

Dr hab. inż. Maciej Thomas, Prof. PK
Katedra Technologii Środowiskowych
Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki
Politechnika Krakowska im. T. Kościuszki

Kraków, 11.05.2026 r.

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr. inż. Kirilla Fedorova, pt.: Degradacja organicznych zanieczyszczeń wody z zastosowaniem hybrydowych zaawansowanych procesów chemicznych wykorzystujących zjawisko kawitacji.

Wstęp i formalna charakterystyka pracy

Formalną postawą niniejszej recenzji jest pismo Przewodniczącego Rady Dyscypliny Nauki Chemiczne Politechniki Gdańskiej, dr. hab. inż. Marka Tobiszewskiego, Prof. PG z dn.: 12.03.2026 r., L. Dz. 57 WCh/Dz/2025, informujące o powołaniu mnie na mocy uchwały Rady Dyscypliny Nauki Chemiczne Politechniki Gdańskiej z dn.: 10.03.2026 r. na recenzenta rozprawy doktorskiej Pana mgr. inż. Kirilla Fedorova. W piśmie jw. poinformowano, że praca została wykonana pod kierunkiem Pana dr. hab. inż. Grzegorza Boczkaja, Prof. PG, przeszła pozytywną weryfikację w systemie antyplagiatowym oraz, że stopień doktora zostanie nadany w dziedzinie *nauk ścisłych i przyrodniczych*, w dyscyplinie *nauki chemiczne*. Do pisma dołączono rozprawę doktorską w formie monografii, jej wersję elektroniczną (CD) oraz informację o zasadach wyróżniania rozpraw doktorskich.

Oceniana rozprawa doktorska dotyczy badań nad hybrydowymi, kawitacyjnymi zaawansowanymi procesami chemicznymi, zastosowanymi do rozkładu zanieczyszczeń organicznych występujących w środowisku wodnym. W dysertacji doktorskiej opracowano i poddano ocenie procesy hybrydowe, tj.: kawitację akustyczną (AC) lub hydrodynamiczną (HC) z zaawansowanymi procesami utleniania (AOPs), w przypadku których zastosowano ozon (O_3) lub rodniki siarczanowe ($SO_4^{\cdot-}$) do degradacji związków z grupy BTEX oraz 1,4-dioksanu, przemysłowego rozpuszczalnika organicznego stosowanego głównie do produkcji farb, lakierów, żywic, wosków, pochodnych celulozy i in. W kolejnej fazie badań, HC zintegrowano z zaawansowanym procesem redukcyjnym (ARP), przy czym zastosowano w tym przypadku anion siarczanowy(IV)/UV, ($SO_3^{\cdot-}/UV$), w celu rozkładu kwasu kłofibrynowego (CLA), o którym wiadomo, że jest aktywnym metabolitem leków z grupy

Dr hab. inż. Maciej Thomas, Prof. PK

ORCID ID: 0000-0001-7348-1253

Scopus ID: 57195371256

Web of Science Researcher ID: AFJ-0799-2022

Google Scholar: ADN-8742-2022

Dyscyplina: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka (ISGE), 100% N

Katedra Technologii Środowiskowych, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Tel.: +48 12 628 28 73 (402C, W-2), +48 12 628 21 23 (H120, W-15), maciej.thomas@pk.edu.pl, www.srodowisko.pk.edu.pl

fibratów, np.: klofibratu i etofibratu, stosowanych w celu obniżenia poziomu lipidów we krwi. W dysertacji przedstawiono wyniki badań wpływu (*i*) pH środowiska, (*ii*) stosunku molowego prekursora rodników do badanego zanieczyszczenia oraz (*iii*) określono wpływ obecności anionów nieorganicznych. Dodatkowo, dominujące formy rodnikowe oznaczono na podstawie eksperymentów wygaszania, a na podstawie zidentyfikowanych produktów pośrednich (metodami GC-MS i HPLC-UVDAD) zaproponowano ścieżki degradacji badanych zanieczyszczeń. Otrzymane i zaprezentowane w dysertacji doktorskiej wyniki badań wykazały, że kluczową rolę w aktywacji reagentów oraz intensyfikacji procesów (AOPs i ARPs), odgrywa kawitacja (efekt synergistyczny). W układzie HC/ARP potwierdzono obecność reaktywnych form redukcyjnych, a ich reaktywność względem CLA poparto obliczeniami teoretycznymi.

