

Prof. dr hab. inż. Iwona Skoczko
Wydział Budownictwa i Nauk o Środowisku
Politechnika Białostocka
15-351 Białystok, ul. Wiejska 45E
Tel. 857469563 e-mail: i.skoczko@pb.edu.pl

Białystok dn. 2025-04-10

RECENZJA

ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr Kamila Artura Majewskiego

nt. Opracowanie metody badawczej do oceny degradacji mikroplastiku

z pasa nadbrzeżnego Morza Bałtyckiego

***Development of a research method for the assessment
of microplastic degradation from the coastal belt of the Baltic Sea***

Promotor pracy: dr hab. inż. Sylwia Myszograj, prof. UZ

Promotor pomocniczy: dr inż. Ewelina Pluciennik-Koropczuk

Podstawa recenzji

Recenzję opracowano na podstawie pisma nr IIŚ-5.511.1.6.2025 z dnia 13 marca 2025 Pani Przewodniczącej Rady Naukowej Dyscypliny Naukowej Inżynieria Środowiska Górnictwo i Energetyka Uniwersytetu Zielonogórskiego w Zielonej Górze dr hab. inż. Sylwi Myszograj, prof. UZ oraz na podstawie uchwały Senatu Uniwersytetu Zielonogórskiego powołującej mnie na recenzenta rozprawy doktorskiej mgr Kamila Artura Majewskiego. Recenzja jest opracowana na podstawie art. 1967 pkt 1 w zw. Z art. 178 ust.1 pkt 1, art. 190 ust.2, 4 i 5, art. 192 ust.2 pkt. 5 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024 poz. 1571 ze zm.), Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w przewodzie habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora z dnia 19 stycznia 2018 (Dz.U. z 2018 r. poz.261) oraz uchwałą Senatu Uniwersytetu Zielonogórskiego z dnia 11 grudnia 2024 r.

Przedmiot i zakres rozprawy

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska Pana mgr Kamila Artura Majewskiego nt. *„Opracowanie metody badawczej do oceny degradacji mikroplastiku z pasa nadbrzeżnego Morza Bałtyckiego”*. Promotorem pracy jest Pani dr hab. inż. dr hab. inż. Sylwia Myszograj, prof. UZ, zaś promotorem pomocniczym dr inż. Ewelina Płuciennik-Koropczuk.

Doktorant sformułował 3 hipotezy badawcze:

- 1. Do oceny stopnia i podatności na degradację mikroplastiku konieczna jest zaawansowana mikroskopowa analiza powierzchni, umożliwiająca identyfikację i kwantyfikację uszkodzeń mechanicznych.**
- 2. Możliwe jest opracowanie metody badawczej, która pozwala na określenie stopnia i formy degradacji mikroplastiku, integrując informacje o właściwościach tworzyw sztucznych, kształcie próbki, nasyceniu koloru, obecności biofilmu oraz wyniki analizy uszkodzeń mechanicznych.**
- 3. Czynniki środowiskowe (promieniowanie UV, uszkodzenia mechaniczne, substancje chemiczne i mikroorganizmy) w różnym stopniu wpływają na degradację mikroplastiku.**

Na podstawie postawionych hipotez badawczych zaplanował następujące etapy prac:

1. wybór metod i technik pomiarowych do oceny stanu degradacji próbek mikroplastiku, metod przygotowania próbek do badań i ustalenie kryteriów niezbędnych do oceny stanu degradacji na podstawie przeglądu literatury;
2. opracowanie procedury badań pilotażowych, wybór plaż referencyjnych i pobór próbek;
3. opracowanie metody badawczej w tym drzewa decyzyjnego (rys. 12), które określa za pomocą algorytmu wpływ atrybutów danych na predykcję wyników;
4. wprowadzenie do modelu wyników mikroskopowej analizy powierzchni;
5. charakterystyka badanej próbki mikroplastiku z uwzględnieniem właściwości tworzywa sztucznego, kształtu, koloru, obecności biofilmu i uszkodzeń mechanicznych;
6. ustalenie wpływu czynników środowiskowych (promieniowanie UV, uszkodzenia mechaniczne, substancje chemiczne i mikroorganizmy) na proces degradacji mikroplastiku;
7. weryfikacja opracowanej procedury metody badawczej.

Jako cel swojej pracy Autor postanowił przeprowadzić badania, które doprowadziłyby do rozszerzenia wiedzy dotyczącej degradacji mikroplastików w środowisku, w szczególności z morskiego pasa nadbrzeżnego. Dokonał analizy wielokryterialnej uwzględniającej wpływ podstawowych czynników środowiskowych takich jak promieniowanie UV, temperatura, czynniki biologiczne i chemiczne oraz działanie sił mechanicznych na degradację mikroplastików. Ponadto podjął się identyfikacji czynników i procesów degradacji, które pozwalają określić szybkość i sposób rozpadania się cząstek, co może mieć wpływ na opracowanie skutecznych metod ich usuwania, a także strategii i technologii mających na celu ograniczenie przedostawania się mikrocząstek do środowiska oraz zmniejszenie produkcji i użycia tworzyw sztucznych, które łatwo ulegają rozpadowi

Zakres badań realizowanych w ramach pracy obejmował:

1. Kryteria charakteryzujące mikroplastik,
2. Charakterystykę wybranych tworzyw sztucznych z uwzględnieniem ich podatności na degradację
3. Monitoring próbek mikroplastiku na plażach referencyjnych
4. Metodykę poboru próbek środowiskowych i metody badań analitycznych
5. Opracowanie algorytmu drzew decyzyjnych w badaniu degradacji powierzchni mikroplastiku jako element metody badawczej
6. Walidację zastosowanego narzędzia badawczego
7. Analizę statystyczną badanych próbek mikroplastiku pod względem dopasowania widma FTIR
8. Ocenę degradacji badanych próbek mikroplastiku
9. Wnioski końcowe.

