

RECENZJA PRACY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Angeliki Zaszczyńskiej

„Piezoelektryczne polimerowe nonowłókna jako inteligentne podłoża komórkowe do zastosowań w inżynierii tkankowej

Recenzent: prof. dr hab. n. inż. techn. Andrzej Leonard Wasiak

Niniejsza recenzja jest sporządzona w oparciu o powołanie na recenzenta uchwałą Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki PAN na posiedzeniu w dn. 5 lutego 2026

Doktorantka mgr inż. Angelika Zaszczyńska posiada wymagany tytuł zawodowy magistra inżyniera, przedstawiła autoreferat wykazujący, iż spełnia wymagania w zakresie efektów uczenia się na poziomie 8 Polskiej Ramy Kwalifikacji. Dowiodła, iż jest autorką bądź współautorką 26 publikacji naukowych, Była wykonawcą w sześciu projektach naukowych, a jednym kierowała. Ponadto Doktorantka prowadziła szereg seminariów, a także odbyła szereg szkoleń i uczestniczyła w wielu konferencjach naukowych. Mgr Angelika Zaszczyńska postępuje się językiem angielskim, co udowodniła zarówno jako autor bądź współautor publikacji wydanych w tym języku, brała udział w 12 międzynarodowych konferencjach naukowych, w których prezentowała, w języku angielskim, wyniki swych badań, dwukrotnie odbyła staże naukowe na zagranicznych Uniwersytetach oraz uczestniczyła w wielu wykładach, seminariach, itp. Również na podkreślenie zasługuje fakt, iż ukończyła pracę doktorską i przedstawiła ją do oceny. Tak więc spełnia wymagania niezbędne do ubiegania o stopień doktora.

Tematyka i struktura pracy doktorskiej

Tematyka pracy dotyczy szeroko zakrojonych badań nad możliwością doboru warunków elektroprzewodzenia w celu otrzymania piezoelektrycznych nanowłóknistych podłoży polimerowych oraz optymalizacji ich własności pod kątem zastosowania jako biogodnych materiałów mogących znaleźć zastosowanie w inżynierii tkankowej do regeneracji tkanek nerwowej i kostnej.

Temat ten jest wyjątkowo aktualny naukowo i technologicznie zarówno w aspekcie zrozumienia i doskonalenia procesów elektroprzewodzenia, jak i wytwarzanie piezoelektrycznych materiałów dla inżynierii tkankowej.

Praca zawiera, przedstawiony w języku polskim, opis przeprowadzonych badań uwzględniający cele pracy, hipotezę badawczą, opis użytych substancji, opisy zastosowanych metod badawczych, streszczenia sześciu publikacji anglojęzycznych dotyczących wyników badań, wnioski, opis oryginalnego wkładu w dziedzinę nauki oraz spis literatury.

Ponadto praca zawiera oryginalne, anglojęzyczne teksty publikacji przedstawiających wyniki przeprowadzonych badań.

Przeprowadzone badania można zakwalifikować jako głównie należące do inżynierii materiałowej, ale wnoszące również wkład do inżynierii biomedycznej bądź inżynierii tkankowej.

Ocena merytoryczna

Cel pracy sformułowano jako „opracowanie nanowłóknistych podłoży komórkowych o optymalnych właściwościach piezoelektrycznych i biologicznych, przeznaczonych do zastosowań w inżynierii tkankowej, szczególnie w regeneracji tkanki kostnej i nerwowej.”

Realizację tego celu oparto przede wszystkim na dokonaniu obszernej i głębokiej analizy istniejącej literatury dotyczącej istoty piezoelektryczności, jej roli w tkankach biologicznych, materiałów dysponujących tą cechą oraz metod kształtowania struktury tych materiałów. Zwrócono szczególną uwagę na znaną w technice, ale dopiero obecnie zyskującą popularność metodę elektroprzędzenia, umożliwiającą tworzenie nanowłókien z polimerów. Wykazano istnienie luki badawczej dotyczącej możliwości i warunków formowania nanowłókien, bądź nanowłóknin o właściwościach piezoelektrycznych, wykazujących równocześnie pozytywne działanie biologiczne.

Do badań wybrano polimery znane z występowania w nich faz o własnościach piezoelektrycznych, mianowicie polifluorek winylidenu (PVDF) oraz poli(L-laktyd) (PLLA). Dodatkowo wybrano nanocząstki hydroksyapatytu (nHA) i nanocząstki złota (AuNPs) jako potencjalne modyfikatory badanych polimerów.