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska jest autorską monografią, zawierającą obszerny opis zaplanowanych i przeprowadzonych przez Doktoranta badań oraz otrzymanych wyników, poszerzoną o przegląd literatury oraz dyskusję wyników badań. Integralną częścią rozprawy są trafnie sformułowane wnioski oraz nakreślona perspektywa dalszych, interesujących badań. W rozprawie doktorskiej przedstawiono wyniki badań procesów opartych na kawitacji (wraz z modyfikacjami) zaczerpnięte z pięciu artykułów naukowych do których Doktorant wniósł istotny wkład:

K. Fedorov, X. Sun, G. Boczkaj, Combination of hydrodynamic cavitation and SR-AOPs for simultaneous degradation of BTEX in water, *Chemical Engineering Journal*, 417, 2021, 128081, IF 16.74, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.128081>.

K. Fedorov, M. Plata-Gryl, J. Ali Khan, G. Boczkaj, Ultrasound-assisted heterogeneous activation of persulfate and peroxymonosulfate by asphaltenes for the degradation of BTEX in water, *Journal of Hazardous Materials*, 397, 2020, 122804, IF 10.58, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2020.122804>.

K. Fedorov, L. Kong, C. Wang, G. Boczkaj, High-performance activation of ozone by sonocavitation for BTEX degradation in water, *Journal of Environmental Management*, 363, 2024, 121343, IF 8.4, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121343>.

K. Fedorov, M. P. Rayaroth, N. S. Shah, G. Boczkaj, Activated sodium percarbonate-ozone (SPC/O₃) hybrid hydrodynamic cavitation system for advanced oxidation processes (AOPs) of 1,4-dioxane in water, *Chemical Engineering Journal*, 456, 2023, 141027, IF 13.3, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.141027>.

K. Fedorov, C. Wang, N. S. Shah, G. Boczkaj, Boosting the radical-induced reductive degradation of clofibric acid in water: Synergistic effect of SO_3^{2-} /UV and hydrodynamic cavitation (HC), *Journal of Environmental Management*, 391, 2025, 126506, IF 8.4, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2025.126506>.

Analiza oświadczeń o autorstwie i wkładzie poszczególnych autorów (zawarta na końcu publikacji) w powstanie publikacji dowodzi, że Doktorant wniósł istotny i większościowy wkład w powstanie każdej z publikacji poprzez m.in.: opracowanie koncepcji i metodologii badań, opracowanie metod analiz chemicznych i ich walidację, wykonanie badań, gromadzenie, analizę, interpretację i wizualizację wyników badań oraz napisanie wersji wstępnych i końcowych manuskryptów, a także uczestniczenie w ich formatowaniu i korekcie treści, w celu zwiększenia ich czytelności i merytorycznej poprawności. Ponadto, we wszystkich publikacjach, Doktorant jest pierwszym autorem, a artykuły zostały opublikowane w czasopismach o wysokich współczynnikach wpływu, takich jak: *Chemical Engineering Journal*, *Journal of Hazardous Materials* i *Journal of Environmental Management*.

Formalnie, oceniana rozprawa doktorska liczy 146 stron, składa się z 7 rozdziałów (w tym listy osiągnięć naukowych doktoranta i bibliografii), zawiera 44 rysunki, 6 tabel, 255 pozycji literaturowych, a także spis skrótów i akronimów, który ułatwia lekturę rozprawy.

