

[każda strona ze stopką zawierającą dane kontaktowe Politechniki Łódzkiej, logo Łódzkiego Partnerstwa Akademickiego, Europejskiego Konsorcjum Innowacyjnych Uniwersytetów, HR Excellence in Research]

[logo] Politechnika Łódzka

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

Łódź, 2.03.2026 r.

dr inż. Katarzyna Paździor

Katedra Inżynierii Bioprocessowej

Wydział Inżynierii Procesowej i Ochrony Środowiska

Politechnika Łódzka

ul. Wołczańska 213, 93-005 Łódź

Recenzja

rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Humam Ahmed

zatytułowanej:

„Degradation of selected drug used in COVID-19 therapy in the aquatic environment
by means of solar light-driven processes”

[Degradacja wybranych leków stosowanych w terapii COVID-19 w środowisku wodnym
za pomocą procesów inicjowanych światłem słonecznym]

wykonanej w Katedrze Biotechnologii Środowiskowej Wydziału Energetyki i Inżynierii Środowiska
Politechniki Śląskiej pod kierunkiem prof. dr inż. Ewy Felis

Informacje podstawowe

Studia doktoranckie zostały przeprowadzone zgodnie z ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2024 r., poz. 1571 z późn. zmianami) w dziedzinie nauk inżynierskich i technicznych w dyscyplinie Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka.

Ocena pracy doktorskiej została dokonana na podstawie decyzji Rady Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka na Politechnice Śląskiej podjętej na posiedzeniu w dniu 18 grudnia 2025 r. Praca została mi przekazana do recenzji w dniu 19 stycznia 2026 r.

Informacje ogólne

Rozprawa dotyczy degradacji pod wpływem światła słonecznego kilku leków przeciwwirusowych, takich jak izoprinozyna, rytonawir i remdesiwir. W badaniu analizowano fotolizę bezpośrednią, procesy fotokatalityczne oraz fotolizę wspomaganą H_2O_2 w warunkach symulowanego nasłonecznienia. Badania dotyczą istotnego problemu ścieżek degradacji związków stosowanych podczas pandemii COVID-19. Z jednej strony może to pomóc w przewidywaniu ich losów w środowisku (ze względu na przenikanie światła słonecznego do zbiorników wodnych), z drugiej zaś umożliwić opracowanie skutecznego oczyszczania ścieków – usuwanie badanych zanieczyszczeń.

Oryginalność i znaczenie tematu pracy

W badaniu systematycznie oceniono bezpośrednią fotolizę i fotokatalizę pod wpływem promieniowania słonecznego w trzech matrycach wodnych (woda milliQ-Q, woda z kranu i woda z rzeki Ostropka), dostarczając nowych danych środowiskowych dotyczących ich stabilności i zachowań transformacyjnych. Uzyskano również pewne spostrzeżenia dotyczące mechanizmów degradacji i kinetyki.

Po pierwsze, zaobserwowano, że prosta fotoliza słoneczna jest nieefektywna w degradacji tych leków, co potwierdza ich wysoką fotostabilność. Wykazano, że obecność soli, jonów i materii organicznej wpływa na degradację leków. Zastosowanie różnych fotokatalizatorów spowodowało znaczną poprawę wydajności degradacji izoprinozyny, podczas gdy rytonawir i remdesiwir uległy adsorpcji na fotokatalizatorach. Dodanie nadtlenu wodoru do fotolizy światłem słonecznym spowodowało całkowity rozkład izoprinozyny i rytonawiru. Przy tych samych dawkach H_2O_2 remdesiwir uległ degradacji w ponad 80%. Eksperyment przeprowadzony w warunkach ciemności przy zastosowaniu najwyższej dawki nadtlenu wodoru (w warunkach „oświetlenia”) potwierdził, że mechanizm ten wiązał się z wytwarzaniem rodników hydroksylowych. W przypadku fotokatalitycznej degradacji izoprinozyny oceniono wpływ jonów, takich jak siarczany, chlorek, azotan i węglan.

Chociaż istnieją pewne dane literaturowe dotyczące fotodegradacji wyżej wymienionych leków, nie ma tak kompleksowych badań nad procesami napędzanymi światłem słonecznym.