Wyznaczono szereg zadań niezbędnych do realizacji celu badań:

1. Dobór parametrów procesu: wybór rozpuszczalnika i stężenia roztworu polimeru, szybkość podawania roztworu, dobór napięcia elektrycznego, odległość igły podającej od kolektora, dobór prędkości obrotowej kolektora i jej wpływ na orientację włókien. Po określeniu warunków umożliwiających uzyskanie włókien o zadowalającej jakości wybrano dwie prędkości obrotów kolektora umożliwiające uzyskanie dwu typów włóknin: pierwszego o prawie losowym i drugiego o wyraźnie zorientowanym ułożeniu włókien.
2. Określenie szeregu istotnych własności otrzymanych włókien i wykonanych z nich podłoży w zależności od wymienionych wyżej parametrów procesu. Obejmowało to oznaczenie stopnia krystaliczności, zawartości o rodzaju faz piezoelektrycznych, stopnia ukierunkowania włókien, współczynnika anizotropii, współczynnika piezoelektryczności, a także ważnych z punktu widzenia znaczenia biologicznego charakterystyk takich jak porowatość, zwilżalność, energia swobodna powierzchni, czy sorpcja wody we włókninach.
3. Zbadanie wpływu morfologii, ukierunkowania włókien oraz charakterystyk piezoelektryczności włóknin na ich właściwości biologiczne, na które składają się: ocena cytotoksyczności i stopień proliferacji komórek w warunkach *in vitro*.
4. Zbadanie wpływu dodatków nHA i AuNPs na właściwości włóknin tj. morfologię, stopień orientacji włókien piezoelektryczność, krystaliczność, zawartość faz piezoelektrycznych oraz zwilżalność. Następnie optymalizacja zawartości dodatków z punktu widzenia efektywności biologicznej ocenianej w warunkach eksperymentu *in vitro*. Ostatecznym celem było dokonanie analizy zależności pomiędzy odpowiedzią komórkową a cechami fizycznymi uzyskanych włóknin.

Zadania powyższe są starannie, a zarazem realistycznie zaplanowane i konsekwentnie realizowane przy wykorzystaniu nowoczesnych metod badawczych. Do formowania próbek używano zarówno aparatury do elektroprzędzenia skonstruowanej w Samodzielnej Pracowni Polimerów i Biomateriałów IPPT PAN, jak i komercyjnej komory przędzalniczej Fluidnatek LE-50, Bioinicia, Walencja, Hiszpania.

Badania lepkości roztworów polimerowych stosowanych do procesu elektroprzędzenia prowadzono za pomocą wiskozymetru rotacyjnego stożek – płytka przy zmiennej szybkości ścinania oraz przy stałej szybkości ścinania 33 [1/s] odpowiadającej szybkości ścinania uzyskiwanej wewnątrz igły dozującej roztwór w procesie elektroprzędzenia.

Morfologię włókien i włóknin badano za pomocą skaningowej mikroskopii elektronowej. Określano średnicę włókien, aproksymując rozkład średnic funkcją Gaussa. Podobnie określano rozkład orientacji, na podstawie którego oznaczano współczynnik anizotropii.

Spektroskopię w podczerwieni ATR Fourier Transform IR Spectroscopy wykorzystywano do określenia zawartości faz piezoelektrycznych oraz obecności dodawanych nanocząstek złota lub hydroksyapatytu. Do potwierdzania obecności tych nanocząstek stosowano także Scanning Electron Microscopy-Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

Badania struktury nadcząsteczkowej wykonano za pomocą dyfraktometru WAXS (Bruker DS.) przy użyciu promieniowania CuK α rejestrowanego za pomocą detektora Lynx Eye 1-D

Pomiary współczynnika piezoelektryczności wykonano za pomocą specjalistycznego miernika d_{33} (YE2739A prod. Sinocera, Chiny)

Wykonano również badania porowatości i średniego rozmiaru porów w próbkach oraz pomiary zwilżalności.

Badania odpowiedzi komórkowej przeprowadzono przy zastosowaniu czterech linii komórkowych, były to: badania *in vitro* z użyciem mysich fibroblastów L929, badania *in vitro* z użyciem ludzkich komórek osteblastopodobnych linii MG-63, badania *in vitro* z użyciem komórek macierzystych pochodzących z tkanki tłuszczowej człowieka oraz badania *in vitro* z wykorzystaniem neuralnych komórek macierzystych wyprowadzonych z indukowanych pluripotencjalnych komórek macierzystych także pochodzenia ludzkiego. Dokładne opisy procedur badawczych przedstawiono zarówno w opisie pracy doktorskiej, jak i publikacjach.

Wszystkie procedury badawcze były starannie przemyślane, wykonane precyzyjnie oraz interpretowane zgodnie z aktualną wiedzą metodologiczną przy wykorzystaniu metod statystycznych oraz matematycznych odpowiadających stosowanym technikom pomiarowym.