Ocena celu i tematyki rozprawy doktorskiej

Oceniając cel i tematykę rozprawy doktorskiej należy zauważyć, że rosnące globalne zapotrzebowanie na wodę odpowiedniej jakości, stymulowane jest dynamicznym rozwojem przemysłu oraz wykładniczym wzrostem populacji i stanowi obecnie jedno z kluczowych wyzwań współczesnej nauki. Dodatkowo należy wskazać, że problem deficytu zasobów wodnych, potęgowany jest przez powszechną antropopresję, manifestującą się obecnością antropogenicznych zanieczyszczeń chemicznych w hydrosferze. W tym kontekście, identyfikacja oraz implementacja wysokoefektywnych metod usuwania zanieczyszczeń z wód i ścieków oraz ich monitorowanie w środowisku wodnym determinują długoterminowe bezpieczeństwo hydrologiczne. Metody oczyszczania ścieków dobierane są w zależności od występujących w nich zanieczyszczeniach i mogą obejmować metody fizyczne, chemiczne i biologiczne (np.: beztlenową fermentację metanową, usuwającą zasadniczy ładunek organiczny z jednoczesną produkcją biogazu łącznie z doczyszczaniem, w warunkach tlenowych, metodą osadu czynnego lub złóż biologicznych, zapewniającą efektywną eliminację związków azotu i fosforu). Zazwyczaj łączy się kilka metod uzyskując zwiększoną efektywność

Dr hab. inż. Maciej Thomas, Prof. PK

ORCID ID: 0000-0001-7348-1253

Scopus ID: 57195371256

Web of Science Researcher ID: AFJ-0799-2022

Google Scholar: ADN-8742-2022

Dyscyplina: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka (ISGE), 100% N

Katedra Technologii Środowiskowych, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Tel.: +48 12 628 28 73 (402C, W-2), +48 12 628 21 23 (H120, W-15), maciej.thomas@pk.edu.pl, www.srodowisko.pk.edu.pl

usuwania zanieczyszczeń. Dotychczas stosowane metody lub ich kombinacje nie zawsze charakteryzują się odpowiednią efektywnością, co jest związane z niewielką podatnością zanieczyszczeń na ich usuwanie lub biodegradację. Problemy te ujawniają się szczególnie w przypadku specyficznych ścieków przemysłowych, ale dotyczą także ścieków komunalnych, które zawierają mikrozanieczyszczenia, czyli substancje które występują w środowisku wodnym w niskich stężeniach (od ng/l do µg/l) obejmujące m. in.: farmaceutyki i środki higieny osobistej, substancje per- i polifluoroalkilowe, pestycydy, biocydy, plastyfikatory, ftalany i in.

Problematyka ta wymaga zwrócenia uwagi co najmniej na trzy kwestie (*i*) klasyczne, biologiczne oczyszczalnie ścieków nie są projektowane do usuwania tych zanieczyszczeń, przez co trafiają one (w zróżnicowanych ilościach) do rzek i jezior, (*ii*) odkładają się one w tkankach organizmów żywych przez co ich stężenie zwiększa się w górę łańcucha troficznego oraz (*iii*) nawet śladowe ilości niektórych substancji mogą imitować lub blokować hormony, powodując feminizację ryb lub problemy z płodnością u ssaków. Stąd, zidentyfikowane i intensywnie badane obszary negatywnego wpływu mikrozanieczyszczeń na zdrowie człowieka dotyczą (*i*) zaburzeń gospodarki hormonalnej, (*ii*) zjawiska globalnej antybiotykooporności oraz (*iii*) narastania toksyczności narządowej i neurotoksyczności przy długotrwałej ekspozycji. Dlatego, obecna strategia (UE) opiera się na przejściu od klasycznej kontroli podstawowych parametrów sanitarnych ścieków do paradygmatu „zero pollution” oraz budowania „water resilience” (odporności zasobów wodnych), w kontekście obserwowanych zmian w środowisku poprzez obligatoryjność wprowadzenia oczyszczania czwartego stopnia, rozszerzenia odpowiedzialności producenta, wprowadzenia strategii zapobiegania zanieczyszczeniom u źródeł (ograniczenia REACH dla mikroplastiku), wprowadzenia zharmonizowanych metodologii analitycznych dla identyfikacji substancji wcześniej niemonitorowanych (suma PFAS, związków zaburzających gospodarkę hormonalną, mikroplastiku).

Doktorant sformułował przedstawione poniżej cele i zadania badawcze.