Tematyka pracy nawiązuje do problematyki mikroplastików, których ilość w środowisku naturalnym z roku na rok rośnie w zastraszającym tempie wskazując jednoznacznie na powszechny problem użytkowania i zagospodarowania różnego rodzaju odpadów z tworzyw sztucznych. Współczesne środowisko morskie staje się coraz bardziej narażone na zanieczyszczenia wynikające z działalności człowieka, spośród których jednym z najpoważniejszych i najbardziej niepokojących jest mikroplastik. Literatura wskazuje, że materiał ten odnosi się do drobin plastiku o średnicy nieprzekraczającej 5 milimetrów, które występują powszechnie w wodach morskich, osadach dennych, a także – coraz częściej – w przybrzeżnych pasach nadbrzeżnych. Właśnie morskie pasy nadbrzeżne stanowią newralgiczny

obszar, w którym kumulują się różnorodne zanieczyszczenia z lądu i morza. Jako strefy intensywnej wymiany materii i energii, są one szczególnie podatne na gromadzenie się mikroplastiku pochodzącego z wielu źródeł – zarówno bezpośrednich, jak turystyka czy aktywność przemysłowa, jak i pośrednich, takich jak spływy powierzchniowe, odpływy ścieków czy dryfujące odpady morskie. Problem ten ma charakter nie tylko ekologiczny, ale również gospodarczy i społeczny, wpływając negatywnie na bioróżnorodność, jakość siedlisk przybrzeżnych, bezpieczeństwo żywnościowe (m.in. przez obecność mikroplastiku w łańcuchu pokarmowym) oraz atrakcyjność turystyczną wybrzeży.

W ostatnich latach zagadnienie mikroplastiku zyskało szczególne znaczenie w kontekście globalnych wyzwań związanych z ochroną środowiska morskiego. Rośnie świadomość konieczności monitorowania jego występowania oraz opracowania skutecznych strategii ograniczania dalszego zanieczyszczenia. Złożoność problemu wymaga jednak podejścia interdyscyplinarnego, łączącego wiedzę z zakresu oceanografii, ekologii, chemii środowiskowej, a także nauk społecznych i prawnych. Morskie pasy nadbrzeżne, jako obszary graniczne między ekosystemami lądowymi i wodnymi, stają się w tym kontekście niezwykle istotnym obiektem badań naukowych, a także miejscem, gdzie skutki obecności mikroplastiku są najbardziej widoczne i dotkliwe. Badania naukowe na poziomie globalnym skupiają się głównie na źródłach mikroplastiku oraz jego obecności. Z analizy danych literaturowych wynika, że problematyczny jest przede wszystkim brak standardów analitycznych związanych z przyjęciem metody oznaczania oraz ustaleniem wielkości i formy cząsteczek mikroplastiku. Nie powstały dotychczas międzynarodowe, ujednolicone procedury, które regulowałyby wszystkie aspekty monitoringu (tj. pobieranie próbek, ich przygotowanie, identyfikacja, charakterystyka, ocena degradacji itp.), co powoduje, że porównanie danych jest utrudnione. Doktorant podjął zatem wysiłek opracowania metody badawczej do oceny stopnia i formy degradacji, a także podatności mikroplastiku na rozkład.

Recenzowaną rozprawę doktorską mgr Kamila Artura Majewskiego pt. *„Opracowanie metody badawczej do oceny degradacji mikroplastiku z pasa nadbrzeżnego Morza Bałtyckiego”* stanowi tekst przedstawiony na 255 stronach i zawarty w dwóch głównych częściach: teoretycznej i koncepcyjnej, składających się łącznie z 9 podstawowych rozdziałów. Rozprawę otwiera wykaz stosowanych skrótów. Pierwsza część pracy stanowi przegląd literatury w zakresie analizowanego tematu i składa się z czterech rozdziałów: Rozdział 1 stanowi Wstęp. Rozdział 2 zawiera kryteria charakteryzujące mikroplastik, jego skład chemiczny, rozmiar, kształt i inne. W Rozdziale 3 Doktorant scharakteryzował wybrane tworzywa sztuczne z

uwzględnieniem ich podatności na degradację, zaś Rozdział 4 przedstawia monitoring próbek mikroplastiku na plażach referencyjnych. Część ta kończy się Rozdziałem 5 i sformułowaniem hipotez, określeniem celu pracy określeniem zakresu pracy. Drugi człon rozprawy jest jej częścią zasadniczą i składa się z 4 rozdziałów: Rozdział 6: Metodyka poboru próbek środowiskowych, Rozdział 7: Metody badań analitycznych, Rozdział 8: Wyniki badań i dyskusja. Pracę zamyka Rozdział 9: Wnioski odnoszące się do celów i hipotez pracy. Na końcu załączono bardzo obszerną Literaturę, obejmującą 255 pozycji przeanalizowanych przez Doktoranta (zarówno w języku polskim jak i angielskim), akty prawne, dokumenty oraz strony internetowe. Należy podkreślić, iż przeważająca liczba cytowanych prac została opublikowana po roku 2000. Cytowane prace zostały wykorzystane głównie w części teoretycznej rozprawy oraz dyskusji wyników badań. Rozprawę zamyka Załącznik 1: Karty oceny próbek środowiskowych oraz Załącznik 2: Arkusz klasyfikacji próbek.

