



Politechnika Łódzka

Instytut Inżynierii Materiałowej

Łódź, dn. 30.09.2025 r.

Dr hab. inż. Dorota Bociąga, prof. uczelni
Zakład Inżynierii Biomedycznej i Materiałów Funkcjonalnych
Instytut Inżynierii Materiałowej
Wydział Mechaniczny Politechniki Łódzkiej

Recenzja rozprawy doktorskiej

mgr inż. Magdaleny Bańkosz

pt. „Badania nad opracowaniem biomateriałów kompozytowych do zastosowań w inżynierii i w chirurgii”

Promotor rozprawy: **dr hab. inż. Bożena Tyliszcza, prof. PK**

Promotor pomocniczy: **dr inż. Dariusz Mierzwiński**

Niniejsza recenzja została wykonana na skutek powołania przez

Radę Naukową Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej
uchwałą z dnia 9 lipca 2025 r.

ul. Stefanowskiego 1/15 90-537 Łódź
tel. +48 42 631-30-30, w1i11@adm.p.lodz.pl

Adres do korespondencji:
ul. Żeromskiego 116, 90-924 Łódź



1. UWAGI OGÓLNE O TEMATYCE ROZPRAWY

1.1. Znaczenie problematyki podjętej w recenzowanej rozprawie

Recenzowana rozprawa doktorska pt. *„Badania nad opracowaniem biomateriałów kompozytowych do zastosowań w inżynierii i w chirurgii”* Pani mgr inż. Magdaleny Bańkosz bardzo dobrze wpisuje się w opracowania naukowe stanowiące próbę sprostania wyzwaniom takim jak starzenie się społeczeństwa i wzrost zachorowań na choroby układu kostnego, potrzebę terapii spersonalizowanej oraz profilaktykę infekcji okołowszczepowych, które są poważnym problemem w implantologii. Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój biomateriałów. Dotyka ona bowiem kilku bardzo ważnych aspektów, które wpływają na ich stosowalność, funkcjonalność i możliwość indywidualnego podejścia do pacjenta, mianowicie projektowanie kompozytów ceramiczno-polimerowych, które łączą bioaktywność hydroksyapatytu z elastycznością polimerów, modyfikacje kolagenem i antybiotykami, które zwiększają funkcjonalność materiałów, jak również zastosowanie kompleksowych metod syntezy i charakterystyki, co pozwala na precyzyjne dostosowanie właściwości materiałów do potrzeb klinicznych. Opracowane i opisane przez Doktorantkę materiały mają realny potencjał wdrożeniowy. Mogą być one bowiem stosowane jako rusztowania dla regeneracji kości, jako nośniki substancji bioaktywnych (np. antybiotyków), jako tymczasowe wypełnienia ubytków kostnych, wspierające proces gojenia. Zakres niniejszej rozprawy doktorskiej łączy inżynierię materiałową, biotechnologię, medycynę regeneracyjną i mikrobiologię a tym samym wpisuje się w nurt badań nad inteligentnymi biomateriałami, które reagują na środowisko biologiczne i wspierają procesy regeneracyjne. Zaproponowane kompozyty zostały zaprojektowane tak, by jednocześnie wspierać regenerację tkanki kostnej, wykazywać bioaktywność i biogodność i posiadać odpowiednią wytrzymałość mechaniczną. To podejście łączy wymagania biologiczne i inżynierskie w jednym materiale, co jest trudne do osiągnięcia i świadczy o wysokim poziomie świadomości badawczej i aplikacyjnej Doktorantki.

W związku z powyższym, podjęte przez Doktorantkę badania uważam za wysoce uzasadnione, wpisujące się w obecne trendy naukowe związane z rozwojem biomateriałów i niosące realne korzyści w zastosowaniach inżynierskich i biomedycznych.