1. Ocena skuteczności procesów pojedynczych i łączonych w degradacji wybranych zanieczyszczeń wody oraz określenie roli kawitacji w opracowanych procesach.
2. Ocena wpływu parametrów operacyjnych, takich jak stężenie utleniacza/reduktora, pH roztworu, na wydajność degradacji zanieczyszczeń i interpretacja wyników.
3. Zbadanie wpływu typowych jonów nieorganicznych na wydajność degradacji opracowanych procesów.

4. Zweryfikowanie obecności rodników metodą wygaszania poprzez dobór odpowiednich środków wychwytyjących. Wyjaśnienie dominujących rodników odpowiedzialnych za degradację zanieczyszczenia. Identyfikacja produktów przemian za pomocą GC-MS i zaproponowanie mechanizmu reakcji opisującego ścieżkę degradacji;
5. Ocena potencjału HC w ARP w oparciu o badania nad skojarzonym procesem HC/SO₃²⁻/UV i zweryfikowanie redukcyjnej ścieżki degradacji CLA za pomocą obliczeń DFT.

W kontekście przywołanych powyżej uwarunkowań środowiskowych, nie mam żadnych wątpliwości, że przedstawione cele, zakres oraz tematyka rozprawy doktorskiej zostały sformułowane prawidłowo i są w pełni uzasadnione, nie tylko z naukowego punktu widzenia, ale również w kontekście współczesnych wyzwań inżynierii środowiska, jak i globalnych wyzwań społeczno-gospodarczych. Chciałbym jednoznacznie podkreślić, że podjęta przez Doktoranta problematyka badawcza dotycząca degradacji zanieczyszczeń w środowisku wodnym doskonale wpisuje się w aktualne priorytety badawcze oraz dynamicznie ewoluującą politykę legislacyjną Unii Europejskiej. Dodatkowo należy wskazać, że sformułowane cele badawcze charakteryzują się wysoką innowacyjnością, a ich realizacja ma istotny potencjał aplikacyjny. Tematyka pracy charakteryzuje się wysokim stopniem oryginalności i wskazuje na umiejętność kompleksowego podejścia Doktoranta do opracowania koncepcji, metodologii i planowania badań naukowych. W tym kontekście, podjęcie się realizacji tak sformułowanych zadań badawczych i rozwiązania oryginalnych problemów badawczych oceniam jako celowe i w pełni uzasadnione.

Ocena poprawności metodologicznej i kompetencji badawczych

W rozdziale 3, Doktorant przedstawił zastosowaną metodologię badań, przy czym opisał pięć procedur eksperymentalnych, tj.: dla HC-SR-AOPs, AC-SR-AOPs, AC-O₃-AOPs oraz HC-O₃-AOPs. Dodatkowo, w sposób rzetelny i dokładny, przedstawił metody przygotowania próbek oraz metody analityczne zastosowane do oznaczania badanych zanieczyszczeń z zastosowaniem GC-FID, GC-MS, UHPLC, UHPLC-UV-DAD, a także metodologie planowania i analizy eksperymentów z zastosowaniem CCD/RSM oraz możliwość wykorzystania DFT.

Zarówno metodologia badań, jak i same procedury analityczne i obliczeniowe zostały bardzo dokładnie opisane. Zaplanowana metodologia badawcza charakteryzuje się wysokim stopniem zaawansowania i logiczną spójnością. Zastosowane metody, tj.: połączenie kawitacji hydrodynamicznej oraz kawitacji akustycznej z zaawansowanymi metodami utleniania

i redukcji, stanowią optymalne rozwiązanie, które Doktorant zastosował do degradacji badanych zanieczyszczeń. Dobór matryc i modelowych zanieczyszczeń o zróżnicowanej strukturze, umożliwiło przeprowadzenie ciekawych z poznawczego punktu widzenia eksperymentów i sformułowanie wiążących i rzetelnych wniosków naukowych. Szczegółowy opis gwarantuje możliwość powtórzenia eksperymentów.

