

Bielsko-Biała, 12.05.2026 r.

Dr hab. inż. Izabella Rajzer, prof. UBB
Wydział Budowy Maszyn i Informatyki
Uniwersytet Bielsko-Bialski

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Zdzisławy Mrozińskiej
pt.: „**Projektowanie i charakterystyka włóknistych struktur polimerowych
funkcjonalizowanych metalami o właściwościach przeciwdrobnoustrojowych
i prokoagulacyjnych**”

zrealizowanej pod kierunkiem dr hab. Marcina Henryka Kudzina

*Niniejsza recenzja została wykonana na podstawie powołania przez Radę
Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Politechniki Łódzkiej.*

W ostatnich latach obserwuje się wyraźny wzrost zainteresowania projektowaniem wielofunkcyjnych materiałów włóknistych, które poza funkcją bariery fizycznej wykazują również aktywność biologiczną, w szczególności właściwości przeciwdrobnoustrojowe, hemostatyczne oraz zdolność modulowania odpowiedzi tkankowej. Kierunek ten wynika zarówno z rosnącego znaczenia problemu zakażeń ran, w tym zakażeń wywoływanych przez drobnoustroje wielolekooporne, jak i z potrzeby opracowania materiałów umożliwiających szybsze oraz bardziej kontrolowane uruchamianie procesów regeneracyjnych. Współczesne materiały opatrunkowe muszą spełniać szereg wymagań funkcjonalnych. Oprócz odpowiedniej wytrzymałości mechanicznej powinny charakteryzować się dobrą biokompatybilnością, zdolnością do utrzymywania wilgotnego środowiska sprzyjającego gojeniu oraz brakiem adhezji do powierzchni rany. Szczególnie istotną własnością jest aktywność przeciwdrobnoustrojowa, umożliwiająca ograniczenie kolonizacji mikroorganizmów i zmniejszenie ryzyka rozwoju infekcji, co ma szczególne znaczenie w warunkach narastającej antybiotykooporności. Nowoczesne materiały opatrunkowe powinny ponadto aktywnie wspomagać proces hemostazy, wykazywać działanie przeciwzapalne oraz stymulować proliferację i migrację komórek uczestniczących w regeneracji tkanek. W ostatnich latach coraz większą uwagę poświęca się również projektowaniu opatrunków o charakterze aktywnym i inteligentnym. Obejmuje to materiały zdolne do monitorowania stanu rany w czasie rzeczywistym, kontrolowanego i stabilnego uwalniania substancji bioaktywnych oraz wspomagania procesów regeneracyjnych poprzez zastosowanie bodźców fizycznych, w tym stymulacji elektrycznej, która może przyspieszać angiogenezę i odbudowę tkanek.



W tym kontekście szczególne znaczenie zyskują materiały polimerowe poddawane funkcjonalizacji powierzchniowej z wykorzystaniem bioaktywnych metali, takich jak miedź, cynk czy żelazo. Modyfikacja powierzchni stanowi obecnie jedno z kluczowych narzędzi projektowania biomateriałów, ponieważ umożliwia precyzyjne kształtowanie właściwości biologicznych materiału. W tym zakresie istotną rolę odgrywają techniki osadzania cienkich warstw, w tym rozpylanie magnetronowe, pozwalające na kontrolowane nadawanie powierzchni materiałów pożądanych właściwości funkcjonalnych.

Cykl publikacji przedstawiony przez Panią mgr inż. Zdzisławę Mrozińską odpowiada na te aktualne wyzwania badawcze. Zaprezentowane prace koncentrują się na projektowaniu i charakterystyce włóknistych struktur polimerowych o kontrolowanych właściwościach przeciwdrobnoustrojowych i prokoagulacyjnych, przy jednoczesnej ocenie ich właściwości fizykochemicznych oraz biologicznych. Tematyka niniejszej pracy doktorskiej stanowi bezpośrednią odpowiedź na współczesne wyzwania stojące przed inżynierią materiałową w medycynie. Takie interdyscyplinarne podejście, łączące zagadnienia inżynierii materiałowej, chemii powierzchni, mikrobiologii i bioinżynierii, należy uznać za w pełni zgodne z aktualnymi kierunkami rozwoju badań nad zaawansowanymi materiałami biomedycznymi. Zaplanowane i przeprowadzone badania nie tylko wpisują się w światowe trendy naukowe, ale także dostarczają cennych danych o dużym znaczeniu wdrożeniowym.

