawionych tez. Podsumowaniem uzyskanych wyników jest rozdział 11, w którym zostały zaprezentowane wnioski oraz perspektywy dalszych prac badawczych.

Prezentowana rozprawa doktorska charakteryzuje się poprawną strukturą. Napisana jest w sposób czytelny, jasny i precyzyjny. Na wyróżnienie zasługuje graficzne przedstawienie

harmonogramu prac eksperymentalnych, przedstawione schematy nie pozostawiają wątpliwości w konsekwencji planowanych doświadczeń.

3. Ocena merytoryczna wartości naukowej rozprawy

Przedstawione w rozprawie doktorskiej wyniki badań dotyczące opracowania i weryfikacji procesu oczyszczania ścieków z wykorzystaniem związków ceru pochodzących z odpadów przemysłowych oceniam bardzo wysoko pod względem merytorycznym, metodycznym oraz aplikacyjnym. Doktorant przeprowadził szeroko zakrojone badania obejmujące zarówno aspekty technologiczne, jak i środowiskowe oraz ekonomiczne, co jest podejściem rzadko spotykanym w pracach doktorskich i zasługuje na szczególne podkreślenie.

Najistotniejszą zaletą uzyskanych wyników jest **bardzo wysoka skuteczność opracowanych procesów oczyszczania ścieków**, potwierdzona jednoznacznymi danymi ilościowymi. Usunięcie fosforanów(V) ze ścieków browarniczych na poziomie 99,86% oraz niemal całkowite związanie zastosowanego ceru w osadzie (99,94%) świadczą o wyjątkowo wysokiej efektywności koagulantów cerowych, wyraźnie przewyższającej skuteczność klasycznych koagulantów żelazowych i glinowych. Równie wysoką efektywność utleniania zanieczyszczeń organicznych (WWA, fenole, cyjanki) uzyskano w symulacji procesu Fentona, ścieków pochodzących z podziemnego zgazowania węgla kamiennego, zarówno przy zastosowaniu samego siarczynu(VI) ceru(IV), jak i w układzie modyfikowanym nadtlakiem wodoru.

Na szczególne uznanie zasługuje **kompleksowe ujęcie problemu badawczego**, obejmujące nie tylko usuwanie zanieczyszczeń, lecz również odzysk i ponowne wykorzystanie ceru z osadów ściekowych. Uzyskane wysokie wydajności odzysku ceru (około 97%) oraz wysoka czystość otrzymanych soli cerowych (powyżej 95–98%) jednoznacznie potwierdzają możliwość zamknięcia obiegu tego pierwiastka w procesach oczyszczania ścieków. Takie podejście jest w pełni zgodne z aktualnymi założeniami gospodarki o obiegu zamkniętym oraz polityką surowcową Unii Europejskiej w zakresie surowców krytycznych.

Istotnym atutem rozprawy jest **poprawne i konsekwentne zastosowanie zaawansowanych metod statystycznych** (metoda powierzchni odpowiedzi) do modelowania i optymalizacji procesów. Opracowane modele matematyczne zostały zweryfikowane eksperymentalnie, co potwierdza ich wysoką jakość oraz świadczy o dojrzałości metodologicznej Doktoranta.

Na wyróżnienie zasługuje **rozszerzenie analizy wyników o ocenę środowiskową (LCA) oraz ekonomiczną (DGC)**, przeprowadzone w oparciu o realistyczne założenia przeskalowania procesu do warunków przemysłowych. Uzyskane wyniki pozwalają na

obiektywną ocenę potencjalnych korzyści środowiskowych, takich jak redukcja eutrofizacji, przy jednoczesnym wskazaniu kosztów i obciążeń środowiskowych wynikających z zastosowania reagentów chemicznych.

Przedstawione wyniki posiadają również pewne ograniczenia, o których należy wspomnieć. Większość badań przeprowadzono w skali laboratoryjnej oraz półtechnicznej, a weryfikacja przemysłowa ogranicza się do analiz modelowych. Brakuje wyników długookresowych testów prowadzonych w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych oczyszczalni ścieków, co uniemożliwia pełną ocenę stabilności procesu oraz jego odporności na zmienność składu ścieków.