Poszczególne rozdziały zostały logicznie uporządkowane i kompleksowo opracowane, prowadząc od ogólnej charakterystyki problemu po szczegółowe rozwiązania metodyczne i analityczne. Każdy rozdział pełni określoną funkcję w strukturze pracy, kontrybuując do całościowego ujęcia problematyki degradacji mikroplastiku w środowisku morskim.

Rozdział pierwszy (Wstęp, s. 7–8) pełni rolę syntetycznego wprowadzenia do problemu mikroplastiku jako globalnego zagrożenia środowiskowego. Autor omawia skalę produkcji tworzyw sztucznych na świecie i ich udział w zanieczyszczaniu środowiska wodnego, podkreślając szczególnie znaczenie mikrodrobin plastiku w ekosystemach morskich. Wskazuje również na trudności w degradacji tych materiałów oraz konieczność opracowania skutecznych narzędzi badawczych, co stanowi bezpośrednie uzasadnienie podjęcia tematyki pracy.

Drugi rozdział (Kryteria charakteryzujące mikroplastik, s. 9–20, 12 stron) stanowi teoretyczne rozwinięcie zagadnienia mikroplastiku poprzez systematyzację cech fizykochemicznych decydujących o jego klasyfikacji. Autor omawia szczegółowo skład chemiczny, rozmiar, stan skupienia, rozpuszczalność, kształt, kolor oraz pochodzenie mikroplastiku. Rozdział ten odgrywa fundamentalną rolę w budowaniu podstaw definicyjnych i klasyfikacyjnych dla dalszych rozważań badawczych oraz konstrukcji metody oceny degradacji cząstek mikroplastiku.

Rozdział trzeci (Charakterystyka wybranych tworzyw sztucznych z uwzględnieniem ich podatności na degradację, s. 21–32, 12 stron) prezentuje analizę wybranych materiałów polimerowych pod kątem ich odporności na czynniki fizyczne, chemiczne i biologiczne. Szczególny nacisk położono na właściwości degradacyjne tworzyw najczęściej występujących w środowisku nadbrzeżnym. Rozdział ten pełni istotną funkcję, stanowiąc podstawę dla

dalszego opracowania narzędzia badawczego, które uwzględnia różnice w podatności materiałów na procesy starzenia i rozkładu.

Czwarty rozdział (Monitoring próbek mikroplastiku na plażach referencyjnych, s. 33–37, 5 stron) opisuje działania terenowe związane z poborem próbek z plaż referencyjnych w pasie nadbrzeżnym Morza Bałtyckiego. Zawarto w nim szczegóły lokalizacji, metod zbierania materiału oraz charakterystyki próbek. Rozdział ten pełni funkcję dokumentacyjną oraz przygotowawczą do etapu analitycznego – umożliwia przejście od założeń teoretycznych do rzeczywistych danych środowiskowych.

Rozdział piąty (Cel, tezy i zakres pracy, s. 38–39, 2 strony) ma charakter deklaracyjny i porządkujący. Autor jasno określa główny cel rozprawy, którym jest opracowanie metody badawczej do oceny degradacji mikroplastiku, oraz formułuje tezy badawcze i zakres prac. Rozdział ten pozwala jednoznacznie określić ramy naukowego przedsięwzięcia oraz wyznacza kierunek realizowanych badań.

Rozdział szósty (Metodyka poboru próbek środowiskowych, s. 40–41; 2 strony) stanowi istotny element konstrukcji metody badawczej, ponieważ dotyczy technicznych aspektów pozyskiwania próbek mikroplastiku z rzeczywistego środowiska – w tym przypadku z pasa nadbrzeżnego Morza Bałtyckiego. Celem rozdziału jest przedstawienie szczegółowej procedury terenowej związanej z przygotowaniem, poborem oraz zabezpieczaniem próbek środowiskowych, stanowiących podstawę dla dalszych analiz laboratoryjnych. Doktorant w przejrzysty sposób opisuje sposób wyznaczenia miejsc referencyjnych, charakterystykę punktów pomiarowych oraz harmonogram poboru próbek, przy czym uwzględnia wpływ zmienności przestrzennej i czasowej w obrębie wybranych odcinków wybrzeża. Ujęto również sposób postępowania z próbkami po ich pozyskaniu – w tym zasady unikania kontaminacji oraz utrzymania odpowiednich warunków przechowywania. Użycie odpowiednich narzędzi (np. łopatk, sita, pojemniki z polipropylenu) zostało ustandaryzowane, a opisany protokół poboru został zgodny z wytycznymi europejskimi (np. MSFD – Marine Strategy Framework Directive). Ten krótki, lecz bardzo konkretny rozdział stanowi kluczowy element walidacyjny w pracy doktorskiej – zapewnia bowiem wiarygodność i powtarzalność uzyskanych danych, a także umożliwia ocenę, na ile środowiskowe warunki mogły wpłynąć na jakość oraz reprezentatywność analizowanych próbek.

Rozdział siódmy (Metody badań analitycznych s. 42–47; 6 stron) pracy doktorskiej mgr Kamila Artura Majewskiego stanowi kluczowy element metodyczny i analityczny rozprawy, obejmując szczegółowy opis zastosowanych technik badawczych służących do identyfikacji i oceny stanu degradacji cząstek mikroplastiku pozyskanych z morskiego pasa nadbrzeżnego.

