



UNIwersytet
WARMIŃSKO-MAZURSKI W OLSZTYNIE

WYDZIAŁ GEOINŻYNIERII

INSTYTUT INŻYNIERII I OCHRONY ŚRODOWISKA
KATEDRA INŻYNIERII ŚRODOWISKA

prof. dr hab. inż. Joanna Rodziewicz
Katedra Inżynierii Środowiska
Wydział Geoinżynierii
Uniwersytet Warmińsko-Mazurski
w Olsztynie

Olsztyn, dnia 02.03.2026 r.

Recenzja
rozprawy doktorskiej mgr inż. Humam Ahmed
pt.: „Degradation of selected drug used in COVID-19 therapy in the aquatic
environment by means of solar light driven processes”

1. Podstawy formalne sporządzenia recenzji

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Humam Ahmed przygotowana została na zlecenie Przewodniczącego Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej, Pana prof. dr hab. Krzysztofa Labusa (pismo RIE-BD.512.3.2026), na podstawie przedłożonego maszynopisu pracy – mgr inż. Humam Ahmed, „Degradation of selected drug used in COVID-19 therapy in the aquatic environment by means of solar light driven processes”.

2. Ocena trafności wyboru tematyki pracy

Przemysł farmaceutyczny jest jedną z najbardziej dochodowych i dynamicznie rozwijających się gałęzi przemysłu na świecie. W skali globalnej obserwuje się znaczny wzrost spożycia leków przeciwwirusowych spowodowany starzeniem się społeczeństwa, wzrostem zachorowań na choroby przewlekłe (HIV, HCV) oraz nowymi zagrożeniami, takimi jak COVID-19 i grypa sezonowa. Wzrost spożycia farmaceutyków prowadzi do ich zwiększonego przedostawania się do środowiska. Usuwanie leków przeciwwirusowych ze środowiska wodnego stanowi wyzwanie, ponieważ konwencjonalne stacje uzdatniania wody czy



oczyszczalnie ścieków często nie są w stanie całkowicie ich usunąć. Poza tym pojawiające się epidemie, takie jak COVID-19, przyczyniają się do wprowadzania nowych leków przeciwwirusowych a także zwiększenia ich spożycia. Wymusza to prowadzenie badań nad ich stężeniem w środowisku, trwałością i możliwościami skutecznego usuwania oraz wpływem na środowisko i zdrowie człowieka.

W tym kontekście tematyka rozprawy doktorskiej mgr inż. Humam Ahmed wpisuje się w nurt badań dotyczących usuwania farmaceutyków ze środowiska wodnego. W mojej ocenie problematyka pracy jest aktualna i bardzo istotna z punktu widzenia ochrony środowiska naturalnego.

3. Ocena struktury pracy

Recenzowana praca doktorska liczy 132 strony i zawiera 18 tabel, 25 rysunków oraz 34 załączniki w postaci zrzutu ekranu wyświetlacza chromatografu. Bibliografia obejmuje 114 pozycji literaturowych. Dysertację rozpoczyna spis treści, wykaz ważniejszych skrótów, streszczenie w języku angielskim i polskim.

Praca składa się z dwunastu rozdziałów – pierwszy rozdział to przegląd literatury dotyczący tematu pracy, kolejny rozdział to hipoteza badawcza, cel i zakres pracy. Następne rozdziały pracy obejmują metodykę badań, omówienie uzyskanych wyników i dyskusję, podsumowanie i wnioski oraz kierunki dalszych badań. Kolejne rozdziały to bibliografia, informacje uzupełniające, spis rysunków oraz spis tabel. Pracę zamyka spis publikacji Doktorantki i spis Jej pozostałych osiągnięć. Moim zdaniem przyjęta struktura pracy jest czytelna oraz kompletna.

Rozdział 1 składa się z dziewięciu podrozdziałów, w których Doktorantka omawia zaawansowane procesy utleniania, charakteryzuje leki przeciwwirusowe zanieczyszczające środowisko wodne oraz opisuje leki będące przedmiotem badań dysertacji.