Doktorant wykorzystał 255 źródeł literaturowych, które są aktualne, a ich dobór nie budzi zastrzeżeń. Doktorant odwołuje się do najnowszych doniesień naukowych, korzysta z publikacji opublikowanych w czasopismach o wysokim współczynniku wpływu. Dobór publikacji jest poprawny, co wpływa na kompletność i wyczerpujących charakter bibliografii. Właściwy dobór literatury dokonany przez Doktoranta daje dobre podstawy teoretyczne do zaplanowanych i przeprowadzonych badań oraz dyskusji wyników w kolejnych rozdziałach rozprawy. Analiza literatury została przeprowadzona w sposób krytyczny, a wyniki własnych badań Doktorant trafnie przedyskutował w kontekście aktualnego stanu wiedzy.

Ocena zawartości rozprawy, walory naukowe i oryginalność

Układ rozprawy doktorskiej jest prawidłowy, logiczny, typowy dla prac badawczych i obejmuje przegląd literatury, cele i zakres pracy, materiał i metody, wyniki i dyskusję, wnioski i perspektywy dalszych badań oraz bibliografię. Rozprawa została napisana starannie, kolejność prezentowanych treści jest prawidłowa, zachowana jest logiczna kolejność i sposób prezentowania treści. Wyniki badań zostały zaprezentowane przez Doktoranta w pięciu podrozdziałach. W rozdziale 4.1. Doktorant przedstawił HC sprzężoną z SR-AOP, aby zbadać możliwość zastosowania HC w aktywacji PS i PMS. Skuteczność opracowanych procesów HC/PS i HC/PMS została oceniona w kontekście degradacji BTEX poprzez monitorowanie stężenia w poddanych obróbce próbkach. Badania obejmowały degradację BTEX przy zastosowaniu HC, HC/PS i HC/PMS przy różnych stosunkach molowych reagentów. Po wybraniu optymalnego stosunku, HC/PS i HC/PMS zostały zbadane w kontekście degradacji BTEX w obecności anionów nieorganicznych i substancji chemicznych stosowanych do selektywnego wygaszania wybranych indywiduów rodnikowych. Następnie roztwory modelowe zawierające BTEX zostały indywidualnie poddane obróbce z zastosowaniem HC/PS i HC/PMS, a próbki zostały przeanalizowane metodą HPLC-UV-DAD w celu identyfikacji produktów pośrednich, na podstawie których zaproponowano ścieżkę degradacji. W rozdziale 4.2, Doktorant zaprezentował wyniki demonstrujące potencjał AC w aktywacji PS i PMS. W tym celu przeprowadził degradację BTEX w warunkach AC indukowanego US w obecności

PS i PMS przy różnych prędkościach obrotowych. Następnie sprawdzona została wydajność degradacji BTEX przy zastosowaniu US/PS i US/PMS i po dodaniu asfaltenów. Badania nad US/PS/ASPH i US/PMS/ASPH obejmowały eksperymenty z wygaszaniem rodnikowym oraz test możliwości ponownego wykorzystania asfaltenów. W rozdziale 4.3, prąd przemienny indukowano w sonoreaktorach generujących niskoczęstotliwościowe podwójne US działające z częstotliwością 40 kHz i 120 kHz (LFDUS) oraz wysokoczęstotliwościowe podwójne US (HFDUS) z częstotliwością 80 kHz, 200 kHz. Degradację BTEX przeprowadzono w różnych procesach jedno- i dwuczęstotliwościowych US, a także w procesach hybrydowych wspomaganym O_3 , w celu określenia efektu synergistycznego w LFDUS/ O_3 i HFDUS/ O_3 . W badaniach określono wpływ pH, substancji chemicznych stosowanych do selektywnego wygaszania wybranych indywidualów rodnikowych i anionów nieorganicznych na wydajność degradacji BTEX w LFDUS/ O_3 i HFDUS/ O_3 . Zaproponowano ścieżkę degradacji BTEX. Z kolei proces hybrydowy HC i ozonowania przedstawiono w rozdziale 4.4. W tym przypadku, proces stanowił zmodyfikowaną wersję peroxone (H_2O_2/O_3) połączonego z HC i wykorzystującego stabilną i bezpieczną alternatywę dla H_2O_2 , tj.: nadwęglan sodu (SPC). W tym badaniu oceniono skuteczność opracowanego procesu HC/SPC/ O_3 w zakresie degradacji 1,4-dioksanu. Efekt synergistyczny zbadano, przeprowadzając degradację 1,4-dioksanu w procesach pojedynczych i hybrydowych. Następnie oceniono wydajność degradacji HC/SPC/ O_3 w obecności pochłaniaczy i typowych składników wody i zaproponowano ścieżkę degradacji 1,4-dioksanu. Z kolei w rozdziale 4.5 przedstawiono wyniki uzyskane podczas próby opracowania hybrydowego procesu opartego na kawitacji i ARP. W niniejszym badaniu HC sprzężona z SO_3^{2-}/UV i przetestowano pod kątem degradacji CLA. Efekt synergistyczny zbadano poprzez eksperymenty degradacji CLA w procesach pojedynczych i hybrydowych, a także zbadano wpływ składników wody. Ponadto przeprowadzono eksperymenty wygaszania z wykorzystaniem specyficznych substancji chemicznych stosowanych do selektywnego wygaszania wybranych indywidualów rodnikowych związków redukujących. Redukcyjna ścieżka degradacji CLA została określona na podstawie związków pośrednich zidentyfikowanych za pomocą analizy GC-MS i poparta teoretycznymi obliczeniami DFT.