1.2. Hipoteza badawcza i cel rozprawy

Na podstawie analizy stanu wiedzy Doktorantka sformułowała następującą tezę naukową: *„Odpowiednio zaprojektowane biomateriały kompozytowe, zawierające fazę ceramiczną oraz fazę polimerową modyfikowaną bioaktywnymi dodatkami, mogą stanowić skuteczne rozwiązanie dla inżynierii i chirurgii regeneracyjnej. Ich właściwości fizykochemiczne, mechaniczne i biologiczne można kształtować poprzez dobór składu i struktury na etapie syntezy. W rezultacie można uzyskać materiały wspomagające regenerację tkanki kostnej oraz minimalizujące ryzyko infekcji, odpowiadające aktualnym wyzwaniom klinicznym związanym z leczeniem osteoporozy i ubytków kostnych.”*

W odniesieniu do powyższej tezy podstawowym **celem naukowym** rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Bańkosz stało się *„opracowanie oraz charakterystyka bioaktywnych materiałów kompozytowych opartych na hydroksyapatycie i wybranych polimerach naturalnych oraz syntetycznych, przeznaczonych do zastosowań w inżynierii tkanki kostnej”*.

Doktorantka sformułowała również **cel użyteczny** swojej pracy jako: „*identyfikacja takiej kompozycji materiałowej, która może być wykorzystana jako:*

- *tymczasowe wypełnienie ubytków kostnych wspierające regenerację,*
- *lub/i rusztowanie do tworzenia nowej tkanki kostnej,*
- *lub/i nośnik substancji bioaktywnych (np. antybiotyków), umożliwiające ich kontrolowane uwalnianie w miejscu implantacji”.*

Aby osiągnąć cele pracy, a tym samym udowodnić tezę, Doktorantka zaproponowała i zrealizowała obszerny, dobrze przemyślany i uzasadniony plan badawczy, do realizacji którego zastosowała różnorodne techniki z zakresu analizy materiału, jego właściwości mechanicznych, jak i odpowiedzi biologicznej.

Podsumowując, tematyka rozprawy jest bardzo aktualna i atrakcyjna zarówno z naukowego, jak i aplikacyjnego punktu widzenia. Doktorantka jasno przedstawiła tezę naukową oraz naukowy i użyteczny cel pracy, zaproponowała koncepcję jego rozwiązania i szeroki zakres analiz, które pozwoliły jej potwierdzić postawioną tezę i zaproponować rozwiązanie w postaci „*kompozytu, który spełnia kryteria biogodności, bioaktywności i odpowiednich parametrów aplikacyjnych, co czyni go kandydatem do wdrożenia w obszarze medycyny regeneracyjnej*”.

2. FORMALNA STRONA ROZPRAWY

2.1. Struktura rozprawy i wykorzystana literatura

Recenzowana rozprawa liczy 226 stron. Jest napisana w języku polskim i podzielona na 12 głównych rozdziałów. Układ pracy jest przejrzysty a treści kolejnych rozdziałów i podrozdziałów są dobrze przemyślane, właściwie rozdzielone i stanowią o jej czytelności.