Rozdział 2 składa się z pięciu podrozdziałów. W pierwszym Doktorantka przedstawiła hipotezę badawczą:

Efektywność degradacji związków farmaceutycznych związanych z COVID-19 w środowisku wodnym można znacznie zwiększyć dzięki fotokatalizie wspomaganą światłem słonecznym, przy czym na wydajność w dużym stopniu wpływają rodzaj fotokatalizatora, skład matrycy wodnej i parametry procesowe.



W kolejnym podrozdziale przedstawiła trzy problemy naukowe, które powinny być rozwiązane. W podrozdziale trzecim omówiła główny cel pracy, którym jest zbadanie procesu fotodegradacji wybranych leków przeciwwirusowych stosowanych w leczeniu COVID-19 w środowisku wodnym w warunkach ekspozycji na światło słoneczne i sztuczne, przy braku i w obecności fotokatalizatorów wspomagających proces degradacji. W następnym przedstawiła dziewięć szczegółowych celów badawczych. Piąty podrozdział to omówienie zakresu rozprawy doktorskiej.

Rozdział 3 – *Materiały i metodologia* – składa się z trzech podrozdziałów. W pierwszym podrozdziale Kandydatka wymieniła trzy badane leki przeciwwirusowe: izoprynozynę, rytonawir i remdesiwir oraz zastosowane fotokatalizatory komercyjne (TiO_2 P25, ZnO , SnO_2 , ZrO_2 i BaWO_4) i syntetyzowane w laboratorium (AgTiO_2 i BaTiO_3), a także związki jonowe NaCl , Na_2SO_4 , CaCO_3 oraz NaNO_3 wykorzystane jako źródła anionów. W kolejnym podrozdziale Autorka omówiła zastosowane matryce wodne: wodę super czystą, tzw. Milli-Q, wodę wodociągową i wodę powierzchniową pobieraną z rzeki Ostropki. Pierwsza pełniła funkcję matrycy referencyjnej, wolnej od zanieczyszczeń, natomiast dwie pozostałe odzwierciedlały rzeczywiste warunki środowiskowe. Podrozdział 3 składa się z 11 podrozdziałów, w których w sposób szczegółowy przedstawiono metodykę badań eksperymentalnych. Doktorantka omówiła w nich sposób przygotowania roztworów wzorcowych badanych leków, metodę wyznaczenia długości fali maksymalnej absorpcji dla przyjętych leków i sposób przygotowania krzywych kalibracyjnych. Poza tym opisała zastosowany w badaniach reaktor światła słonecznego oraz przebieg badań fotolitycznych, fotokatalitycznych oraz wspomaganych H_2O_2 . Ostatni podrozdział jest opisem przeprowadzonych badań kinetycznych.

Obszerną część pracy stanowi rozdział 4 – *Wyniki i dyskusja*. W pierwszym podrozdziale Doktorantka omówiła profilowanie jonowe zastosowanych w badaniach matryc wodnych. W kolejnym podrozdziale przedstawiła wyniki badań dotyczących fotolizy z wykorzystaniem światła słonecznego. W celu określenia efektywności degradacji wybranych leków przeciwwirusowych (izoprynozyny, rytonawiru i remdesiwiru) badania prowadziła w trzech matrycach wodnych (w wodzie super czystej, wodzie wodociągowej i wodzie powierzchniowej) przy natężeniu promieniowania 500 W/m^2 . W podrozdziale trzecim Doktorantka omówiła wyniki badań nad fotokatalitycznym usuwaniem wybranych leków