Charakterystyka rozprawy doktorskiej

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Zdzisławę Mrozińskiej pt. „**Projektowanie i charakterystyka włóknistych struktur polimerowych funkcjonalizowanych metalami o właściwościach przeciwdrobnoustrojowych i prokoagulacyjnych**” stanowi spójny tematycznie zbiór ośmiu artykułów opublikowanych w czasopismach naukowych oraz poprzedzającego je opracowania, w którym omówiono uzyskane wyniki badań. Całość liczy 101 stron. Na początku rozprawy zamieszczono streszczenie w języku polskim, spis treści oraz informacje dotyczące wykształcenia i dotychczasowego zatrudnienia w jednostkach naukowych Pani mgr inż. Zdzisławę Mrozińskiej. Kolejny rozdział, zatytułowany „Wstęp”, stanowi teoretyczne wprowadzenie do tematyki rozprawy. Następnie przedstawiono cel i hipotezę badawczą wraz z zakresem prowadzonych prac. W dalszej części zamieszczono wykaz publikacji stanowiących podstawę pracy doktorskiej. Rozdział 6 obejmuje wyniki badań i ich omówienie, w którym każdą publikację scharakteryzowano oddzielnie, wskazując najważniejsze uzyskane wyniki i wnioski. Rozdział 7 stanowi podsumowanie najważniejszych osiągnięć naukowych wynikających z przedstawionego cyklu publikacji. Bibliografia obejmuje 294 pozycje literaturowe, w tym 8 publikacji stanowiących podstawę rozprawy doktorskiej oraz 9 innych prac których współautorką jest Pani Magister. Załącznik nr 1 zawiera komplet publikacji wchodzących w skład rozprawy. Artykuły naukowe tworzące rozprawę zostały opublikowane w latach 2023-2025 w recenzowanych czasopismach naukowych indeksowanych w bazie *Web of Science*, tj.: *Marine Drugs* (IF=5,4; 100 pkt MNiSW); trzy publikacje w *Materials* (IF=3,2; 140 pkt MNiSW); trzy publikacje w *Coatings* (IF=2,8; 100 pkt MNiSW) oraz *Journal of Composites Science* (IF=3,7; 20 pkt MNiSW).

Sumaryczna wartość współczynnika Impact Factor dla ośmiu publikacji wynosi 27,1, natomiast łączna liczba punktów MNiSW – 840. W sześciu publikacjach Pani mgr inż. Zdzisława Mrozińska jest pierwszą autorką, natomiast w dwóch pozostałych – drugą autorką. W żadnej publikacji nie pełni funkcji autorki korespondencyjnej. Wszystkie publikacje były recenzowane przez kilku niezależnych ekspertów, co podkreśla odpowiedni poziom merytoryczny prezentowanych badań.

Na podstawie przedstawionych na końcu każdej publikacji oświadczeń oraz opisu indywidualnego wkładu można stwierdzić, że Pani mgr inż. Zdzisława Mrozińska uczestniczyła w istotnym zakresie w realizacji przedstawionych badań. Jej udział obejmował między innymi współopracowanie koncepcji i planu badań, przeprowadzenie części badań, analizę uzyskanych wyników oraz przygotowanie tekstów publikacji. Dodatkowo po omówieniu każdej pracy Autorka szczegółowo określiła zakres własnego udziału. Wkład Doktorantki obejmował przede wszystkim opracowanie i wytworzenie materiałów, ich modyfikację, dobór parametrów napylania magnetronowego oraz przeprowadzenie procesu funkcjonalizacji. Pani mgr inż. Zdzisława Mrozińska realizowała badania fizykochemiczne, obejmujące analizę BET, obserwacje mikroskopowe metodą skaningowej mikroskopii elektronowej (SEM) i mikroskopii optycznej (MO) oraz analizę spektrofotometryczną UV-Vis. Ponadto wykonywała badania biochemiczne, w tym oznaczenia czasu krzepnięcia osocza krwi (aPTT, PT) oraz ocenę peroksydacji lipidów (TBARS).