Pracę rozpoczyna wykaz najważniejszych skrótów, po których następuje „Wprowadzenie”, jako rozdział 1. Rozdział 2, „Analiza stanu zagadnienia”, został podzielony na 4 podrozdziały, mianowicie: 2.1. „Biomateriały”, 2.2. „Interakcje biomateriałów z tkanką biologiczną”, 2.3. „Hydroksyapatyt”, 2.4. „Kompozyty ceramiczno-polimerowe”. Całość tego przeglądu literatury zawiera się na 32 stronach i opiera na 154 pozycjach literatury. Rozdział 3. „Uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej” podsumowuje stan wiedzy a jednocześnie jest punktem wyjścia do postawienia tezy i określenia celu pracy opisanych w rozdziale 4. W kolejnym rozdziale (5) Doktorantka zawarła „Plan badań”, w którym znalazło się również uzasadnienie co do przyjętej struktury eksperymentu zgodnej z techniką planowania doświadczeń. Opisy poświęcone metodykom zrealizowanych badań (rozdział 7) poprzedza „Charakterystyka wykorzystywanych reagentów” (rozdział 6). Rozdział 8 rozpoczyna najobszerniejszą część pracy, którą Doktorantka ujęła pod wspólnym tytułem „Wyniki badań i dyskusja” a która mieści się na 123 stronach i jest podzielona na 4 części: „Część I - Synteza i charakterystyka fazy ceramicznej” (rozdział 8), „Część II - synteza i charakterystyka materiałów kompozytowych” (rozdział 9), „Część III - modyfikacja materiałów kompozytowych kolagenem” (rozdział 10), „Część IV - modyfikacja materiałów kompozytowych antybiotykiem” (rozdział 11). Każda z tych części pracy ma swoje własne podsumowanie a niezależnie od tego w rozdziale 12 ujęte zostały wszystkie „Wnioski końcowe”. Po wnioskach znajduje się: streszczenie w języku polskim, streszczenie w języku angielskim, spis literatury (łącznie 310 pozycji), spis 23 tabel oraz spis 100 rysunków. Pracę kończy wykaz imponującego dorobku naukowego Doktorantki – 54 publikacje naukowe (w tym 12 jako pierwszy autor) o zasięgu krajowym oraz międzynarodowym, których sumaryczny IF wynosi 149,097, udział w 5 projektach badawczych, 5 zgłoszeń patentowych, staże naukowe,

dydaktyczne i przemysłowe w Polsce i zagranicą, wystąpienia ustne i posterowe na 37 konferencjach, liczne nagrody i wyróżnienia oraz ukończone kursy i szkolenia.

Większość cytowanej literatury pochodzi z ostatniego dziesięciolecia i są to głównie publikacje z czasopism naukowych o zasięgu międzynarodowym. Liczba przeanalizowanych publikacji, bardzo trafny ich dobór, jak i wartość merytoryczna wykorzystanego materiału świadczą o swobodzie poruszania się przez Doktorantkę w fachowej literaturze naukowej.

2.2. Język i formalna strona rozprawy

Rozprawa została napisana językiem formalnym, z zachowaniem podstawowych zasad typografii zgodnych z akademickimi standardami. Opisy ujęte są w sposób zwięzły, fachowy i komunikatywny, sformułowania precyzyjne a specjalistyczna terminologia obejmuje zakres inżynierii materiałowej, chemii, biologii i medycyny. Tekst jest logicznie uporządkowany, z wyraźnym podziałem na rozdziały, podrozdziały i sekcje tematyczne. Praca jest napisana w sposób bardzo staranny pod kątem edycyjnym. Brak w niej powtórzeń, pomyłki w postaci przejęczyń, czy innych podobnych uchybień, które zazwyczaj wkradają się do tak obszernych opisów, zostały przez Doktorantkę bardzo skrupulatnie wyeliminowane. Pojedyncze literowe omyłki (na str. 19 „fibryonektyna”, str. 102 „Obserwacje to wskazują na...”, str. 122 „... kolagenu w złożonych układach biomateriałowych, co spójność uzyskanych wyników z danymi literaturowymi”, str. 141 „wprowadzenie kolagen”, str. 176 „... modyfikacja kolagenem istotnie zwiększyła ich właściwości hydrofilowe kompozytów”, str. 178 „... aureus.”) to coś, co zdarza się nawet w recenzowanych opublikowanych opracowaniach naukowych. Wypowiedzi są wyważone, pozbawione emocjonalnych ocen a wnioski są oparte na danych eksperymentalnych i literaturze. Całościowy odbiór rozprawy od strony językowej i edytorskiej jest bardzo dobry.