przeciwwirusowych. Badania rozpoczęła od określenia efektywności fotokatalitycznej degradacji izoprynozyiny w wodzie super czystej z wykorzystaniem siedmiu komercyjnych fotokatalizatorów i dwóch syntetyzowanych w ramach odrębnych projektów badawczych. Fotokatalizatory stosowała w dawkach 5,0 mg/L (tylko TiO_2 P25 i ZnO), 10,0 mg/L oraz 20,0 mg/L przy natężeniu promieniowania 500 W/m². Do określenia skuteczności degradacji w rzeczywistych matrycach środowiskowych (woda wodociągowa i woda powierzchniowa), wybrała najbardziej efektywne fotokatalizatory. Efektywność fotodegradacji izoprynozyiny w wodzie wodociągowej była określana z wykorzystaniem trzech fotokatalizatorów (TiO_2 P25, ZnO oraz SnO_2), wytypowanych w badaniach wstępnych, w dawkach 10,0 i 20,0 mg/L przy natężeniu promieniowania 500 W/m². W przypadku wody powierzchniowej zastosowała dwa fotokatalizatory TiO_2 P25 i ZnO w dawce 20,0 mg/L. Do określenia skuteczności fotokatalitycznego usuwania rytonawiru w trzech matrycach wodnych wykorzystała trzy fotokatalizatory: TiO_2 P25, ZnO oraz SnO_2 :ZnO (2:1) przy stałej dawce 10 mg/L, natężeniu promieniowania 500 W/m². Efektywność fotodegradacji remdesiwiru Doktorantka badała z zastosowaniem dwóch fotokatalizatorów (TiO_2 P25 i ZnO) przy dawce 20,0 mg/L. W celu sprawdzenia czy obniżenie stężenia badanych zanieczyszczeń farmaceutycznych w środowisku wodnym wynika z rzeczywistej degradacji, czy jedynie z adsorpcji zostały przeprowadzone eksperymenty w warunkach ciemności. W przypadku izoprynozyiny wykonano testy w ciemności z zastosowaniem siedmiu różnych fotokatalizatorów (TiO_2 P25, ZnO, ZrO_2 , BaWO_4 , Ag- TiO_2 , BaTiO_3 , SnO_2), przy stężeniu 10,0 mg/L w wodzie super czystej. Testy ciemności dla rytonawiru przeprowadzono z trzema fotokatalizatorami (TiO_2 P25, ZnO oraz SnO_2 :ZnO (2:1)), a remdesiwiru z dwoma (TiO_2 P25 i ZnO). W kolejnym podrozdziale Kandydatka opisała wyniki badań nad podatnością badanych leków na degradację w procesie fotolizy wspomaganiej H_2O_2 . Zastosowała trzy objętości H_2O_2 : 125 μL (108,8 mg/L), 250 μL (217,5 mg/L) oraz 500 μL (435 mg/L) w obecności światła słonecznego (500 W/m²) w wodzie super czystej. Poza tym przeprowadziła test w ciemności w celu potwierdzenia skuteczności H_2O_2 (500 μL) w usuwaniu wybranych farmaceutyków. W kolejnych rozdziałach Autorka badała wpływ wybranych anionów (SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- , CO_3^{2-}) na fotodegradację badanych leków przeciwwirusowych w wodzie super czystej i wodzie wodociągowej. W ostatnim podrozdziale Doktorantka badała skuteczność indukowanej światłem słonecznym mineralizacji związków organicznych badanych leków przeciwwirusowych w trzech matrycach wodnych.



Merytoryczną część rozprawy zamyka rozdział 5 *Podsumowanie i wnioski*. W rozdziale 6 zostały przedstawione kierunki dalszych badań, które według Kandydatki powinny dotyczyć między innymi identyfikacji i charakterystyki produktów pośrednich powstających w procesach fotolitycznych i fotokatalitycznych oraz możliwości ponownego wykorzystania i recyklingu stosowanych fotokatalizatorów.

Kolejne rozdziały to *Literatura* obejmująca 114 pozycji literaturowych, z czego 96 zostało opublikowanych w ostatnich dziesięciu latach, przedstawionych w porządku alfabetycznym oraz rozdział *Informacje uzupełniające*. Pracę kończą *Spis rysunków*, *Spis tabel*, *Spis publikacji* oraz *Spis innych aktywności naukowych*.