Struktura i redakcja pracy doktorskiej

Praca doktorska to 132-stronicowy manuskrypt zawierający 25 rysunków, 18 tabel oraz dodatkowe 16 rysunków dołączonych w materiałach uzupełniających. Struktura pracy jest poprawna. Podzielona jest na następujące rozdziały: 1. Przegląd literatury, 2. Hipoteza badawcza, cel i zakres pracy, 3. Materiały i metodologia, 4. Wyniki i dyskusja, 5. Podsumowanie i wnioski, 6. Kierunki dalszych badań, 7. Bibliografia, 8. Informacje uzupełniające, 9. Spis rysunków, 10. Spis tabel, 11. Spis publikacji oraz 12. Spis innych działań naukowych.

Praca jest ogólnie dobrze przygotowana, jednak występują w niej pewne niedociągnięcia redakcyjne. Skrótów nie są wymienione w porządku alfabetycznym, co utrudnia korzystanie z nich. Brakuje odniesienia do źródła literatury dotyczącego właściwości izoprynozy (tabela 2, strona 25). W równaniu (1) występuje nieprawidłowa kropka między stałą szybkości kinetycznej rzędu zerowego (k_t) a czasem (t , strona 43). Co zaskakujące, rozdział 4 ma taką samą nazwę jak podrozdział 4.1. (Wyniki i dyskusja). Wiele rysunków podzielonych jest na a), b) i c.); moim zdaniem powinny one być ponumerowane jako oddzielne rysunki. Chociaż cała rozprawa napisana jest bardzo dobrym angielskim, w rysunkach 9–11, 17, 20–21 występuje błąd w terminie „cumulative”. Co więcej, jednostka energii skumulowanej jest błędnie zapisana – KJ/L. Powinna to być kJ/L. Rysunek 17 (strona 70), przedstawiający wyniki eksperymentów z sorpcją w ciemności, również zawiera „energię skumulowaną” na osi OX zamiast czasu reakcji.

Wartość merytoryczna pracy doktorskiej

Doktorantka rozpoczyna pracę krótkim wprowadzeniem do tematu (podrozdział 1.1). Następnie opisuje leki przeciwwirusowe jako nowe zanieczyszczenia (1.2), kładąc nacisk na ich zachowanie i losy w środowisku wodnym. Ponadto omówiono zaawansowane procesy utleniania (AOP) jako technikę usuwania zanieczyszczeń antropogenicznych (1.3), wraz z wglądem w mechanizmy AOP (1.4). W podrozdziale 1.3. pojawia się powtórzenie informacji zawartych już w podrozdziale 1.2, a mianowicie dotyczących obecności badanych farmaceutyków w środowisku wodnym oraz ich szkodliwości dla niego. Najwyraźniej mechanizmy zaawansowanych procesów utleniania nie są opisane zbyt szczegółowo. Co więcej, brakuje zarysu ich modeli kinetycznych. Kolejne podrozdziały poświęcone są korzyściom dla środowiska (1.5), wadom (1.6), strategiom łagodzenia tych ostatnich (1.7) oraz celom zrównoważonego rozwoju, na które wpływają AOP (1.8). Moim zdaniem, negatywny wpływ AOPs na środowisko oraz możliwości jego łagodzenia zostały bardzo dobrze opisane. Ostatnie rozdziały zawierają szczegółowy opis leków wykorzystanych w badaniu (1.9). Praca opiera się na 124 źródłach literaturowych, z których 84 opublikowano w ciągu ostatnich pięciu lat.

W rozdziale 2 jasno sformułowano hipotezę badawczą, cel oraz zakres pracy. W rzeczywistości przegląd literatury (rozdział 1) nie zawiera informacji dotyczących wpływu rodzaju fotokatalizatora, składu matrycy wodnej ani parametrów operacyjnych na fotokatalizę inicjowaną światłem słonecznym, dlatego mam wątpliwości czy hipoteza badawcza (2.1) opiera się na tym przeglądzie. Ta sama wada dotyczy problemów naukowych przedstawionych w rozdziale 2. Podrozdział 2.3 przedstawia główny cel badania.