Jego zasadniczym celem jest przedstawienie kompletu metod analitycznych, które – łącznie – tworzą kompleksowy i wzajemnie uzupełniający się zestaw narzędzi umożliwiających nie tylko identyfikację rodzaju materiału polimerowego, ale także ocenę jego właściwości fizykochemicznych oraz stopnia zaawansowania procesów degradacyjnych.

W pierwszej kolejności, w pracy omówiono zastosowanie metod mikroskopowych, które stanowią podstawę wstępnej oceny cząstek mikroplastiku. Mikroskopia optyczna, jako narzędzie nieniszczące i stosunkowo łatwo dostępne, została wykorzystana do obserwacji morfologii badanych próbek. Analizie poddano takie cechy wizualne jak: kształt, kolor, struktura powierzchni, obecność spękań, zmatowień czy mikroporów, które są potencjalnymi wskaźnikami degradacji mechanicznej lub fotochemicznej. Mikroskopia pozwoliła również na wykrycie obecności biofilmu lub cząstek mineralnych przylegających do powierzchni plastiku. Stosowano różne powiększenia (najczęściej w zakresie 40x–400x), zależnie od rozmiaru cząstek i oczekiwanej precyzji obserwacji. Metody te umożliwiły przeprowadzenie analizy jakościowej w zakresie oceny zewnętrznych symptomów procesów degradacyjnych, takich jak postępujące matowienie, nieregularność krawędzi czy obecność uszkodzeń powierzchni.

W dalszej części rozdziału Autor szczegółowo opisuje zastosowanie spektroskopii w podczerwieni z transformacją Fouriera (FTIR), a konkretnie – w konfiguracji ATR (Attenuated Total Reflectance). Ta technika analityczna została wykorzystana do jednoznacznej identyfikacji rodzajów polimerów tworzących badane cząstki mikroplastiku oraz do oceny zmian w strukturze chemicznej materiału, mogących świadczyć o jego degradacji. Dzięki zastosowaniu ATR-FTIR możliwe było uzyskanie charakterystycznych widm absorpcyjnych, odpowiadających obecności grup funkcyjnych specyficznych dla poszczególnych typów tworzyw (np. polietylenu, polipropylenu, PET itp.). Ponadto, analizując zmiany intensywności i położenia wybranych pasm (takich jak grupy karbonylowe, hydroksylowe, estrowe), można było wyciągnąć wnioski dotyczące procesów utleniania, hydrolizy czy fotodegradacji. Szczególną wartością stanowiła możliwość porównania uzyskanych widm z referencyjnymi bazami danych, co znacząco zwiększyło wiarygodność identyfikacji materiałów polimerowych.

Zastosowanie spektroskopii Ramana stanowiło kolejny istotny etap badań analitycznych. W odróżnieniu od FTIR, technika ta pozwala na analizę struktury cząstek bez konieczności ich uprzedniego przygotowania – nie wymaga szlifowania, suszenia czy innych zabiegów, co czyni ją przydatną szczególnie w przypadku mikroplastików pokrytych biofilmem lub osadami. Spektroskopia Ramana umożliwiła detekcję drgań molekularnych i analizę zmian w strukturze wiązań chemicznych wewnątrz materiałów polimerowych. Dzięki temu można było

wnioskować o postępującej degradacji, prowadzącej do rozpadu struktury makrocząsteczek. Autor zastosował technikę Ramana jako narzędzie uzupełniające względem FTIR, co pozwoliło na uzyskanie pełniejszego obrazu właściwości fizykochemicznych badanych cząstek. Dodatkowo, metoda ta umożliwiła potwierdzenie niektórych identyfikacji polimerów, zwłaszcza w przypadkach, gdy FTIR dawał niejednoznaczne wyniki z powodu obecności domieszek lub biofilmów na powierzchni próbek.

Cały rozdział siódmy, obejmujący metody analityczne, pełni kluczową rolę w strukturze rozprawy doktorskiej – stanowi fundament dla przeprowadzenia właściwych analiz degradacji mikroplastiku oraz umożliwia ocenę skuteczności opracowanego przez Autora narzędzia badawczego. Wysoka jakość zastosowanych metod, ich komplementarność oraz przejrzyste uzasadnienie wyboru każdej z technik świadczą o dobrze przemyślanej koncepcji badawczej. Zastosowane podejście analityczne nie tylko odpowiada na potrzeby bieżących badań środowiskowych, ale także stanowi punkt wyjścia do przyszłych prac aplikacyjnych i wdrożeniowych w zakresie oceny wpływu mikroplastiku na ekosystemy przybrzeżne.

Rozdział ósmy: Wyniki badań i dyskusja obejmujący (s. 48–84, 37 stron), stanowi najobszerniejszą i zarazem najważniejszą część całej rozprawy doktorskiej. To właśnie tutaj Autor przedstawia wyniki przeprowadzonych badań, dokonuje ich interpretacji oraz weryfikuje przyjęte założenia metodyczne i badawcze. Z uwagi na empiryczny charakter pracy, rozdział ten pełni rolę centralną – to tutaj wiedza teoretyczna i metodyczna, przedstawiona we wcześniejszych częściach, znajduje swoje praktyczne zastosowanie i potwierdzenie. Struktura rozdziału została przejrzysta i funkcjonalnie zaprojektowana – Autor konsekwentnie prowadzi czytelnika przez kolejne etapy opracowania autorskiej metody oceny degradacji mikroplastiku, jej konstrukcji, walidacji oraz zastosowania analitycznego.