Ocena merytoryczna pracy

We wstępie, stanowiącym merytoryczne wprowadzenie do cyklu publikacji w pierwszym podrozdziale Doktorantka przedstawia budowę skóry oraz omawia cztery fazy regeneracji tkanek: hemostazę, fazę zapalną, proliferację i dojrzewanie. Następnie wyjaśnia mechanizmy kaskady koagulacyjnej i rolę czynników krzepnięcia, a także znaczenie testów diagnostycznych, takich jak aPTT, PT i TT, stosowanych w ocenie sprawności układu krzepnięcia. W dalszej części scharakteryzowano wymagania stawiane bioaktywnym materiałom opatrunkowym oraz przedstawiono matryce polimerowe wraz z klasyfikacją środków hemostatycznych. Ostatni podrozdział poświęcono zagrożeniom związanym z obecnością bakterii i grzybów, metodom nadawania materiałom polimerowym właściwości przeciwdrobnoustrojowych oraz standardowym metodom oceny skuteczności ich działania, obejmującym testy aktywności przeciwdrobnoustrojowej ZOI, MIC oraz MBC. Wprowadzenie (rozdział 3) zostało przygotowane starannie zarówno pod względem merytorycznym, jak i strukturalnym. W sposób uporządkowany Doktorantka przedstawia problematykę procesu gojenia ran, mechanizmy kaskady koagulacyjnej, charakterystykę nowoczesnych materiałów opatrunkowych oraz metody oceny ich aktywności przeciwdrobnoustrojowej. W ocenie recenzenta we wprowadzeniu zabrakło jednak bardziej szczegółowego omówienia materiałów wykorzystywanych w pracy na tle aktualnych doniesień literaturowych. Dotyczy to zwłaszcza ich budowy chemicznej i fizycznej, przykładowo struktury keratyny obecnej w wełnie czy celulozy występującej w lninie. Informacje te są istotne dla pełniejszego zrozumienia mechanizmów osadzania metali na powierzchni włóknistych podłoży polimerowych oraz interpretacji uzyskanych wyników. Większość publikacji wchodzących w skład rozprawy opiera się na

modyfikacji powierzchni materiałów metodą rozpylania magnetronowego. Z tego względu we wprowadzeniu celowe byłoby również szersze przedstawienie podstaw teoretycznych tej techniki, obejmujące elementy fizyki plazmy oraz omówienie wpływu podstawowych parametrów tego procesu, takich jak moc, czas ekspozycji, czy rodzaj gazu na właściwości porowatych podłoży polimerowych. Ma to szczególne znaczenie, ponieważ w dalszej części pracy Autorka wskazuje te zagadnienia jako jedno z istotnych wyzwań technologicznych. Ponadto we wprowadzeniu zabrakło szerszego omówienia mechanizmów oddziaływania jonów Cu, Zn i Fe z układem krzepnięcia, a także ich potencjalnego działania cytotoksycznego i genotoksycznego. Zagadnienia te stanowią ważny element dyskusji wyników przedstawionych w poszczególnych publikacjach. Uwzględnienie wskazanych zagadnień zwiększyłoby wartość poznawczą części teoretycznej oraz ułatwiłoby lepsze osadzenie uzyskanych wyników w aktualnym stanie wiedzy.

Cel pracy został sformułowany jasno i precyzyjnie. Zakłada opracowanie innowacyjnych metod biofunkcjonalizacji włóknistych materiałów polimerowych poprzez kierunkową modyfikację ich struktury z wykorzystaniem metali, takich jak miedź, cynk i żelazo. Sformułowana hipoteza badawcza, zakładająca, że kierunkowa modyfikacja biomateriałów metalami prowadzi do poprawy ich właściwości biologicznych, w tym aktywności przeciwdrobnoustrojowej oraz zdolności do modulowania właściwości koagulacyjnych, jest logicznie powiązana z celem pracy, trafnie uzasadniona i znalazła potwierdzenie w uzyskanych wynikach badań.