Przeprowadzone badania doświadczalne są właściwie dobrane do postawionego celu pracy i udzielają realistycznych odpowiedzi na postawione pytania. Uzyskano wyniki potwierdzające hipotezę badawczą wykazując, że dobór warunków elektroprzędzenia wraz z doбором masy molekularnej polimeru zapewniają wytworzenie nanowłóknistych podłoży sprzyjających wzrostowi komórek organizmów biologicznych. Wytworzone podłoża, w zależności od warunków formowania charakteryzują się zróżnicowaną orientacją makrocząsteczek i makroskopową anizotropią. Najwyższe wartości współczynnika anizotropii i zarazem najwyższe wartości współczynnika piezoelektryczności w PVDF uzyskują próbki o najwyższym stopniu orientacji molekularnej i najwyższej zawartości krystalicznych faz piezoelektrycznych. W przypadku PLLA własności piezoelektryczne uzyskuje się w próbkach amorficznych, w których pojawia się konformacja piezoelektryczna makrocząsteczek. Wzrost ukierunkowania włókien, a także

obecność nanocząstek nHA sprzyja również wzmoczeniu oddziaływania biologicznego podnosząc przeżywalność komórek. Obecność nanocząstek zwiększa również hydrofilowość uzyskanych podłoży, korzystnie wpływając na uzyskiwaną odpowiedź biologiczną.

Wspomniane wyżej wyniki stanowią o nowatorskim własnym wkładzie doktorantki w wiedzę o formowaniu nanowłókien w procesie elektroprzędzenia. Dotyczy to zarówno wiedzy dotyczącej związku pomiędzy parametrami procesu, charakterystyką molekularną surowca, jak i związku tychże parametrów procesu z ukształtowanymi w nim użytkowymi własnościami uzyskanych produktów.

Do pozytywnych cech pracy należy również zaliczyć bogaty i głęboko traktujący przedmiot badań, przegląd wielu pozycji literatury źródłowej.

Uwagi krytyczne.

Głównym niedostatkim recenzowanej pracy jest nieco ubogi opis aparatury i samego procesu formowania. Brakuje mi np. informacji o średnicy wałka odbierającego próbki o wysokiej orientacji. Podana jest szybkość obrotowa, gdyby była znana średnica można byłoby wyliczyć liniową prędkość odbioru włókna, a stąd pokusić się o wyznaczenie podłużnego gradientu prędkości. Moim zdaniem ta wartość najbardziej trafnie oddaje zdolność procesu do uzyskiwania wysoko zorientowanych włókien. Należy jednak zauważyć, że ten gradient może zmieniać się w funkcji położenia i jego wyznaczenie może sprawiać trudność bez specjalnie zaplanowanych pomiarów. Więc raczej temat do uwzględnienia w przyszłych pracach badawczych.

Inna drobna uwaga: w którejś publikacji, a także opisie w języku polskim, trafiło się dziwne oznaczenie jednostki piezoelektryczności: $[pC/N^{-1}]$ – to trochę przesada powinno być: $[pCN^{-1}]$ lub $[pC/N]$. Fakt, że tego nie zauważył Redaktor w czasopiśmie może świadczyć o nowości tematyki pracy.

Wniosek końcowy

Przedstawiona do recenzji praca doktorska niewątpliwie prezentuje bogatą wiedzę kandydatki zarówno w dyscyplinie nauki o materiałach, jak i inżynierii tkankowej. Przedmiotem pracy jest rozwiązanie problemu naukowego omawianego w powyższych stronach recenzji, jak i rozwiązanie problemu technicznego, technologicznego w zakresie procedury doboru parametrów procesu formowania zapewniających wytworzenie produktu o żądanych cechach. Przedstawiona do oceny praca składa się z monograficznego opisu przeprowadzonych badań oraz załączonego cyklu sześciu powiązanych tematycznie artykułów naukowych opublikowanych w poważnych międzynarodowych czasopismach cytowanych w WoK, Google Scholar. W artykułach tych mgr inż. Angelika Zaszczyńska jest wiodącym, pierwszym Autorem. Oznacza to spełnienie wymagań Ustawy DU-49-poz. 1668 3. Z innych załączonych materiałów wynika, że Kandydatka spełnia również wymagania Art. 186 . 1 Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym.

Podsumowując stwierdzam, że przedstawiona rozprawa doktorska mgr Angeliki Zaszczyńskiej spełnia wszystkie odnośne wymogi Ustawy o Stopniach i Tytule Naukowym i wnoszę o przyjęcie pracy oraz dopuszczenie mgr Angeliki Zaszczyńskiej do publicznej obrony.

Ponadto, uwzględniając wysoki poziom naukowy, wniesiony znaczny wkład poznawczy i uzyskanie wyników o praktycznym znaczeniu – wnoszę o uznanie pracy za wyróżniającą.

Prof. dr hab. Andrzej Leonard Wasiak