Tą część pracy otwiera algorytm drzew decyzyjnych w badaniu degradacji powierzchni mikroplastiku jako element metody badawczej, w którym Autor prezentuje innowacyjne podejście do oceny stanu degradacji mikroplastiku. Zaproponowany przez niego algorytm w postaci drzewa decyzyjnego stanowi próbę zautomatyzowania i zobiektywizowania procesu oceny wizualnej cząstek mikroplastiku. Drzewo decyzyjne skonstruowano na podstawie szeregu parametrów jakościowych, takich jak: chropowatość powierzchni, obecność biofilmu, pęknięcia, ubytki czy zmiana nasycenia koloru. Cechą charakterystyczną tej metody jest możliwość uwzględnienia wielu cech równocześnie w procesie klasyfikacyjnym, co nadaje procedurze charakter ekspercki i pozwala wyeliminować subiektywność oceny.

W dalszej części Doktorant szczegółowo omawia strukturę i funkcjonowanie opracowanego narzędzia diagnostycznego, stanowiącego trzon metodyki oceny degradacji mikroplastiku.

Narzędzie to zbudowane zostało w formie arkusza kalkulacyjnego Excel, podzielonego na szereg współzależnych plików (arkuszy tematycznych), które stanowią kompleksowy system gromadzenia, porządkowania i przetwarzania danych empirycznych. Każdy z arkuszy odpowiada konkretnemu aspektowi oceny – zarówno fizycznej, jak i chemicznej – a całość umożliwia przeprowadzenie oceny złożonej próbki w sposób obiektywny i powtarzalny.

Autor opisuje również arkusz danych oceny wizualnej, w którym zebrano parametry takie jak intensywność koloru, przejrzystość, obecność spękań czy biofilmu. Każdy parametr otrzymuje przypisaną wagę i ocenę punktową. Wśród elementów opracowanego narzędzia analitycznego znalazł się m.in. arkusz oceny stopnia pokrycia powierzchni mikroplastiku przez biofilm, pozwalający uwzględnić obecność i rozległość kolonii mikroorganizmów jako istotnego wskaźnika środowiskowej degradacji. W odrębnym zestawie danych zawarto informacje dotyczące cech technicznych i środowiskowych cząstek, takich jak miejsce poboru, warunki ekspozycji czy typ materiału. Kolejne arkusze koncentrują się na analizie dwóch kluczowych zmiennych fizycznych – kształtu oraz nasycenia koloru – które, jak wykazano w toku badań, wykazują wyraźny związek z zaawansowaniem procesów degradacyjnych. Uwzględniono również odporność cząstek na ścieranie i uszkodzenia mechaniczne oraz wartości empiryczne nacisku i tarcia, uzyskane w toku testów wytrzymałościowych. Zestawienia wyników cząstkowych dla poszczególnych próbek umożliwiły syntetyczną ocenę ich stanu, natomiast końcowy arkusz wyników stanowił podstawę do przypisania badanych cząstek do jednej z kategorii degradacyjnych w ramach przyjętego modelu klasyfikacyjnego.

Dodatkowo Autor przeprowadza krytyczną ocenę opracowanej przez siebie metody, porównując jej wyniki z obserwacjami eksperckimi oraz danymi pochodzącymi z niezależnych źródeł. Wskazuje na wysoką korelację pomiędzy oceną automatyczną a subiektywną oceną specjalisty, co potwierdza trafność zastosowanego algorytmu. Walidacja została przeprowadzona z wykorzystaniem próbki referencyjnej oraz procedury testowania niezależnych zmiennych, co dowodzi rzetelności i funkcjonalności narzędzia.

Uwzględniona w pracy analiza statystyczna badanych próbek mikroplastiku pod względem dopasowania widma FTIR, stanowi rozwinięcie analizy chemicznej przeprowadzonej wcześniej w rozdziale 7. Autor dokonuje tu oceny jakości dopasowania uzyskanych widm absorpcyjnych do referencyjnych baz danych FTIR. Zastosowano metody statystyczne, takie jak korelacja krzyżowa i analiza podobieństwa, w celu określenia stopnia zgodności materiału próbki z wzorcem. Wysoka zgodność analizowanych próbek z konkretnymi typami tworzyw (np. PET, PE-HD, PS) pozwoliła jednoznacznie zidentyfikować strukturę polimerową i powiązać ją z oceną degradacji.

Kończąc opis wyników badań, Autor dokonuje syntezy wszystkich wcześniej zgromadzonych danych i przedstawia jakościowo-ilościową ocenę stanu degradacji mikroplastiku pozyskanego z morskiego pasa nadbrzeżnego. Analizie poddano ponad 150 próbek, które zostały zaklasyfikowane do trzech głównych kategorii: cząstki świeże (niskiego stopnia degradacji), średnio zdegradowane oraz cząstki silnie zdegradowane. Wyniki wskazują na wyraźne różnice w poziomie degradacji w zależności od rodzaju materiału, ekspozycji na promieniowanie UV, obecności biofilmu oraz intensywności procesów mechanicznych (np. ścierania). Zidentyfikowano również korelacje pomiędzy parametrami fizycznymi (np. utrata koloru, obecność pęknięć) a chemicznymi (np. zmiany w pasmach FTIR), co potwierdza skuteczność opracowanego systemu oceny.