Kolejnym ograniczeniem jest **wysokie zużycie reagentów chemicznych**, w szczególności kwasu solnego oraz kwasu szczawiowego, co znajduje odzwierciedlenie w wynikach analizy LCA jako istotne obciążenie środowiskowe. Choć Autor słusznie proponuje odzysk HCl i zamknięty obieg reagentów, rozwiązania te wymagają dalszego dopracowania i potwierdzenia w skali technicznej.

Wyniki badań w ograniczonym stopniu odnoszą się do **długoterminowej stabilności związków ceru w osadach** wynikającego ze zmiennych warunków środowiskowych. Zagadnienie to ma istotne znaczenie z punktu widzenia bezpieczeństwa środowiskowego i może stanowić ważny kierunek dalszych badań.

Należy wskazać, że **analiza ekonomiczna potwierdza wyższą kosztochłonność opracowanej technologii** w porównaniu z konwencjonalnym strącaniem chemicznym z wykorzystaniem soli żelaza i glinu. Ogranicza to możliwość jej powszechnego wdrożenia, choć Doktorant trafnie wskazuje potencjalne niszowe zastosowania w instalacjach wymagających bardzo wysokiej skuteczności usuwania fosforu lub ograniczenia ilości osadów ściekowych.

Podsumowując, stwierdzam, że **wyniki badań przedstawione w rozprawie doktorskiej są oryginalne, spójne i mają istotną wartość naukową oraz aplikacyjną**. Doktorant wykazał się bardzo dobrą znajomością problematyki, umiejętnością planowania i realizacji złożonych badań eksperymentalnych oraz krytycznej analizy uzyskanych rezultatów. Wskazane ograniczenia nie podważają wartości pracy, lecz wyznaczają naturalne kierunki dalszych badań rozwojowych i wdrożeniowych. Przedstawione wyniki w pełni potwierdzają postawione tezy rozprawy i spełniają wymagania stawiane rozprawom doktorskim.

Po przeczytaniu pracy nasunęło mi się kilka pytań. Bardzo proszę o ustosunkowanie się do nich podczas publicznej obrony:

1. W jaki sposób zastosowanie związków ceru wpływa na efektywność usuwania fosforu ze ścieków oraz na ograniczenie zjawiska eutrofizacji w zbiornikach wodnych?
2. Jakie mechanizmy chemiczne decydują o wysokiej skuteczności koagulantów cerowych w usuwaniu fosforanów(V)? Z czego wynika przewaga koagulantów cerowych nad klasycznymi solami żelaza i glinu?
3. Jakie są środowiskowe korzyści i potencjalne zagrożenia wynikające z akumulacji ceru w osadach ściekowych, zwłaszcza w kontekście ich dalszego zagospodarowania?
4. Jakie ograniczenia dla stabilności procesu mogą wynikać z eksploatacji technologii w rzeczywistych warunkach oczyszczalni, przy zmiennym składzie ścieków?

Podsumowanie

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska reprezentuje wysoki poziom naukowy. Opisane wyniki badań są spójne i przekonujące, a ich mocną stroną jest połączenie bardzo wysokiej skuteczności oczyszczania ścieków z ideą cyrkularnego obiegu surowców krytycznych. Ograniczenia dotyczą przede wszystkim skali badań, kosztów oraz złożoności technologicznej procesu, co jednak nie umniejsza ich znaczenia poznawczego i aplikacyjnego. Wyniki stanowią solidną podstawę do dalszych badań wdrożeniowych i rozwoju zaawansowanych technologii oczyszczania ścieków zgodnych z zasadami zrównoważonego rozwoju.

W świetle powyższego stwierdzam, że przedstawiona do recenzji praca mgr inż. Pawła Lejwody pt. „Model procesu oczyszczania ścieków z wykorzystaniem związków ceru pochodzących z odpadów przemysłowych”, przygotowana pod kierunkiem naukowym promotora prof. dr hab. inż. Barbary Białeckiej oraz promotora pomocniczego dr hab. inż. Macieja Thomasa, **spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim**, określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz.U.2021.478) i stawiam wniosek do Rady Naukowej Głównego Instytutu Górnictwa - Państwowego Instytutu Badawczego w Katowicach o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo, energetyka.

Ze względu na wysoką wartość naukową i aplikacyjną opisanych wyników badań proszę Radę Naukową Głównego Instytutu Górnictwa - Państwowego Instytutu Badawczego w Katowicach o wyróżnienie przedstawionej pracy doktorskiej pana mgr inż. Pawła Lejwody.

Elżbieta Sobiech

Łódź, 12.02.2026