Po zapoznaniu się z wynikami badań przedstawionymi przez Doktoranta w rozdziałach 4.1-4.5 nie mam żadnych wątpliwości, że tematyka rozprawy doktorskiej mieści się bez wątplenia w dziedzinie *nauk ścisłych i przyrodniczych*, w dyscyplinie *nauki chemiczne*. Niemniej jednak, dotyczy ona (oprócz oczywistych i dominujących aspektów chemicznych)

Dr hab. inż. Maciej Thomas, Prof. PK

ORCID ID: 0000-0001-7348-1253

Scopus ID: 57195371256

Web of Science Researcher ID: AFJ-0799-2022

Google Scholar: ADN-8742-2022

Dyscyplina: inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka (ISGE), 100% N

Katedra Technologii Środowiskowych, Wydział Inżynierii Środowiska i Energetyki, Politechnika Krakowska im. Tadeusza Kościuszki, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

Tel.: +48 12 628 28 73 (402C, W-2), +48 12 628 21 23 (H120, W-15), maciej.thomas@pk.edu.pl, www.srodowisko.pk.edu.pl

tematyki badawczej realizowanej w dziedzinie *nauk inżynieryjno-technicznych*, w dyscyplinie *inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka*, związanych z tematyką oczyszczania wody i ścieków. W związku z tym, chciałbym podkreślić pewien interdyscyplinarny charakter rozprawy doktorskiej.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska jest oryginalnym, wartościowym dziełem, a otrzymane przez Doktoranta oryginalne wyniki badań przedstawione zostały w kontekście aktualnego stanu wiedzy, w sposób istotny poszerzają dotychczasową wiedzę w zakresie możliwości projektowania i zastosowania nowych, bazujących na kawitacji zaawansowanych procesów chemicznych do degradacji zanieczyszczeń obecnych w wodzie i ściekach. Podkreślenia wymaga również fakt, że Doktorant zaprojektował, zbudował i wykorzystał (prawdopodobnie przy istotnej pomocy Promotora rozprawy doktorskiej) w przeprowadzonych eksperymentach układy technologiczne w skali laboratoryjnej. Oceniana rozprawa doktorska bez wątpienia prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dziedzinie *nauk ścisłych i przyrodniczych*, w dyscyplinie *nauki chemiczne* oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Niego pracy naukowej.

Recenzowana rozprawa doktorska, istotnie stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a do najważniejszych osiągnięć naukowych Doktoranta zaliczam (*i*) opracowanie nowych bazujących na procesach kawitacji zaawansowanych procesów chemicznych i ich zastosowanie do rozkładu wybranych zanieczyszczeń, (*ii*) określenie efektywności tych procesów, kinetyki rozkładu wybranych zanieczyszczeń oraz dominujących rodzajów rodników biorących udział w tych procesach i (*iii*) określenie możliwych ścieżek degradacji badanych zanieczyszczeń.

Uwagi i pytania do dyskusji

Podczas lektury rozprawy doktorskiej zauważyłem drobne błędy, literówki i nieścisłości które nie wpływają na wartość merytoryczną rozprawy. Niektóre z nich, głównie o charakterze dyskusyjnym oraz pytania na które będę oczekiwał odpowiedzi podczas publicznej obrony przedstawiam poniżej.