Rozdział ósmy jest wyraźnie autorskim wkładem mgr Kamila Majewskiego w rozwój badań nad mikroplastikiem. Stanowi on nie tylko przegląd wyników, ale przede wszystkim prezentację i implementację nowatorskiego narzędzia diagnostycznego o potencjale praktycznym i aplikacyjnym. Zastosowana metodyka jest przejrzysta, powtarzalna i otwarta na rozwój, co czyni z niej wartościowe rozwiązanie dla przyszłych badań środowiskowych i technologii oceny zanieczyszczenia mikroplastikiem w strefach przybrzeżnych.

Rozdział dziewiąty rozprawy doktorskiej mgr Kamila Artura Majewskiego pełni funkcję końcowej syntezy wyników badań, a zarazem stanowi odniesienie do wcześniej postawionych w pracy tez i hipotez. Autor, konsekwentnie trzymając się logiki naukowej argumentacji, dokonuje oceny skuteczności zaproponowanej przez siebie metody badawczej, weryfikuje przyjęte założenia oraz wskazuje kierunki dalszych badań. Wnioski mają nie tylko charakter syntetyczny, ale są również mocno zakotwiczone w materiale empirycznym, co czyni je przekonującymi i naukowo wiarygodnymi.

Ocena merytoryczna pracy

Rozprawa doktorska mgr Kamila Artura Majewskiego pt. *„Opracowanie metody badawczej do oceny degradacji mikroplastiku z pasa nadbrzeżnego Morza Bałtyckiego”* dotyczy jednego z najbardziej aktualnych i dynamicznie rozwijających się obszarów badań środowiskowych – oceny obecności, charakterystyki oraz procesów degradacyjnych mikroplastiku w środowiskach wodnych, ze szczególnym uwzględnieniem strefy przybrzeżnej. Tematyka ta, wpisująca się w światowy dyskurs naukowy i legislacyjny dotyczący wpływu zanieczyszczeń plastikiem na ekosystemy morskie, zdrowie publiczne oraz gospodarkę, nabiera szczególnego znaczenia w kontekście potrzeby opracowania nowych narzędzi analitycznych i

metod oceny ryzyka ekologicznego. Praca stanowi odpowiedź na te wyzwania, oferując kompleksowe i innowacyjne podejście badawcze o wysokiej wartości praktycznej i poznawczej.

Pod względem merytorycznym rozprawa prezentuje wysoki poziom naukowy, zarówno w zakresie przeglądu literatury i trafnie sformułowanych problemów badawczych, jak i w odniesieniu do metodologii, doboru technik analitycznych oraz oryginalnego podejścia do oceny degradacji mikroplastiku.

Szczególnym atutem pracy jest wyraźnie zaznaczona interdyscyplinarność, która stanowi o jej nowoczesnym i kompleksowym charakterze. Autor z powodzeniem łączy podejścia i narzędzia badawcze wywodzące się z różnych dziedzin – od inżynierii środowiska i chemii analitycznej, przez ekotoksykologię, aż po analizę danych i metody klasyfikacji eksperckiej. W ramach jednego spójnego modelu badawczego zintegrowano metody klasyczne (np. mikroskopia optyczna), instrumentalne (spektroskopia FTIR i Ramana), elementy oceny wizualnej oraz metody ilościowej analizy danych (np. punktacja wagowa, arkusze kalkulacyjne, algorytmy decyzyjne). Takie podejście pozwala nie tylko na wieloaspektową charakterystykę mikroplastiku, ale również na jego ocenę w kontekście dynamicznych procesów degradacyjnych, zachodzących pod wpływem warunków środowiskowych. **Opracowane przez doktoranta autorskie narzędzie – system zintegrowanych arkuszy kalkulacyjnych wspomagany algorytmem drzewa decyzyjnego – stanowi nowatorską propozycję w zakresie oceny stanu degradacji mikroplastiku w warunkach terenowych i laboratoryjnych, będąc jednocześnie praktyczną realizacją idei integracji wiedzy i metod z różnych obszarów nauki.**

Jednym z najważniejszych osiągnięć pracy jest rozwinięcie procedury pozwalającej na ilościową i jakościową ocenę cząstek mikroplastiku z uwzględnieniem cech wizualnych, morfologicznych oraz parametrów fizycznych i chemicznych. Autor zaprojektował złożony, lecz przejrzysty system diagnostyczny, umożliwiający przypisanie badanym cząstkom poziomu degradacji na podstawie zestawu jednoznacznych kryteriów. Każda próbka mikroplastiku poddana została wieloparametrowej analizie, w której oceniano m.in. nasycenie koloru, przejrzystość, obecność i rozległość biofilmu, chropowatość powierzchni, spękania oraz uszkodzenia mechaniczne wynikające z procesów fizycznych i chemicznych. Cechy te, mimo że w części mają charakter subiektywny, zostały przez Doktoranta z powodzeniem przekształcone w mierzalne wskaźniki punktowe, dzięki zastosowaniu logicznego algorytmu decyzyjnego oraz przypisaniu wag diagnostycznych do każdej zmiennej.