W pierwszej publikacji cyklu przedstawiono syntezę kompozytów bawełniano-alginianowych modyfikowanych jonami miedzi, opracowanych z myślą o zastosowaniu w nowoczesnych materiałach opatrunkowych. Przeprowadzone analizy potwierdziły skuteczne osadzenie warstwy alginianowo-miedziowej w strukturze tkaniny, co wpłynęło zarówno na poprawę właściwości mechanicznych materiału, jak i zmianę jego parametrów użytkowych, w tym porowatości oraz przepuszczalności powietrza. Otrzymane kompozyty wykazały aktywność przeciwbakteryjną i przeciwgrzybiczą przy jednoczesnym zachowaniu korzystnych właściwości biologicznych. Na uwagę zasługuje również wykazanie ochronnej roli warstwy alginianowej, ograniczającej wpływ jonów miedzi na parametry krzepnięcia krwi. Istotnym osiągnięciem pracy było opracowanie prostej i niskokosztowej metody wytwarzania materiałów o potencjale aplikacyjnym. Należy jednak podkreślić, że pełna ocena przydatności opracowanych kompozytów wymaga dalszych badań *in vivo* oraz rozszerzonej analizy biokompatybilności. W publikacjach 2, 3 oraz 5 Doktorantka podjęła się funkcjonalizacji włókien z poli(laktydu) (PLA), wytworzonych metodą melt-blown, z wykorzystaniem techniki napyłania magnetronowego. Należy podkreślić, że proces ten nie ma charakteru rutynowego, lecz wymaga precyzyjnego doboru parametrów plazmy do właściwości konkretnej matrycy polimerowej. Wynika to z porowatej struktury włókien oraz ograniczonej stabilności termicznej materiału. Zarówno proces wytwarzania włókien, jak i ich modyfikacja z zastosowaniem miedzi, cynku oraz żelaza zostały przeprowadzone samodzielnie przez Panią mgr inż. Zdzisławę Mrozińską. Otrzymane kompozyty wykazały szerokie spektrum aktywności przeciwdrobnoustrojowej wobec bakterii Gram-dodatnich, Gram-ujemnych oraz grzybów. Za szczególnie wartościowy element badań należy uznać wykazanie,

że kontrolowane wprowadzenie miedzi lub cynku umożliwia modulowanie właściwości hemostatycznych włókien PLA, a tym samym wpływanie na przebieg procesów krzepnięcia krwi.

Ważne rozwinięcie przedstawionego cyklu stanowi również publikacja dotycząca kompozytów PLA-Fe (publikacja 6.5), w której wykazano brak działania cytotoksycznego i genotoksycznego wobec ludzkich jednojądrzastych komórek krwi obwodowej (PBMC), przy jednoczesnym zachowaniu prawidłowych mechanizmów koagulacyjnych. Do głównych ograniczeń przedstawionych badań należy zaliczyć obserwowaną degradację włókien występującą przy określonych parametrach rozpylania żelaza, co wskazuje na wysoką wrażliwość materiału na warunki procesu technologicznego. Ponadto uzyskane wyniki pokazują konieczność ścisłej kontroli ilości osadzanych metali, ponieważ ich nadmierne stężenie może prowadzić do niekorzystnego wydłużenia czasu częściowej tromboplastyny po aktywacji (aPTT).

W publikacjach 4 i 6 Doktorantka podjęła interesującą próbę porównania wpływu miedzi metalicznej osadzonej metodą napyłania magnetronowego na dwie odmienne matryce naturalne – wełnę oraz len. Wykazano, że w przypadku wełny obecność miedzi powoduje statystycznie istotne wydłużenie czasu aPTT, przekraczające miejscami 70 s, co autorzy wiążą z oddziaływaniem jonów Cu z grupami karboksylowymi obecnymi w strukturze włókien. Odmienny efekt zaobserwowano dla lnu modyfikowanego miedzią, który nie wykazywał tak wyraźnych zaburzeń parametrów krzepnięcia, co może wskazywać na większą neutralność tego materiału wobec kaskady koagulacyjnej w analizowanym zakresie stężeń. W obu publikacjach przeprowadzono również badania z wykorzystaniem testu relaksacji plazmidu, wykazując zdolność miedzi do generowania reaktywnych form tlenu oraz indukowania pojedynczych pęknięć nici DNA. Jednocześnie autorzy wskazują, że obserwowane efekty powinny być kompensowane przez naturalne mechanizmy naprawcze funkcjonujące w komórkach organizmu człowieka. Uzyskane materiały wykazały ponadto właściwości przeciwbakteryjne i przeciwgrzybicze, co potwierdza ich potencjał aplikacyjny w projektowaniu nowoczesnych opatrunków przeciwwzakaźnych.