1. Zamiast anion „siarczynowy”, powinno być anion „siarczanowy(IV)”.
2. W zestawieniu skrótów i akronimów nie ujęto wszystkich zastosowanych w rozprawie.
3. Przegląd metod oczyszczania ścieków z zastosowaniem koagulacji został napisany w mojej ocenie bardzo skrótowo. Doktorant ograniczył się tylko do wzmianki o koagulantach glinowych i żelazowych, a pominął zupełnie innowacyjne koagulanty,

ostatnio intensywnie badane i nawet zastosowane w praktyce (Zr, Ti, Ce, La). Doktorant pominął na przykład dane literaturowe odnośnie usuwania CLA z zastosowaniem koagulacji, co ma związek z rozprawą doktorską.

4. Doktorant twierdzi, zapewne na podstawie [78,79], że reagenty alkaliczne, takie jak wodorotlenki metali, węglany i amoniak są dodawane, aby zneutralizować ścieki o odczynie kwasowym. Nie mogę zgodzić się z zastosowaniem amoniaku do tego celu, ponieważ powodowałyby to istotne zwiększenie stężenia azotu amonowego w ściekach, który jest limitowany. Na ogół w ściekach przemysłowych stwierdza się podwyższone stężenia azotu ogólnego, w przypadku ścieków o niskiej wartości pH zastosowanie amoniaku doprowadziłoby do istotnego zwiększenia wartości tego parametru. Doktorant powinien zweryfikować źródło przed zacytowaniem w rozprawie.
5. Doktorant stosuje terminologię zwyczajową związków chemicznych, np.: „lime”, „soda ash” etc. Proponuję zastosowanie terminologii zgodnej z wymaganiami IUPAC i ewentualnie w nawiasach podawanie nazw zwyczajowych (czasem stosowanych w przemyśle).
6. W tekście jest $\text{Na}(\text{HCO}_3)_2$, a powinno być NaHCO_3 .
7. W rozdziale o chemicznym strącaniu, Doktorant podaje przykłady związków (Na_2BDP oraz BDETH_2), które mogą być stosowane do strącania metali ciężkich ze ścieków przemysłowych, ale nie są stosowane w praktyce. Doktorant mógł uwzględnić te związki chemiczne, które są stosowane, np.: dimetyloditiokarbaminian sodu, dietyloditiokarbaminian sodu oraz tritiowęglan sodu, co nadałoby bardziej aktualny charakter tej części przeglądu literaturowego. Jest dostępnych wiele publikacji naukowych oraz technicznych na temat ich właściwości i zastosowania.
8. Doktorant stosuje zapisy typu „ $\text{mgO}_3/\text{mgDOC}$ ”, a powinno być „ $\text{mg O}_3/\text{mg DOC}$ ”.
9. Doktorant nie sformułował w rozprawie tez/hipotez badawczych. Nie jest to obligatoryjne, ale w mojej ocenie to kluczowe elementy rozprawy naukowej.
10. Dlaczego Doktorant zastosował roztwór modelowy BTEX o stężeniu 50 ppm (w przypadku procedury 1) oraz 40 ppm (w przypadku procedury 2)? Z czego wynikały takie wartości stężeń i na jakiej podstawie zostały ustalone? Czy wartości tych stężeń mają jakiś związek z wartościami występującymi w ściekach przemysłowych?