Wprowadzenie punktowej oceny stopnia degradacji, opartej na systemie wag i progów klasyfikacyjnych, świadczy o wysokim poziomie precyzji koncepcyjnej i praktycznej użyteczności proponowanego narzędzia. Dzięki takiemu podejściu możliwe jest nie tylko porównywanie próbek pochodzących z różnych lokalizacji, ale również śledzenie dynamiki degradacji w czasie w warunkach kontrolowanych bądź środowiskowych. Autor zapewnił elastyczność narzędzia, umożliwiając jego dalszy rozwój i adaptację do innych typów środowisk lub rodzajów polimerów. Równocześnie zastosowanie zaawansowanych metod spektroskopowych – FTIR (Fourier Transform Infrared Spectroscopy) oraz spektroskopii Ramana – jako narzędzi walidujących ocenę degradacyjną dodatkowo zwiększa wiarygodność i kompleksowość podejścia. Autor wykazał, że zmiany w strukturze chemicznej cząstek mikroplastiku, takie jak utlenianie, hydroliza czy depolimeryzacja, prowadzą do pojawienia się lub zaniku charakterystycznych pasm widmowych, co stanowi bezpośredni dowód zachodzących procesów degradacyjnych. Analiza widm FTIR umożliwiła wykrycie powstawania grup funkcyjnych, takich jak grupy karbonylowe (C=O) czy hydroksylowe (–OH), typowych dla utlenionych poliolefin, natomiast spektroskopia Ramana okazała się szczególnie przydatna w przypadkach próbek o skomplikowanej powierzchni, pokrytych biofilmem lub osadami mineralnymi.

Na uwagę zasługuje również sam proces konstrukcji metody badawczej – doktorant z dużą świadomością naukową przeprowadził analizę kryteriów klasyfikacyjnych mikroplastiku (rozdział 2), charakterystykę materiałów polimerowych pod kątem ich podatności na degradację (rozdział 3), a także rzetelnie opracował etapy poboru próbek oraz ich analizy w warunkach laboratoryjnych (rozdziały 4–7). **Każdy z tych etapów został zaplanowany w sposób przemyślany i oparty na obowiązujących standardach naukowych oraz dobrych praktykach badawczych.** W pracy zwraca uwagę precyzyjne zdefiniowanie zmiennych, jednoznaczne określenie warunków eksperymentalnych, a także spójność pomiędzy poziomem teoretycznym a wykonanym doświadczeniem terenowym i laboratoryjnym.

Etap poboru próbek został przeprowadzony zgodnie z rygorystycznymi zasadami zapewniającymi reprezentatywność materiału badawczego oraz minimalizującymi ryzyko kontaminacji – co w przypadku analiz mikroplastiku stanowi jedno z podstawowych wyzwań metodologicznych. Doktorant określił precyzyjnie lokalizacje referencyjne, opracował procedurę przygotowania, transportu i przechowywania próbek, a także zapewnił powtarzalność pomiarów, co stanowi mocny fundament całego eksperymentu. W rozdziałach poświęconych metodyce laboratoryjnej Autor wykazał się wysoką kompetencją w obsłudze

nowoczesnych technik analitycznych – zarówno mikroskopowych, jak i spektroskopowych – i potrafił trafnie dobrać metody do rodzaju analizowanych materiałów.

Całość procesu badawczego została podporządkowana logicznemu celowi – walidacji opracowanego narzędzia diagnostycznego. Konsekwencja metodologiczna, obecna w każdym fragmencie pracy, wzmacnia jej wiarygodność i pozwala uznać zaproponowaną procedurę za solidną podstawę do dalszych badań aplikacyjnych. Dodatkowym atutem jest fakt, że autor zadbał nie tylko o walidację wewnętrzną (zgodność danych w obrębie poszczególnych metod), ale także o walidację zewnętrzną – porównując wyniki z uzyskanymi w innych badaniach i z literaturą przedmiotu.

Najważniejszym elementem recenzowanej rozprawy, decydującym o jej oryginalności naukowej i wartości poznawczej, jest niewątpliwie opracowanie autorskiego narzędzia badawczego umożliwiającego kompleksową ocenę stopnia degradacji mikroplastiku w środowisku przybrzeżnym. To właśnie ta część pracy stanowi jej rdzeń innowacyjny i największy wkład Autora w rozwój badań nad zanieczyszczeniem tworzywami sztucznymi. **Opracowane narzędzie ma charakter zintegrowany** – łączy w sobie różne podejścia analityczne (wizualne, morfologiczne, fizyczne i chemiczne) oraz wykorzystuje algorytm drzewa decyzyjnego do przypisania próbek do odpowiednich kategorii degradacyjnych. **Zaletą tego podejścia jest nie tylko jego spójność i możliwość adaptacji do różnych warunków środowiskowych, lecz przede wszystkim jego funkcjonalność i praktyczna przydatność.**

W odróżnieniu od dotychczasowych metod, które często ograniczały się do wycinkowej analizy pojedynczych aspektów mikroplastiku, Autor zaproponował procedurę umożliwiającą jego całościową charakterystykę w sposób ilościowy, porównywalny i standaryzowany. Punktowy system oceny, wspierany przez ustrukturyzowaną analizę danych w arkuszach kalkulacyjnych, pozwala na systematyczne gromadzenie, przetwarzanie i klasyfikację wyników, co otwiera drogę do wdrożenia tego rozwiązania w szerszej praktyce badawczej, a w przyszłości również w systemach monitoringu środowiskowego.

Nowość proponowanej metody polega nie tylko na jej konstrukcji formalnej, ale również na filozofii podejścia badawczego – integrującego dane o charakterze jakościowym (np. zmiany wizualne powierzchni cząstek) z analizami instrumentalnymi (np. widma FTIR i Ramana). Takie połączenie stanowi odpowiedź na jedno z najważniejszych wyzwań w badaniach nad mikroplastikiem: stworzenie narzędzia, które byłoby zarówno czułe i precyzyjne, jak i dostępne, skalowalne oraz możliwe do wdrożenia poza warunkami wysoce

specjalistycznych laboratoriów. W kontekście dynamicznie rozwijającej się dziedziny, jaką jest ocena zagrożeń wynikających z obecności mikroplastiku w środowisku, wkład mgr Majewskiego należy uznać za znaczący i oryginalny.