3. OCENA MERYTORYCZNA

Część dotycząca analizy stanu zagadnienia w recenzowanej rozprawie doktorskiej została przeprowadzona poprawnie i zawiera wszystkie istotne elementy. Obejmuje definicje i klasyfikacje biomateriałów (naturalne, syntetyczne, kompozytowe), właściwości fizykochemiczne i biologiczne biomateriałów (biogodność, bioaktywność, porowatość, degradacja), interakcje biomateriałów z tkanką biologiczną, w tym fazy odpowiedzi komórkowej, charakterystykę hydroksyapatytu jako kluczowego składnika fazy ceramicznej, metody jego syntezy i modyfikacji (jonami metali, kolagenem, antybiotykami). Jest również rozdział poświęcony kompozytom ceramiczno-polimerowym, jako nowoczesnych rozwiązań w inżynierii tkankowej. W uzasadnieniu podjęcia tematyki badawczej Doktorantka wskazuje na rosnące potrzeby medycyny regeneracyjnej, starzenie się społeczeństwa i wzrost zachorowań na osteoporozę i ostatecznie – konieczność opracowania materiałów bioaktywnych, biodegradowalnych i spersonalizowanych, które będą odpowiedzią na te potrzeby. Na podstawie analizy stanu wiedzy Doktorantka sformułowała jasną tezę naukową. Jej uzasadnienie jest spójne z wcześniejszą analizą literatury i wyraźnie pokazuje, że temat pracy odpowiada na realne potrzeby kliniczne i materiałowe.

Podsumowując, analiza stanu zagadnienia jest kompletna, aktualna i interdyscyplinarna. Napisana w sposób precyzyjny, dobrze podparta literaturą i z jasno określonym przekazem w danym obszarze badawczym. Uzasadnienie wyboru tematu jest spójne z przeglądem literatury i dobrze osadzone w kontekście społecznym i klinicznym. Teza naukowa i cele pracy zostały jasno

sformułowane i wynikają bezpośrednio z analizy. Praca spełnia wszelkie standardy merytoryczne i formalne.

Doktorantka zaproponowała wieloetapową i usystematyzowaną strukturę swoich badań składającą się z czterech etapów, które określiła jako:

Część I: synteza i charakterystyka fazy ceramicznej (hydroksyapatyt),

Część II: synteza i charakterystyka materiałów kompozytowych,

Część III: modyfikacja materiałów kompozytowych kolagenem,

Część IV: modyfikacja materiałów kompozytowych antybiotykiem (klindamycyną).

Części te zostały opisane w kolejnych rozdziałach pracy (8, 9, 10, 11) i stanowią **część doświadczalną** pracy. Każdy etap został szczegółowo zaplanowany z uwzględnieniem klasyfikacji czynników eksperymentalnych (wejściowych, wyjściowych, stałych i zakłócających), co zapewniło przejrzystość procesu badawczego i wysoką kontrolę nad zmiennymi.

Doktorantka zaproponowała sposób wytwarzania fazy ceramicznej w postaci metody mokrej precypitacji optymalizując warunki reakcji pod kątem czystości fazowej, struktury porowatej oraz biogodności. Następnie opracowała kompozyty ceramiczno-polimerowe zawierające hydroksyapatyt oraz PVP (poliwinylopirolidon) i PVA (alkohol poliwinylowy), aby uzyskać efekt uelastycznienia materiału i możliwość funkcjonalizacji. Wprowadzenie kolagenu miało na celu poprawę właściwości powierzchniowych i mechanicznych a dodatek antybiotyku w postaci klindamycyny zapewnić materiałom aktywność przeciwdrobnoustrojową. To podejście odpowiada na realne potrzeby kliniczne związane z infekcjami okołowszczepowymi i jest zgodne z trendem tworzenia inteligentnych biomateriałów. Dodatkowo, Doktorantka nie tylko dobiera składniki pod kątem efektywności, ale także bierze pod uwagę zużycie surowców i odpadów (na etapie typowania próbek), co wpisuje się w zrównoważony rozwój technologii materiałowych.