11. Dlaczego w procedurze 2 do roztworu modelowego dodawano 0,5 g/l asfaltenów? W jaki sposób ustaloną taką dawkę? Czy przyjęta dawka asfaltenów wynikała z wcześniejszej optymalizacji? Jeśli tak, to w jaki sposób ją przeprowadzono?
12. W jaki sposób Doktorant ustalił przyjęte wartości (Tab. 1) parametrów wejściowych, tj.: stosunek molowy reduktora (siarczan(IV)) do zanieczyszczenia, pH oraz czas reakcji? Czy wartości te były wcześniej wstępnie optymalizowane? Czy wykonano eksperymenty wstępne? Jeśli tak, to w jaki sposób?
13. Efektywność procesu degradacji BTEX (w roztworach modelowych) z zastosowaniem układów HC/PS oraz HC/PMS obniżała się wskutek obecności w badanych roztworach węglanów, siarczanów(VI) i chlorków, przy czym efektywność ta była najmniejsza w przypadku węglanów (w roztworach modelowych). Chlorki i siarczany(VI) występują w ściekach przemysłowych w znacznych stężeniach, niejednokrotnie przekraczających ustanowione wymagania prawne. Węglany mogą być obecne w ściekach lekko alkalicznych. W jaki sposób można sprawdzić rzeczywisty wpływ wymienionych jonów na efektywność usuwania BTEX? Jakie eksperymenty należałoby w tym przypadku wykonać? Czy można wyeliminować wpływ tych jonów na efektywność procesu i w jaki sposób to zrobić?
14. Podobne (jak wyżej) zależności Doktorant zaobserwował podczas badania procesów LFDUS/O₃ i HFDUS/O₃. W przypadku tych procesów, największy efekt inhibicyjny zaobserwowano kolejno w przypadku jonów siarczanowych(VI), chlorków i węglanów. W jaki sposób (uwzględniając uwarunkowania podane powyżej) można sprawdzić rzeczywisty wpływ wymienionych jonów na efektywność usuwania BTEX? Jakie eksperymenty należałoby w tym przypadku wykonać? Czy można wyeliminować wpływ tych jonów na efektywność procesu i w jaki sposób to zrobić?
15. W Tab. 5, Doktorant podał szacunkowe koszty AOPs bazujących na kawitacji i zastosowanych do degradacji BTEX oraz źródła tych kosztów. Czy możliwe jest zmniejszenie kosztów chemicznych utleniaczy (PS, PMS), a jeśli tak to w jaki sposób? Czy możliwe jest zmniejszenie kosztów energii niezbędnej w tych procesach, a jeśli tak, to jakie rozwiązania mogłyby tutaj mieć zastosowanie? Innymi słowy, czy jest możliwe zmniejszenie kosztów operacyjnych wynikających ze zużycia energii i reagentów?
16. Czy Doktorant widzi możliwość zastosowania opracowanych metod/procesów w większej skali? Jeśli tak, to jakie warunki musiałyby być spełnione nie tylko

w odniesieniu do aparatury/urządzeń, ale również do składu ścieków surowych/oczyszczonych? Czy ewentualna pozostałość nadmiaru utleniaczy w ściekach musiałaby być usuwana przed skierowaniem ścieków do biologicznego oczyszczania? W jaki sposób można byłoby to zrealizować?

Wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska napisana przez Pana mgr. inż. Kirilla Fedorova, pt.: *Degradacja organicznych zanieczyszczeń wody z zastosowaniem hybrydowych zaawansowanych procesów chemicznych wykorzystujących zjawisko kawitacji*”, napisana pod kierunkiem Pana dr. hab. inż. Grzegorza Boczkaja, Prof. PG, stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i wnosi nowatorskie spostrzeżenia na temat synergii między zjawiskami kawitacji a procesami utleniania i redukcji zanieczyszczeń, wprowadzając tym samym wartościową, nową wiedzę i przyczyniając się do rozwoju dyscypliny *nauki chemiczne*. Rozprawa charakteryzuje się wysokim poziomem naukowym i bez wątpienia prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną Doktoranta w dziedzinie *nauk ścisłych i przyrodniczych*, w dyscyplinie *nauki chemiczne* oraz umiejętność samodzielnego prowadzenia przez Niego pracy naukowej.

Resumując, stwierdzam że przedłożona rozprawa doktorska w pełni spełnia kryteria zwyczajowe i prawne określone w art. 187 Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2018 r. poz. 1668 z późn. zm.). W związku z powyższym, z pełnym przekonaniem przedstawiam Radzie Naukowej Dyscypliny Nauki Chemiczne Politechniki Gdańskiej wniosek o dopuszczenie Pana mgr. inż. Kirilla Fedorova do dalszych etapów postępowania doktorskiego, w tym do publicznej obrony.