4. Ocena merytoryczna

Przedmiotem badań, będących podstawą przygotowania rozprawy doktorskiej mgr inż. Humam Ahmed, była ocena możliwości degradacji wybranych leków przeciwwirusowych (izoprynozyna, rytonawir, remdesiwir), stosowanych w terapii COVID-19, w procesie fotolizy, fotokatalizy i fotolizy wspomaganej H_2O_2 . W pracy analizowano wpływ parametrów środowiskowych i procesowych, takich jak: skład wody, natężenie światła, dawka katalizatora, stężenie zanieczyszczeń i czas reakcji.

Wysoko oceniam wybór przedmiotu badań, kompleksowe podejście do problemu określenia efektywności degradacji wybranych leków przeciwwirusowych. Należy podkreślić, że tytuł pracy, jej cele oraz tezy zostały poprawnie sformułowane, a wyszczególnione przez Autorkę na stronie 29 i 30 problemy badawcze umożliwiły realizację wskazanych przez Doktorantkę celów.

Przegląd literatury stanowi logiczne wprowadzenie do zagadnień będących przedmiotem pracy.

W rozdziale *Materiały i metodologia* w sposób szczegółowy omówiono wybrane do badań leki przeciwwirusowe, fotokatalizatory, matryce wodne, metodykę badań eksperymentalnych, aparaturę badawczą i zastosowane w badaniach kinetycznych modele. Dobór metod badawczych oceniam jako właściwy i wystarczający do realizacji celu pracy.

Doktorantka uzyskała 9% efektywność degradacji izoprynozyny w wodzie super czystej po 60 minutach naświetlania ($500 W/m^2$). Po 120 minutach efektywność wyniosła odpowiednio 14% w wodzie wodociągowej i 8% w wodzie powierzchniowej. W przypadku rytonawiru



degradacja po 90 minutach naświetlania w wodzie super czystej wynosiła jedynie 15%, a po 120 minutach Autorka osiągnęła 38% efektywność degradacji w wodzie wodociągowej i 51% w wodzie powierzchniowej. Skuteczność degradacji remdesiwiru po 120 minutach naświetlania wynosiła 15% w wodzie super czystej, 27% w wodociągowej oraz 23% w powierzchniowej. Doktorantka wykazała, że fotoliza słoneczna prowadzi jedynie do ograniczonej degradacji badanych leków, co potwierdza ich wysoką fotostabilność oraz niewystarczającą skuteczność fotolizy jako samodzielnej metody oczyszczania.

Zastosowanie fotokatalizatorów prowadziło do zwiększenia skuteczności degradacji leków przeciwwirusowych. Zastosowanie w procesie fotokatalizy izoprynozyiny w wodzie super czystej 5,0 mg/L dawki TiO_2 P25 i ZnO prowadziło do uzyskania skuteczności degradacji równej odpowiednio 100% po 30 minutach i 88% po 120 minutach. Zwiększenie dawki do 10,0 mg/L wpłynęło na wzrost efektywności degradacji izoprynozyiny do 98 % dla ZnO przy 120 minutowym naświetlaniu. Najwyższą skuteczność degradacji izoprynozyiny w wodzie wodociągowej uzyskano dla dawki 20,0 mg/L trzech badanych fotokatalizatorów i wynosiła ona dla ZnO, TiO_2 P25 i SnO_2 odpowiednio 93, 88 i 38 %. W przypadku wody powierzchniowej Doktorantka zastosowała dawkę 20,0 mg/L dla TiO_2 P25 i ZnO i uzyskała efektywność degradacji izoprynozyiny na poziomie odpowiednio 23% i 22%. W przypadku degradacji rytonawiru Doktorantka zastosowała dawkę fotokatalizatora równą 10,0 mg/L i stwierdziła, że rytonawir był całkowicie adsorbowany (100%) na powierzchni ZnO oraz SnO_2 :ZnO (2:1) w ciągu 30 sekund reakcji we wszystkich badanych matrycach a TiO_2 P25 wykazał 72% adsorpcję po 120 minutach naświetlania. Fotokatalityczne usuwanie remdesiwiru Autorka badała z wykorzystaniem 20,0 mg/L dawki TiO_2 P25 oraz ZnO. W wodzie super czystej osiągnęła 98,92% efektywność adsorpcji dla TiO_2 P25 i 81% dla ZnO po 120 minutach naświetlania. Najniższą skuteczność adsorpcji obserwowała w wodzie powierzchniowej odpowiednio 5 i 1 % dla TiO_2 P25 i ZnO. Badania procesu fotokatalitycznej degradacji wybranych leków przeciwwirusowych w terapii COVID-19 wykazały, że TiO_2 P25 i SnO_2 :ZnO charakteryzowały się najwyższą aktywnością fotokatalityczną w świetle słonecznym. TiO_2 P25 wykazywał większą stabilność w złożonych matrycach wodnych, natomiast ZnO zapewniał silniejsze, choć mniej odwracalne wiązanie w warunkach kontrolowanych.