Kolejna publikacja (6.7) dotyczy funkcjonalizacji medycznej tkaniny bawełnianej warstwą żelaza z wykorzystaniem techniki rozpylania magnetronowego w celu poprawy jej właściwości biologicznych i użytkowych. Przeprowadzone badania pozwoliły na uzyskanie jednorodnych powłok, które nie zaburzały procesów krzepnięcia krwi ani przepuszczalności powietrza, zapewniając jednocześnie skuteczną ochronę przed promieniowaniem UV. Istotnym osiągnięciem pracy było wykazanie braku działania cytotoksycznego i genotoksycznego wobec ludzkich komórek oraz potwierdzenie aktywności antyoksydacyjnej opracowanych materiałów. Wyniki te wskazują na wysoki potencjał aplikacyjny kompozytów w zastosowaniach związanych z leczeniem ran.

Publikacja 8 (6.8) stanowi rozwinięcie wcześniejszych badań Doktorantki poprzez zastosowanie bardziej złożonych układów polimerowych (PLA/PESf) oraz wykorzystanie fosforanu celulozy jako czynnika stabilizującego jony miedzi w strukturze materiału. Autorzy wykazali, że otrzymane kompozyty charakteryzują się szerokim spektrum aktywności biobójczej wobec licznych

bakterii i grzybów. Badania biochemiczne potwierdziły natomiast, że obecność miedzi wpływa na procesy krzepnięcia krwi poprzez wydłużenie czasu aPTT, przy jednoczesnym braku istotnego wpływu na czas protrombinowy.

Po zapoznaniu się z rozprawą nasuwają się następujące uwagi i pytania:

1. W kontekście badań nad kompozytami PLA-Cu (publikacja 2) proszę o wyjaśnienie, czy analizowano wpływ parametrów procesu napyłania magnetronowego (np. czasu procesu: 5, 10 i 20 min) na stopień krystaliczności oraz właściwości mechaniczne samej włókniny PLA. Czy proces funkcjonalizacji nie prowadził do częściowej degradacji polimeru, mogącej wpływać na funkcjonalność finalnego materiału opatrunkowego?
2. W rozprawie brakuje również szerszego omówienia stabilności wytworzonych powłok metalicznych w czasie. Choć Doktorantka potwierdziła skuteczność osadzania metali między innymi za pomocą analiz SEM/EDS i FAAS, istotnym zagadnieniem pozostaje trwałość tych struktur w warunkach symulujących środowisko rany, np. w obecności wysięku o zmiennym pH. Parametr ten ma kluczowe znaczenie zarówno dla długotrwałego działania przeciwdrobnoustrojowego, jak i bezpieczeństwa stosowania materiału. W cyklu publikacji zabrakło szczegółowych badań kinetyki uwalniania jonów metali do płynów symulujących środowisko biologiczne (Simulated Body Fluids) w funkcji czasu i zmiennego pH. Dane tego typu byłyby istotne dla określenia trwałości efektu biologicznego materiału oraz oceny ryzyka osiągnięcia lokalnych stężeń potencjalnie toksycznych dla regenerujących się tkanek. Proszę o odniesienie się do tej kwestii podczas dyskusji wyników.
3. Biorąc pod uwagę aplikacyjny charakter badań, w rozprawie zabrakło szerszego odniesienia do problematyki sterylizacji opracowanych materiałów. Metale osadzone na powierzchni polimerów mogą w różny sposób reagować na standardowe metody wyjaławiania, takie jak promieniowanie gamma czy tlenek etylenu, co może wpływać zarówno na właściwości biologiczne materiałów, jak i na kinetykę uwalniania jonów metali. Można przypuszczać, że procesy sterylizacji będą modyfikowały profil uwalniania jonów, co może mieć istotne znaczenie dla utrzymania stabilnej skuteczności hemostatycznej i przeciwdrobnoustrojowej finalnego produktu medycznego. Proszę o odniesienie się do kwestii potencjalnego wpływu metod sterylizacji na właściwości opracowanych kompozytów oraz wskazanie, która z metod wyjaławiania mogłaby być najmniej inwazyjna dla tego typu układów polimer-metal.