Moim zdaniem jest on sformułowany zbyt ogólnie, ponieważ praca nie zawiera wyników badań przeprowadzonych zarówno w świetle słonecznym, jak i sztucznym – jedynie w świetle sztucznym. Konkretnie cele i zadania badania przedstawione w podrozdziale 2.4 są bardziej precyzyjne; nie znalazłam jedynie badań dotyczących wpływu stężenia zanieczyszczenia na wydajność procesu. Podrozdział 2.5 przedstawia zakres pracy.

Rozdział 3 dobrze opisuje materiały i metodologię zastosowaną w niniejszym badaniu. Ogólnie rzecz biorąc, zastosowane metody są precyzyjnie scharakteryzowane. Opis procedur mógłby jednak zostać skrócony – np. w podrozdziale 3.3.5 dotyczącym badań fotolitycznych sposób przeprowadzenia procesu przedstawiono oddzielnie dla każdego z leków. To samo dotyczy badań nad procesem fotokatalizy (podrozdział 3.3.6). Wyniki badań zostały przedstawione w tabelach i na rysunkach, opisane i częściowo omówione w odniesieniu do danych literaturowych w rozdziale 4. Najpierw opisano wyniki profilowania jonowego zastosowanych matryc wodnych (4.1.1). Nie rozumiem, dlaczego doktorantka nie przedstawiła (tabela 6) ilości jonów, dla których posiadała chromatogramy, a kalibracja chromatografu jonowego została wspomniana w rozdziale 3. Oczywiście jest, że woda milli-Q, woda z kranu i woda powierzchniowa różnią się stężeniami jonów. Stwierdzenie, że chodziło o jeden lub trzy impulsy (tabela 6) określonych jonów, jest wysoce niewystarczające.

Fotolityczny rozkład leków zastosowanych w niniejszym badaniu został przeanalizowany w podrozdziale 4.1.2. Zaobserwowano, że w wodzie powierzchniowej uzyskano wyższy stopień usuwania niż w wodzie Milli-Q, podczas gdy autorka omówiła w tym rozdziale wyniki literaturowe, stwierdzając, że matryca wody powierzchniowej może zmniejszać wydajność fotolizy. Nie zgadza się to z jej wynikami. Ogólnie rzecz biorąc, podrozdział ten zakończono słusznym wnioskiem, że badane leki nie ulegają skutecznej degradacji w procesie fotolizy pod wpływem sztucznego promieniowania słonecznego. Pomimo niskich szybkości degradacji autorka próbowała dopasować kinetykę rzędu pierwszego do uzyskanych wyników fotolizy. Tytuł tabeli 7 skłania do refleksji – co oznacza [wyrażenie] „pseudo-stałe pierwszego rzędu”?

Kolejny podrozdział (4.1.3) przedstawia fotokatalityczną degradację wybranych leków przy użyciu różnych fotokatalizatorów. TiO_2 i ZnO doprowadziły do całkowitego usunięcia izoprynozyiny przy stężeniach 5 i 10 mg/l. Wskazane byłoby przedstawienie dopasowania do kinetyki pseudo-pierwszego rzędu na wykresach – a nie tylko w tabelach. Trudno jest śledzić kinetykę degradacji rytonawiru i remdesiwiru w warunkach fotokatalitycznych, ponieważ doktorantka przedstawia jedynie krzywe dotyczące procesu adsorpcji obu leków. Krzywe dla rytonawiru potwierdzają, że proces adsorpcji przebiegał zgodnie z proponowanym modelem – izotermą Langmuira. Natomiast rysunki 14 i 16 obalają założenie, że proces adsorpcji remdesiwiru przebiega zgodnie z proponowanym modelem adsorpcji-desorpcji – dopasowana krzywa (Model_Θ) wykazuje zupełnie inny trend niż dane eksperymentalne (EXP_Θ).

