



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA
IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
KATEDRA BIOMATERIAŁÓW I KOMPOZYTÓW

Prof. dr hab. inż. Elżbieta PAMUŁA

Kraków, 28 września 2025

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Magdaleny Bańkosz
*pt. Badania nad opracowaniem biomateriałów kompozytowych do
zastosowań w inżynierii i w chirurgii*
zrealizowanej pod kierunkiem
Promotor dr hab. inż. Bożena Tyliszczak, prof. PK
i Promotora pomocniczego dr. inż. Dariusza Mierzwińskiego

Recenzja została opracowana na podstawie uchwały Rady Naukowej
Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej
z dnia 9 lipca 2025
oraz zlecenia dr. hab. inż. Janusza Mikuły, prof. PK
Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki
z dnia 17 lipca 2025

Schorzenia i uszkodzenia tkanki kostnej, uniemożliwiające pacjentom, szczególnie w podeszłym wieku, właściwe funkcjonowanie, bardzo często wymagają indywidualnego i holistycznego podejścia. Jeśli klasyczne nieinwazyjne metody leczenia przestają być skuteczne, lekarz ortopeda decyduje się na przeprowadzenie procedury chirurgicznej, której celem jest wsparcie procesów regeneracyjnych poprzez implantację odpowiedniego wyrobu medycznego. Złotym standardem w implantologii są wyroby na bazie podstawowych składników budujących substancję międzykomórkową tkanki kostnej, a więc wyroby na bazie kolagenu, hydroksyapatytu lub obu składników jednocześnie. Jeśli tkanka kostna pacjenta jest dodatkowo zainfekowana drobnoustrojami chorobotwórczymi, wprowadza się leczenie antybiotykami, początkowo systemowe, a gdy nie przynosi ono oczekiwanych



WIMiC

Akademia Górniczo-Hutnicza | Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
Katedra Biomateriałów i Kompozytów

al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, tel. +48 12 617 44 48, fax. +48 12 617 33 71
e-mail: epamula@agh.edu.pl, www.ceramika.agh.edu.pl
Regon: 000001577, NIP: 675 000 19 23

rezultatów, lokalnie dostarcza się antybiotyki, które uwalniają się np. z gąbek kolagenowych czy cementów kostnych.

Pani mgr inż. Magdalena Bańkosz w swojej rozprawie doktorskiej dogłębnie przeanalizowała obecny stan wiedzy i wzięła te wszystkie przesłanki pod uwagę, zanim podjęła się opracowania i wytworzenia kompozytowego biomateriału dla chirurgii i inżynierii tkanki kostnej. Doktorantka założyła, że opracowany przez nią biomateriał powinien wspierać regenerację, ulegać degradacji lub biointegracji i dostarczać substancje bioaktywne, które będą uwalniały się w sposób kontrolowany.

Moim zdaniem, wybór tematyki rozprawy doktorskiej jest trafny, aktualny i właściwie uzasadniony. Tytuł rozprawy: *Badania nad opracowaniem biomateriałów kompozytowych do zastosowań w inżynierii i w chirurgii* został właściwie sformułowany i wskazuje, że praca dobrze wpisuje się w dyscyplinę inżynieria materiałowa.

Praca doktorska mgr inż. Magdaleny Bańkosz została zredagowana w języku polskim, liczy w sumie 226 stron. Na początku znajduje się spis skrótów i oznaczeń stosowanych w pracy, krótkie wprowadzenie oraz zajmująca 23 strony część literaturowa zatytułowana *Analiza stanu zagadnienia*. Następne rozdziały to *Uzasadnienie podjęcia tematyki badawczej* (2 strony), *Teza i cel pracy* (1 strona) i *Plan badań* (5 stron). Dalej jest część doświadczalna z kolejnymi rozdziałami: *Charakterystyka wykorzystywanych reagentów* (1 strona), *Metodyka badań* (10 stron), *Wyniki badań i dyskusja* (aż 124 strony), *Wnioski końcowe* (2 strony). Pracę kończą *Streszczenia* w języku polskim i angielskim, a także spis 310 pozycji literaturowych, spis tabel i rysunków oraz rozdział przedstawiający dorobek naukowy doktorantki. Pracę cechuje bardzo dobra proporcja pomiędzy częścią literaturową i doświadczalną. Już pobieżna lektura pracy wskazuje, że spełnia ona wymagania formalne stawiane rozprawom doktorskim.