Na uznanie i podkreślenie zasługuje fakt, że badania przeprowadzone przez mgr inż. Magdalenę Bańkosz prowadzone były w sposób przemyślany, z etapową eliminacją rozwiązań materiałowych nie spełniających założonych parametrów i założeń funkcjonalnych, które mogą mieć potencjał aplikacyjny.

Do doświadczalnej części rozprawy mam następujące pytania:

1. Opracowaną formułację PVP/PVA z dodatkiem 10% HAp poddawano analizie sorpcyjnej w różnych mediach wskazując na poprawę odporności na degradację - wszystkie próbki utrzymały integralność strukturalną przez 72h inkubacji w wodzie destylowanej, SBF, płynie Ringera. Badanie cytotoksyczności wykonywane zgodnie z normą ISO 10993 – cz. 5:2009 prowadzi się poprzez ekstrakcję przez 24h w pełnym medium hodowlanym (bez antybiotyków). W jaki sposób wykonano ekstrakcję w niniejszym badaniu i czy zdaniem Doktorantki inne medium oraz dłuższy czas ekstrakcji mogłyby przynieść efekt w postaci innych wyników, skoro integralność strukturalna była zachowana przez 72h?
2. W tomografii komputerowej wykazano, że sieciowanie materiału nie jest równomierne w przekroju – w górnej strefie próbki liczba porów była mniejsza. Czy Doktorantka uznałaby za przydatne i zasadne wykonanie badania wpływu intensywności UV, czasu naświetlania czy też grubości próbki na ten efekt?
3. W części dotyczącej modyfikacji kolagenem Doktorantka zauważyła, że jego dodatek zmniejsza wytrzymałość na rozciąganie, ale jednocześnie zwiększa elastyczność. Jakie wartości

graniczne pozwoliłyby ocenić, czy uzyskane parametry są wystarczające np. dla rusztowań kostnych?

4. W badaniach uwalniania kolagenu i klindamycyny zastosowano prawdopodobnie pH fizjologiczne. Po implantacji materiały często pracują w środowisku zapalnym, gdzie pH może być niższe. Poproszę Doktorantkę o słowo komentarza, co do możliwości oceny skuteczności terapeutycznej materiału w realnych warunkach klinicznych.
5. Dla opracowywanych materiałów charakterystycznym jest, że jednocześnie współistnieją dla nich procesy sorpcji, pęcznienia i degradacji matrycy polimerowej, a tym samym uwalniania z niej kolagenu. Czy i jaki mogły mieć one wpływ na wyniki uwalniania antybiotyku oraz ocenę właściwości przeciwdrobnoustrojowych?
6. Mając na uwadze, że zakażenia śródoperacyjne oraz zakażenia wtórne pooperacyjne są wciąż poważnym problemem generującym liczne powikłania u pacjentów, opracowanie materiałów, które niweczą mechanizmy obronne bakterii już w miejscu implantacji, jest kluczowe dla możliwości wprowadzenia nowych rozwiązań terapeutycznych. Zdolność materiałów do zwalczania drobnoustrojów jest kluczowym elementem w dalszych zastosowaniach dla zwierząt i ludzi. Wiadomo również, że specyfika reakcji obronnych bakterii ze względu na to, czy są one gram dodatnie, czy też gram ujemne, jest inna. To też stawia wyzwania wobec materiałów, które miałyby działać przeciwdrobnoustrojowo w sposób kompleksowy. Do badania oceny tej właściwości opracowywanych materiałów Doktorantka wykorzystała w swojej pracy szczep *Staphylococcus aureus* (bakteria gram dodatnia), co jest poprawnym modelem mając na uwadze wprowadzanie antybiotyku w postaci klindamycyny. Czy i jakie inne materiały/antybiotyki można by było rozważyć do wprowadzenia do matrycy ceramiczno – polimerowej, aby materiały te były odporne również na bakterie gram ujemne i jaki wpływ na proces wytwarzania oraz właściwości miałyby te dodatkowe składowe?