Oceniając rozprawę doktorską w zakresie kryteriów merytorycznych i metodycznych stwierdzam, że recenzowana praca dotyczy ważnego środowiskowo zagadnienia. Wybór tematu pracy należy uznać za właściwy głównie ze względów aplikacyjnych. Koncepcja realizacji badań jest oryginalna i stanowi osiągnięcie własne Doktoranta. Analiza wyników oraz podsumowanie zostały oparte o obszerny materiał badawczy świadczący o dobrej znajomości zagadnień związanych zarówno z obecnością mikroplastiku jak i zagadnieniami systemu oceny i klasyfikacji danych, a także umiejętności interpretacji uzyskanych wyników.

Pomimo wysokiego poziomu merytorycznego rozprawy, zasadnym jest zgłoszenie kilku uwag, które nie wpływają istotnie na ogólną ocenę pracy, lecz wymagają komentarza Autora i – w miarę możliwości – uzupełnienia np. w przyszłych publikacjach.

1. W kilku fragmentach pracy zauważalne są drobne niekonsekwencje redakcyjne i językowe. Dotyczy to głównie zróżnicowanego sposobu zapisu nazw jednostek, nie zawsze konsekwentnego stosowania symboli chemicznych oraz miejscami zbyt długich zdań, które mogą utrudniać zrozumienie kontekstu, zwłaszcza w części metodologicznej (rozdziały 6 i 7).
2. W kilku miejscach brakuje także odniesień bibliograficznych, tam, gdzie Autor przytacza dane literaturowe lub ogólne sformułowania wymagające poparcia źródłowego (np. we wstępie i opisie cech fizykochemicznych mikroplastiku).
3. Metodologiczna część pracy dotycząca pomiarów mechanicznej odporności próbek (np. tarcie, ścieranie, wytrzymałość na nacisk) została opisana dosyć ogólnie. W arkuszu „SIŁY_MECHANICZNE” podano wartości liczbowe (np. 10, 20, 30), ale nie sprecyzowano jednostek.
4. Proszę o wyjaśnienie w zakresie charakterystyki statystycznej uzyskanych danych. Choć autor odnosi się do zgodności wyników, korelacji i walidacji metody, nie przedstawił wskaźników błędu, przedziałów ufności, czy testów istotności statystycznej, które mogłaby znacząco wzmocnić dowodowy charakter wyników, choć z uwagi na inżynierski profil pracy nie jest to wymóg krytyczny.

5. Proszę też by Autor zastanowił się nad ograniczeniami zastosowanej metody – zarówno natury technicznej (np. możliwy wpływ biofilmu na błędy w analizie FTIR), jak i organizacyjnej (np. dostępność sprzętu, czasochłonność analizy dużych zbiorów danych). Autor wspomina o potencjale adaptacyjnym metody, lecz nie analizuje barier, które mogą pojawić się przy jej wdrażaniu w praktyce lub w różnych warunkach geograficznych.

4. Wniosek końcowy

Recenzowana rozprawa mgr Kamila Artura Majewskiego pt. *„Opracowanie metody badawczej do oceny degradacji mikroplastiku z pasa nadbrzeżnego Morza Bałtyckiego”* stanowi wartościowy i oryginalny wkład w rozwój interdyscyplinarnych badań nad problemem zanieczyszczenia środowiska morskiego mikroplastikiem. Autor wykazał się wysokim poziomem kompetencji badawczych, umiejętnością samodzielnego formułowania i rozwiązywania problemów naukowych, a także zdolnością do tworzenia narzędzi badawczych o charakterze aplikacyjnym. Opracowana przez doktoranta metoda diagnostyczna, integrująca ocenę wizualną, fizyczną i chemiczną próbek mikroplastiku, cechuje się nowatorskim podejściem, wysokim potencjałem wdrożeniowym oraz dużą wartością poznawczą.

Stwierdzam, że rozprawa doktorska Pana mgr Kamila Artura Majewskiego pt. „Opracowanie metody badawczej do oceny degradacji mikroplastiku z pasa nadbrzeżnego Morza Bałtyckiego” spełnia wymagania formalne w odniesieniu do prac doktorskich, odpowiada wymogom Ustawy Prawo o szkolnictwie wyższym Dz. U. 2023 poz. 212 z z dnia 13 stycznia 2023 zmieniającą Ustawę Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce z dnia 20 lipca 2018 r. oraz Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2022 r. poz. 574, z późn.zm.), Rozporządzeniem Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodzie doktorskim, w przewodzie habilitacyjnym oraz w postępowaniu o nadanie tytułu profesora z dnia 19 stycznia 2018 (Dz.U. z 2018 r. poz.261). Została przygotowana samodzielnie, posiada walory oryginalności naukowej, zawiera istotne znaczenie dla rozwoju dyscypliny naukowej inżynieria środowiska górnictwo i energetyka oraz jest oparta na poprawnie zaprojektowanej i przeprowadzonej procedurze badawczej.

W związku z powyższym wnoszę przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie Pana mgr Kamila Artura Majewskiego do dalszych etapów postępowania przewidzianego w przewodzie doktorskim.

Łone Stodko