W części literaturowej doktorantka zreferowała podstawowe zagadnienia dotyczące biomateriałów, kierunki ich rozwoju na przestrzeni ostatnich kilku dekad, kryteria stosowane w ich klasyfikacji, oraz opisała najważniejsze właściwości i ich wpływ na

interakcje z komórkami i tkankami, w tym odpowiedź immunologiczną. Dużo miejsca poświęciła hydroksyapatytowi, kładąc nacisk na metody jego pozyskiwania z surowców naturalnych i na drodze syntezy chemicznej oraz metodom jego modyfikacji. Na końcu tego rozdziału opisała kompozyty ceramiczno-polimerowe.

Rozdział ten został zredagowany bardzo dobrze, zawiera m.in. trzy tabele, w których zestawiono w sposób syntetyczny klasy biomateriałów, ich wady i ograniczenia (Tabela 1) oraz wybrane właściwości, niezbędne do racjonalnego ich projektowania (Tabela 2). W Tabeli 3 autorka podsumowała zaś metody syntezy hydroksyapatytu, główne cechy, zalety i ograniczenia. Świadczy to o tym, że doktorantka opanowała umiejętność przeprowadzenia krytycznej analizy literatury przedmiotu. Doszukałam się w tej części tylko kilku nieścisłości nomenklaturowych, które podaję z obowiązku pełnienia roli recenzentki aby autorka nie robiła tych błędów w swoich kolejnych pracach: np. na str. 13 użyła terminu „*preparaty fibryny bogatopłytkowej*”, a zapewne chodziło tu o „*preparaty osocza bogatopłytkowego*”, na stronie 14 zamiast terminu „*ceramika bioinertna*” użyła terminu „*ceramika bioinercyjna*”, podobnie na str. 17 i 21 pojawiły się terminy „*biomateriały bioinercyjne*” zamiast „*bioinertne*”. Na str. 21 błędnie podano nazwę aminokwasu o symbolu R – powinno być „*kwasy asparaginowy*”, a doktorantka napisała, że jest to „*asparagina*”. Wspomnę jeszcze o jednym terminie, mianowicie „*β-TCP*” został nazwany przez doktorantkę, że jest to „*trójfosforan wapnia*”, a powinno być „*fosforan triwapniowy*”. Na str. 25 opisując metody otrzymywania hydroksyapatytu doktorantka napisała: „*Wariant zasadowy, prowadzony przy pH 8–11 (z użyciem NH₄OH lub NaOH), sprzyja formowaniu HAp o wyższej krystaliczności i bioaktywności*”.

Tu nasuwają mi się pierwsze pytania do dyskusji w czasie publicznej obrony: *Czy struktura krystaliczna hydroksyapatytu wpływa na jego bioaktywność? Czy zdaniem autorki hydroksyapatyt o niskim stopniu krystaliczności, będzie bardziej czy też mniej*

bioaktywny w porównaniu z hydroksyapatytem o wysokim stopniu krystaliczności?

Następnie, kandydatka do stopnia doktora przeszła do uzasadnienia podjęcia tematyki badawczej i z pełnym przekonaniem muszę przyznać, że całkowicie zgadzam się z jej argumentacją.

Teza pracy, cel naukowy i użyteczny zostały sformułowane we właściwy sposób i nie mam do nich zastrzeżeń. Bardzo podoba mi się plan badań opisany w kolejnym rozdziale z uwzględnieniem wszystkich czynników eksperymentalnych i zmiennych, według ustalonego schematu: czynniki wejściowe, wyjściowe, stałe i zakłócające. Czytelnik patrząc na Rysunek 8 wie, czego może spodziewać się w kolejnych częściach pracy doktorskiej. Plan badań jest spójny i logiczny.