4. OCENA ROZPRAWY I WNIOSKI KOŃCOWE

Podejście zaprezentowane w rozprawie doktorskiej mgr inż. Magdaleny Bańkosz jest zgodne z aktualnymi trendami w dziedzinie biomateriałów. Praca koncentruje się na projektowaniu kompozytów odpowiadającym kierunkom rozwoju materiałów do regeneracji tkanki kostnej. Uwzględnia również potrzebę tworzenia materiałów o właściwościach dostosowanych do konkretnych wskazań klinicznych, bioaktywnych, zdolnych do osteointegracji i wykazujących działanie przeciwdrobnoustrojowe. Jest to zgodne z obecnymi kierunkami opracowań materiałowych reprezentujących podejście, gdzie odchodzi się od materiałów pasywnych na rzecz bioaktywnych, które wspierają regenerację i integrację z tkanką. Godne uznania jest również podejście Doktorantki do zagadnień zielonej chemii i zrównoważonego rozwoju poprzez dobór stężenia reagentów i składników kompozytu, co zwiększa ekologiczny potencjał opracowanej technologii.

Podsumowując, podejście badawcze zaprezentowane w rozprawie doktorskiej Pani Magdaleny Bańkosz jest nie tylko zgodne z aktualnymi trendami, ale także ukierunkowane na aspekty utylitarne proponowanych rozwiązań materiałowych. Doktorantka w sposób jednoznaczny określiła problem badawczy, poprawnie sformułowała zadania naukowe, które następnie rozwiązała. Kompleksowe podejście, jakie przedstawiła Doktorantka, świadczy o jej

dojrzałości badawczej i umiejętności prowadzenia pracy naukowej. Przedstawiona rozprawa wykazuje, że mgr inż. Magdalena Bańkosz dysponuje ogólną wiedzą teoretyczną i dorobkiem o charakterze podstawowym w dyscyplinie inżynieria materiałowa a jej rozprawa doktorska pt. „*Badania nad opracowaniem biomateriałów kompozytowych do zastosowań w inżynierii i w chirurgii*” stanowi oryginalne opracowanie dotyczące rozwoju kompozytów mających potencjał wdrożenia w obszarze medycyny regeneracyjnej.

Całość pracy została bardzo starannie zredagowana, jest napisana językiem poprawnym, czytelnym i bez zbędnych powtórzeń, co stanowi o fakcie, że czyta się bardzo dobrze. Sformułowane przeze mnie uwagi i pytania w żadnym stopniu nie umniejszają mojej bardzo wysokiej oceny merytorycznej recenzowanej rozprawy. Tym bardziej, że imponujący jest wachlarz zastosowanych metod, które zrealizowano w taki sposób, że wyniki badań stanowią solidną podstawę do opracowania nowych rozwiązań materiałowych bazujących na materiałach kompozytowych, które spełniają kryteria biogodności, bioaktywności i odpowiednich parametrów aplikacyjnych.

Stwierdzam, że przedłożona mi do recenzji **rozprawa doktorska pt. „*Badania nad opracowaniem biomateriałów kompozytowych do zastosowań w inżynierii i w chirurgii*” mgr inż. Magdaleny Bańkosz** spełnia wymagania wynikające z Ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. *Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce* (Dz. U. z 2022 r. poz. 574 z późn. zm.) *Dział V Stopnie i tytuły w systemie szkolnictwa wyższego i nauki* oraz **mieści się w dyscyplinie inżynieria materiałowa**. Biorąc powyższe pod uwagę **stawiam wniosek o dopuszczenie rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Bańkosz do publicznej obrony**.

Mając na względzie kompleksowość przeprowadzonych badań, przejrzystość pracy, profesjonalny jej język, umiejętność ukierunkowania badań na wartość użyteczną ich wyników i estetykę samej rozprawy pod kątem edycyjnym, a przede wszystkim biorąc pod uwagę dorobek i doświadczenie Pani mgr inż. Magdaleny Bańkosz, **stawiam wniosek o wyróżnienie niniejszej rozprawy**.

Donata Bougys