Zastosowanie fotolizy wspomaganą H_2O_2 wpływa na efektywność degradacji leków przeciwwirusowych. Doktorantka stwierdziła, że izoprynozyina ulega 100% degradacji po 30



minutach reakcji dla dawki H_2O_2 równej $125 \mu\text{L}$ i $250 \mu\text{L}$. Natomiast przy dawce $500 \mu\text{L}$ H_2O_2 pełną degradację osiągnęła po 120 minutach naświetlania. W przypadku rytonawiru 100% degradację uzyskiwała w ciągu 45 minut dla wszystkich badanych stężeń H_2O_2 . Natomiast efektywność degradacji remdesiwiru po 120 minutach wynosiła odpowiednio 55%, 53 % i 83 % dla dawki H_2O_2 równej $125 \mu\text{L}$, $250 \mu\text{L}$ i $500 \mu\text{L}$.

Poza tym Doktorantka badała wpływ jonów nieorganicznych (SO_4^- , Cl^- , NO_3^- , CO_3^-) obecnych w wodach naturalnych na degradację izoprynozyny i rytonawiru. Wykazała, że jony te wpływały na efektywność procesu poprzez wychwytywanie reaktywnych form tlenu lub modyfikację ładunku powierzchniowego katalizatora.

Dyskusja zaprezentowana przez Doktorantkę jest poprawna i poparta argumentami bazującymi na wynikach prezentowanych w literaturze przedmiotu. Rozdział *Podsumowanie i wnioski* zawiera wykaz najistotniejszych osiągnięć pracy.

Równoległe z pozytywną oceną pracy nasuwają się następujące pytania:

1. Na jakiej podstawie przyjęto w badaniach wartość natężenia promieniowania słonecznego równą 500 W/m^2 ?
2. Jakie były kryteria wyboru zastosowanych fotokatalizatorów, jakie ich właściwości fizykochemiczne zdecydowały o wyborze?
3. Jakie warunki należy spełnić by móc zastosować fotodegradację badanych leków przeciwwirusowych w procesie oczyszczania ścieków?
4. Jaka jest według Autorki potencjalna toksyczność produktów pośrednich powstających podczas fotodegradacji izoprynozyny, rytonawiru i remdesiwiru oraz jakie one mogą mieć wpływ na organizmy wodne?
5. Dlaczego w badaniach kinetycznych zastosowano różne modele (pseudopierwszego rzędu, Langmuira–Hinshelwooda, model dwufazowy adsorpcja–desorpcja) i jakie mogą być tego skutki przy projektowaniu procesów usuwania farmaceutyków w skali technicznej?

Podsumowując ocenę merytoryczną pracy potwierdzam moją pozytywną opinię rozprawy doktorskiej mgr inż. Human Ahmed. Dysertacja zawiera obszerny materiał eksperymentalny, uporządkowany i zaprezentowany w sposób zrozumiały. Należy podkreślić



duży nakład pracy i czasu związany z przeprowadzeniem badań, a przede wszystkim ich aplikacyjny charakter.

5. Uwagi szczególne

Praca jest dość starannie przygotowana pod względem redakcyjnym, jednak Autorka nie ustrzegła się pewnych błędów.