W rozdziale 6 doktorantka opisała skrupulatnie reagenty wykorzystane w pracy, zaś w rozdziale 7 metody badań, co jest oczywiście wymagane we wszystkich pracach naukowych.

Rozdział 8 podzielony został na cztery części. W części I – SYNTEZA I CHARAKTERYSTYKA FAZY CERAMICZNEJ doktorantka przeprowadziła syntezę hydroksyapatytu metodą mokrego strącania. Rozpoczęła od syntezy aż 15 próbek przy 5 różnych proporcjach reagentów i 3 wartościach pH (5,5, 8 i 11). Bazując na wynikach FTIR, spektroskopii Ramana i badaniach za pomocą dyfraktometrii rentgenowskiej stwierdziła, że tylko synteza przy pH 11 sprzyja formowaniu czystego hydroksyapatytu, a największą wydajność można uzyskać jeśli proporcja reagentów wynosi 150% i stosuje się w czasie syntezy mieszaninę mechaniczną. próbki te zostały bardzo dokładnie scharakteryzowane za pomocą mikroskopii elektronowej, mikroskopii optycznej, dyfrakcji laserowej, porozymetrii rтєciowej; wyznaczono też rozwinięcie powierzchni metodą BET, stabilność zawiesiny, skład chemiczny i właściwości biologiczne *in vitro* (cytotoksyczność, aktywność prozapalna, wpływ na gojenie tkanek). Wszystkie te analizy przeprowadzono również dla

hydroksyapatytu dostępnego komercyjnie, jako materiału kontrolnego. Badania wykazały, że opracowany hydroksyapatyt wykazuje większą czystość fazową, większe rozwinięcie powierzchni, większy udział porów o średnicach 6-8 nm niż hydroksyapatyt referencyjny, co w połączeniu bardzo dobrymi wynikami badań biologicznych w pełni uzasadnia jego wykorzystanie w kompozycjach z materiałami polimerowymi. Rozdział ten został zredagowany bardzo dobrze, rysunki są czytelne i właściwie zestawione a wyniki skrupulatnie przedyskutowane. Mam tylko drobną uwagę odnośnie prezentacji wyników badań w Tabelach 10 i 11. Nie ma potrzeby podawania parametrów rozkładu wielkości cząstek z dokładnością do 3 miejsc po przecinku, biorąc pod uwagę wartość odchylenia standardowego (szczególnie w przypadku D_{90} i D_{50}). Tak samo prędkości sedymentacji wyrażane w mm/min (str. 83), czy wartości Ca/P (str. 84) nie muszą być podawane z dokładnością do 4 miejsc po przecinku. To jest tylko sugestia, aby doktorantka w przyszłości zwróciła uwagę na sposób prezentacji danych pomiarowych w jej kolejnych publikacjach naukowych.

W Części II – SYNTEZA I CHARAKTERYSTYKA MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH jako osnowę w kompozycie z hydroksyapatytem opracowanym w części I wykorzystano poliwinylpirolidon (PVP). Oceniono szybkość sedymentacji układów o różnym stężeniu PVP co pozwoliło na wyselekcjonowanie stężenia 15% jako optymalnego. Następnie doktorantka otrzymała aż 30 próbek różniących się rodzajem fotoinicjatora, sieciownika i ich stężeniem; ostatecznie wytypowała 6 kompozycji, które umożliwiły wytworzenie jednorodnych i mechanicznie stabilnych próbek w zadanym czasie fotopolimeryzacji. Bazując na wynikach zdolności sorpcyjnych kompozytów z różnym udziałem hydroksyapatytu (do 20% wag.) wybrano dwie kompozycje zawierające 10% fazy ceramicznej, które wykazywały najmniejszy współczynnik pęcznienia. Następnie

doktorantka zmodyfikowała skład osnowy polimerowej wprowadzając do niej poli(alkohol winylowy) (błędnie nazywany w pracy „alkoholem poliwinylowym”, patrz str. 7, 41, 105, 116) uzyskując materiał o znacznie większej stabilności i korzystnych właściwościach strukturalnych, sorpcyjnych i biologicznych.