Wyniki badań dotyczących fotolizy wspomaganej nadtlaniem wodoru przedstawiono w podrozdziale 4.1.5. Podkreślono, że dodanie nadtlenu wodoru do procesu fotolizy doprowadziło do znacznej poprawy wydajności degradacji wszystkich leków. Autorka nie powiązała wyników uzyskanych w warunkach ciemności z występowaniem rodników hydroksylowych w warunkach światła w obecności nadtlenu wodoru.

Podrozdział 4.1.6 przedstawia wpływ pojedynczych jonów (siarczanów, chlorków, azotanów i węglanów) na fotokatalizę izoprynozyiny. Bardzo cennym elementem tej części pracy jest próba wyjaśnienia mechanizmów oddziaływania tych jonów na proces fotokatalityczny.

Podrozdział 4.1.7 można by pominąć. Jest on poświęcony wpływowi jonów na adsorpcję rytonawiru. Po pierwsze, nie ma wystarczających danych, aby wyciągnąć jakiegokolwiek wnioski. Po drugie, sam proces adsorpcji nie jest najważniejszym aspektem pracy. Po trzecie, brakuje informacji, w jakich warunkach (w ciemności czy w świetle) przeprowadzono proces adsorpcji.

Wątpliwa jest mineralizacja materii organicznej, opisana w podrozdziale 4.1.8. Jest to również część tej pracy, którą można by pominąć.

Rozdział 5 przedstawia kluczowy wkład badawczy (z punktu widzenia autorki), wnioski oraz uzasadnienie nowatorstwa. Mogę zgodzić się z tym, że:

1. Jest to pierwsze studium porównawcze dotyczące degradacji remdesiwiru, rytonawiru i izoprynozyiny pod wpływem promieniowania słonecznego,
2. Badanie wykazało, że sama fotoliza jest niewystarczająca do degradacji wyżej wymienionych leków,
3. Różne fotokatalizatory poprawiły wydajność degradacji tych leków,
4. Eksperymenty przeprowadzone w różnych matrycach wodnych zapewniły realistyczną ocenę wpływu określonych jonów oraz ogólnej zawartości soli i materii organicznej na proces fotokatalizy,
5. Kinetykę degradacji modelowano przy użyciu reakcji pseudo-pierwszego rzędu dla fotodegradacji oraz równania Langmuira-Hinshelwooda dla adsorpcji rytonawiru.

Pozostałe elementy „wkładu badawczego” nie zostały w stopniu wystarczającym potwierdzone w ramach niniejszej rozprawy. Ogólnie rzecz biorąc, wnioski stanowią rozbudowany opis kluczowych osiągnięć badawczych. Wśród stwierdzeń dotyczących nowatorskiego charakteru pracy znajdują się pewne sformułowania, które moim zdaniem nie zostały w niniejszej rozprawie udowodnione. Zostały one wymienione w kolejnej sekcji niniejszej recenzji (pytania od 15 do 18) – jako podstawa do dyskusji z doktorantką.

Rozdział 6 stanowi cenną część pracy – zawiera plany przyszłych badań nad fotolizą słoneczną i fotokatalizą wybranych leków.

Uwagi krytyczne wymagające wyjaśnienia oraz kwestie do dyskusji

1. Strona 39, podrozdział 3.3.5.1: Co oznacza: „Alikwoty pobierano w ustalonych odstępach czasu (...), oraz 120 minut **zarówno przed jak i po naświetlaniu**”?
2. Strona 42, podrozdział 3.3.9: W jaki sposób udało się przygotować tak wysokie stężenie, jak 500 mg/l rytonawiru i remdesiwiru, które są słabo rozpuszczalne w wodzie?