Dodatkowo Autorka nie ustrzegła się kilku drobnych błędów redakcyjnych i edytorskich:

1. Na części mikrografii brak jest czytelnego oznaczenia (opisu) skali lub jest ono niewidoczne. Dotyczy to między innymi rysunków 6.3.2, 6.3.3 oraz rysunku 6.5.1 na stronie 42. Jest to istotny element dokumentacji wyników badań mikroskopowych.
2. W rozprawie zauważalne jest częste stosowanie form pierwszej osoby liczby pojedynczej, takich jak „przedstawiam”, „zastosowałam” czy „prowadziłam”. Taki sposób narracji ogranicza



obiektywny charakter wypowiedzi naukowej. Zasadne byłoby zastąpienie tych sformułowań formami bezosobowymi, np. „przeprowadzono badania” czy „zastosowano”, co nadałoby pracy bardziej formalny charakter.

3. Na stronie 4 (wers 22) sformułowanie „...prowadzą do krwawienia i zwiększa ryzyko...” powinno zostać poprawione na „...prowadzą do krwawienia i zwiększają ryzyko...”. W pracy występują również inne drobne uchybienia językowe i redakcyjne.
4. Adnotacje w rodzaju „rysunek stworzony za pomocą programu Paint 3D” (str. 4) nie powinny być umieszczane na rysunku.
5. W podrozdziale 6.2 (str. 21), dotyczącym funkcjonalizacji włókniny PLA, pojawia się odniesienie do włókien naturalnych jako przykładu badanych matryc. Wydaje się to nieuzasadnione, ponieważ publikacja dotyczy wyłącznie materiałów na bazie PLA.

Powyższe uwagi nie umniejszają wartości naukowej rozprawy. Przedstawiona praca doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie istotnego i aktualnego problemu badawczego w obszarze nowoczesnych technologii wytwarzania bioaktywnych kompozytów polimerowych i włóknistych o właściwościach hemostatycznych oraz przeciwdrobnoustrojowych.

Autorka wykazała się pełną samodzielnością badawczą oraz wysokimi kompetencjami w zakresie planowania i realizacji złożonych procedur eksperymentalnych, obejmujących zarówno fizyczną modyfikację powierzchni metodą rozpylania magnetronowego, jak i zaawansowane analizy fizykochemiczne oraz biologiczne. Szczególną wartość pracy stanowi umiejętne połączenie interdyscyplinarnych technik badawczych z zakresu inżynierii materiałowej, biologii i biochemii, co umożliwiło kompleksową ocenę bezpieczeństwa biologicznego, w tym potencjalnej genotoksyczności oraz analizę parametrów krzepnięcia krwi (PT, aPTT, TT) dla materiałów o strukturze porowatej. Uzyskane wyniki wnoszą istotny wkład w rozwój inżynierii materiałów biomedycznych, dostarczając innowacyjnych rozwiązań w obszarze projektowania nowoczesnych opatrunków i terapii ran. Rozprawa doktorska potwierdza zarówno dobre przygotowanie teoretyczne, jak i wysokie kompetencje warsztatowe Doktorantki, odpowiadające wymaganiom stawianym kandydatom do stopnia doktora.

Wniosek końcowy

W mojej ocenie przedłożona do recenzji rozprawa doktorska mgr inż. Zdzistawy Mrozińskiej pt.: **„Projektowanie i charakterystyka włóknistych struktur polimerowych funkcjonalizowanych metalami o właściwościach przeciwdrobnoustrojowych i prokoagulacyjnych”** stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego i w pełni odpowiada wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim określonym w art. 187 ustawy z dn. 20 lipca 2018 roku – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (z późn.zm.) dlatego wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Pani mgr inż. Zdzistawy Mrozińskiej do dalszych etapów postępowania o nadanie stopnia doktora w dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w dyscyplinie inżynieria materiałowa.