W spisie literatury jest kilka pozycji literaturowych, które są powtórzone dwu a nawet trzykrotnie. Dotyczy to następujących artykułów: Ahmed, H., Felis, E. (2023) Drugs used in COVID-19 therapy and their effects on the environment. *Desalination and Water Treatment*, 301, 52–62; Ahmed, H., Siddiqui, B., Felis, E. (2025) Adsorption and photodegradation as processes enabling the removal of antiviral drug ritonavir from the aquatic environment. *Journal of Ecological Engineering*, 26(5), 195–202; Domingo-Echaburu, S., Irazola, M., Prieto, A., Rocano, B., Lopez de Torre-Querejazu, A., Quintana, A., Orive, G., Lertxundi, U. (2022) Drugs used during the COVID-19 first wave in Vitoria-Gasteiz (Spain) and their presence in the environment. *Science of The Total Environment*, 820, 153122; Gwenzi, W., Selvasembian, R., Offiong, N. A. O., El Din, A. (2022) COVID-19 drugs in aquatic systems: a review. *Environmental Chemistry Letters*, 20(2), 1275–1294; Kang, Y. M., Kim, T. K., Kim, M. K., Zoh, K. D. (2020) Greenhouse gas emissions from advanced oxidation processes in the degradation of bisphenol A: a comparative study of the H₂O₂/UV, TiO₂ /UV, and ozonation processes. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(11), 12227–12236; Mansouri, F., Chouchene, K., Roche, N., Ksibi, M. (2021) Removal of pharmaceuticals from water by adsorption and advanced oxidation processes: State of the art and trends. *Applied Sciences*, 11(14); Miklos, D. B., Remy, C., Jekel, M., Linden, K. G., Drewes, J. E., Hübner, U. (2018) Evaluation of advanced oxidation processes for water and wastewater treatment – A critical review. *Water Research*, 139, 118–131; Nugnes, R., Orlo, E., Russo, C., Lavorgna, M., Isidori, M. (2024) Comprehensive eco-geno-toxicity and environmental risk of common antiviral drugs in aquatic environments post-pandemic. *Journal of Hazardous Materials*, 480, 135947; Zhou, C., Chen, J., Xie, Q., Wei, X., Zhang, Y. nan, Fu, Z. (2015) Photolysis of three antiviral drugs acyclovir, zidovudine and lamivudine in surface freshwater and seawater. *Chemosphere*, 138, 792–797.

Jednej pozycji literaturowej (Araújo et al., 2018 – str. 60) brakuje w spisie literatury.



Moim zdaniem struktura pracy naukowej powinna być podzielona na co najwyżej trzy poziomy (rozdział, podrozdział, punkt), które wykazuje się w spisie treści. Za zbyt liczne uważam na przykład wydzielenie podpunktów w punkcie 3.3.5. i 3.3.6. Poza tym w rozdziale czwartym niepotrzebnie Doktorantka wprowadziła podrozdział 4.1., którego tytuł jest powtórzeniem tytułu rozdziału, co spowodowało dodatkowo, że w tym rozdziale jest tylko jeden podrozdział, co jest niezgodne z zasadami pisania prac naukowych.

6. Podsumowanie i wniosek końcowy

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi wartościowe opracowanie naukowe, a wyniki badań w sposób znaczący poszerzają stan wiedzy dotyczący możliwości usuwania leków przeciwwirusowych stosowanych w terapii COVID-19 w procesie fotokatalitycznej degradacji.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Humam Ahmed pt.: „Degradation of selected drug used in COVID-19 therapy in the aquatic environment by means of solar light driven processes” 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.). Rozprawa stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego, a Doktorantka wykazała się wiedzą teoretyczną w zakresie dyscypliny inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka oraz umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej.

Wnioskuje zatem do Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka Politechniki Śląskiej *o dopuszczenie mgr inż. Humam Ahmed do dalszych etapów postępowania kwalifikacyjnego o nadanie stopnia naukowego doktora nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria środowiska, górnictwo i energetyka.*

prof. dr hab. inż. Joanna Rodziewicz