3. Strona 44, podrozdział 4.1.2: Jakie inne mechanizmy mogły spowodować, że wydajność degradacji w wodach powierzchniowych była wyższa niż w ultraczystej wodzie?
4. Strona 58, podrozdział 4.1.3.1: Jak to możliwe, że szybkość degradacji izoprynozyiny w wodach powierzchniowych wyniosła 23%, podczas gdy na rysunku 11c C/C_0 jest bliskie 0,4?
5. Strony 59–65: Dlaczego proces adsorpcji oceniano pod wpływem promieniowania słonecznego?
6. Strona 63, podrozdział 4.1.3.3.: Proszę wyjaśnić zdanie: „Układ TiO_2 P25 wykazał nieco wyższy ogólny procent adsorpcji (99,21%) w porównaniu z ZnO (100%)”
7. Proszę wyjaśnić rysunki 14a i 14b. EXP_{Θ} wykazuje zupełnie inny trend niż $Model_{\Theta}$. Jak to możliwe, że współczynnik korelacji wynosi 0,861? W jaki sposób doktorantka obliczyła współczynnik determinacji dla tego dopasowania? Proszę przedstawić wzór i przykładowe obliczenia.
8. Podrozdziały 4.1.3 i 4.1.4: Jaka była różnica między procesem adsorpcji rytonawiru i remdesiwiru w warunkach oświetlenia i ciemności?
9. Strona 74, podrozdział 4.1.5: Dlaczego doktorantka twierdzi, że 100% degradacja izoprynozyiny przez dawkę H_2O_2 równą 500 μL trwała 120 minut?
10. Strona 77, podrozdział 4.1.5: Co oznacza termin „pseudokinetyka degradacji leku”?
11. Strona 78, podrozdział 4.1.6.1: W jaki sposób obliczono szybkości degradacji izoprynozyiny, skoro stężenie leku było poniżej granicy wykrywalności?
12. Strona 83, podrozdział 4.1.6.3: Proszę wyjaśnić równanie 16 – jakie są substraty i produkty w tym równaniu?
13. „W niniejszej pracy określono (...) główne produkty fotodegradacji”. Jakie produkty zostały określone?
14. „Było to pierwsze badanie (...) skupiające się na zastosowaniu w praktyce”. W jaki sposób badania skupiały się na zastosowaniu w praktyce?
15. „Badanie dotyczące rytonawiru oraz ocena procentowego usuwania remdesiwiru przy użyciu dwufazowego modelu kinetycznego opartego na unikalnej dynamice adsorpcji i desorpcji stanowiły nowatorski wkład w tę dziedzinę”. Gdzie w tym modelu uwzględniono rytonawir? W pytaniu 7. poruszono już problemy związane z modelowaniem procesu adsorpcji remdesiwiru za pomocą tego modelu.
16. Na jakiej podstawie doktorantka stwierdziła, że procesy napędzane światłem słonecznym są skalowalne? Czy w ramach niniejszego badania przeprowadzono eksperymenty w innej skali?

Ocena końcowa pracy doktorskiej

Podsumowując, praca doktorska mgr Humam Ahmed ma wystarczającą wartość merytoryczną i dostarcza pewnych (wymienionych powyżej jako kluczowe elementy wkładu) nowych i interesujących informacji na temat procesów inicjowanych światłem słonecznym stosowanych do degradacji trzech leków przeciwwirusowych: izoprynozyiny, rytonawiru i remdesiwiru. Chociaż niektóre wyniki i wnioski powinny zostać ponownie zbadane i omówione, przedłożona do recenzji praca doktorska stanowi oryginalny wkład w dziedzinie inżynierii środowiska, górnictwa i energetyki. Ponadto praca dowodzi, że mgr Humam Ahmed posiada wiedzę teoretyczną i praktyczną w zakresie procesów inicjowanych światłem słonecznym.

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska zatytułowana „Degradation of selected drugs used in COVID-19 therapy in the aquatic environment by means of solar light driven processes” spełnia wymogi formalne dotyczące rozpraw doktorskich określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. o szkolnictwie wyższym i nauce. W związku z tym wnoszę, aby Rada Dyscypliny Inżynieria Środowiska, Górnictwo i Energetyka na Politechnice Śląskiej dopuściła mgr Humam Ahmed do kolejnych etapów przewodu doktorskiego.

[podpis odręczny] Katarzyna Paździor

Ja, Małgorzata Sokołowska, tłumacz przysięgły języka angielskiego w Gliwicach, nr wpisu na listę tłumaczy przysięgłych TP/1509/05. Poświadczam zgodność niniejszego tłumaczenia z okazanym mi oryginałem sporządzonym w języku angielskim. Gliwice, dnia 20 marca 2026 r. Repertorium nr 122/2026.