W Części III – MODYFIKACJA MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH KOLAGENEM materiał opracowany w Części II został dodatkowo zmodyfikowany hydrolizatem kolagenu pochodzenia rybiego i wołowego. W tej części prac doktorantka przygotowała 6 próbek o różniących się składem, scharakteryzowała ich strukturę, zwilżalność powierzchni, chropowatość, twardość Shore’a, wytrzymałość na rozciąganie, właściwości trybologiczne, zdolności sorpcyjne w funkcji czasu oraz przeprowadziła inkubację w wodzie, SBF i płynie Ringera a także uwalnianie kolagenu. Poddała też dogłębnej analizie wyniki uwalniania biorąc pod uwagę różne modele kinetyczne. Badania wykazały, że z matrycy uwalnia się kolagen i dochodzi do zakwaszenia środowiska zewnętrznego. Tu nasuwa mi się kolejne pytania do dyskusji w czasie publicznej obrony: *Czy doktorantka prowadziła, albo czy zamierza przeprowadzić w przyszłości badania cytotoksyczności materiałów opisanych w tym rozdziale? Jak można byłoby przeciwdziałać zbyt szybkiemu uwalnianiu kolagenu z opracowanych materiałów?*

W Części IV – MODYFIKACJA MATERIAŁÓW KOMPOZYTOWYCH ANTYBIOTYKIEM wprowadzono do opracowanego materiału kompozytowego klindamycynę poprzez przesycenie hydroksyapatytu tym antybiotykiem. Podejście zastosowane przez doktorantkę okazało się skuteczne. Z systemu uwalniała się klindamycyna zgodnie z modelem Korsmayera-Peppasa. Badania mikrobiologiczne przeprowadzone zgodnie z metodą Kirkby-Bauera wykazały, że uwalniająca się z kompozytu klindamycyna skutecznie zabija gronkowca złocistego przez okres czasu do 14 dni. Jest to bardzo dobry wynik, wskazujący, że opracowany biomateriał kompozytowy

może nadawać się do leczenia zainfekowanych ubytków w tkance kostnej.

Na końcu doktorantka bardzo dobrze podsumowała uzyskane rezultaty badań i wyciągnęła wnioski, które znalazły oparcie w przedstawionych wynikach. Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że cele rozprawy doktorskiej, zarówno naukowe jak i aplikacyjne zostały zrealizowane a teza została zweryfikowana pozytywnie.

Podsumowując, chciałabym podkreślić, że dysertacja doktorska mgr inż. Magdaleny Bańkosz pt. *Badania nad opracowaniem biomateriałów kompozytowych do zastosowań w inżynierii i w chirurgii* spełnia kryteria stawiane kandydatom do stopnia doktora w dyscyplinie inżynieria materiałowa a zarazem kryteria zawarte w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2023 r. poz. 742 z późn.zm.). Na wymienione niewielkie niedociągnięcia zwróciłam uwagę z racji pełnienia funkcji recenzentki, aby doktorantka nie powieliła ich w przyszłości w kolejnych swoich pracach. Jestem przekonana, że takie prace się pojawiają, o czym świadczy doskonały dorobek naukowy i wdrożeniowy doktorantki obejmujący m.in. 54 artykuły naukowe, 5 zgłoszeń patentowych, udział w charakterze wykonawcy w 5 projektach badawczych, 37 prezentacji na konferencjach, aż 21 nagród i wyróżnień indywidualnych, a ponadto nagrody na targach wynalazków. Uwagi, jakie przedstawiam w recenzji, nie umniejszają mojej wysokiej oceny merytorycznej recenzowanej pracy. Pozostałe uwagi i pytania są zaproszeniem do dyskusji naukowej w trakcie publicznej obrony. Dlatego wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej oraz dopuszczenie pani mgr inż. Magdaleny Bańkosz do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora.

Biorąc pod uwagę bardzo wysoką wartość naukową, bardzo obiecujące wyniki o znaczeniu aplikacyjnym, a także fakt, że w dużej części zostały już one opublikowane, a więc przeszedł wnikliwy proces recenzji, wnoszę o wyróżnienie rozprawy.