



Zachodniopomorski
Uniwersytet
Technologiczny
w Szczecinie



Katedra
Inżynierii Polimerów
i Biomateriałów

Al. Piastów 45, 71-311 Szczecin

prof. dr hab. inż. Mirosława El Fray

tel: (+48) 91 499 48 28

fax: (+48) 91 499 40 98

Email: mirfray@zut.edu.pl

Ocena pracy doktorskiej Pani **mgr inż. Angeliki Zaczyńskiej**

**pt.: „Piezoelektryczne polimerowe nanowłókna jako
inteligentne podłoża komórkowe do zastosowań w inżynierii
tkankowej”**

zrealizowanej pod kierunkiem promotora:
prof. dr hab. inż. Pawła Łukasza Sajkiewicza
oraz promotora pomocniczego:
dr hab. inż. Arkadiusza Dominika Gradysa

Recenzja została opracowana na podstawie uchwały Rady Naukowej Instytutu
Podstawowych Problemów Techniki PAN w Warszawie z dnia 5 lutego 2026 r.

Przedstawiona do oceny praca doktorska ma formę przewodnika do zbioru sześciu opublikowanych i powiązanych ze sobą tematycznie artykułów naukowych. Doktorantka zawarła w nich przegląd literatury dotyczącej tematyki rozprawy oraz najistotniejsze wyniki z przeprowadzonych prac badawczych. Opracowany przez Doktorantkę przewodnik składa się z jedenastu rozdziałów dotyczących wprowadzenia w tematykę pracy (rozdział 1), celu pracy i hipotezy badawczej (rozdział 2 i 3), opisu zastosowanych materiałów i metod badawczych (rozdział 4 i 5) oraz listy publikacji z danymi bibliometrycznymi (rozdział 6). W kolejnych rozdziałach 7-9, Doktorantka dokonała opisu wyników badań przedstawionych w poszczególnych publikacjach, podsumowała wyciągnięte wnioski oraz wskazała na elementy wkładu oryginalnego swojej pracy w inżynierię materiałową, w szczególności w materiały i kompozyty piezoelektryczne. W rozdziale 10 Doktorantka zawarła 95 pozycji literaturowych, do których odwoływała się w przewodniku. Opracowanie wieńczą kopie sześciu publikacji oraz oświadczenia Doktorantki o Jej wkładzie w każdą publikację naukową.

Problematyka badawcza i aktualność tematu pracy

Doktorantka w swoich badaniach skupiła się na wytwarzaniu nanowłóknistych mat o właściwościach piezoelektrycznych wykorzystując metodę elektroprzędzenia. Metoda ta nadaje się doskonale do wytwarzania włóknistych i porowatych struktur polimerowych naśladujących macierz zewnątrzkomórkową, które mogą stanowić podłoża (rusztowania) dla inżynierii tkankowej. Jeśli dodatkowo mogą one generować sygnały elektryczne w odpowiedzi na przyłożony bodziec zewnętrzny, to mogą skutecznie stymulować ścieżki sygnałowe i wspomagać regenerację tkanek nerwowych lub kostnych. Materiałami o właściwościach piezoelektrycznych są m.in. hydroksyapatyt (nHA) oraz nanocząstki złota (AuNPs). Wykorzystanie piezoelektrycznych polimerów, m.in. poli(fluorku winylidenu)(PVDF) oraz poli(L_laktydu)(PLLA) stanowiło punkt wyjścia w realizacji badań nad nanowłóknistymi kompozytami jako podłożami zdolnymi do bioelektrycznej stymulacji układu kostnego i nerwowego.

Dokonany przez Doktorantkę przegląd literatury potwierdził, że zasadne jest opracowanie nowych nanowłókien kompozytowych na podstawie wytypowanych polimerów i dodatków, aby uzupełnić istniejącą lukę w tym obszarze wiedzy oraz zbadać wpływ ułożenia włókien na właściwości piezoelektryczne i na odpowiedź komórkową. Doktorantka skupiła się na wytworzeniu nanowłóknistych mat z PVDF w celu zbadania wpływu procesu elektroprzędzenia i jego warunków na powstawanie faz piezoelektrycznych (β i γ). Przeprowadziła również badania nad wytwarzaniem biodegradowalnych podłoży z PLLA z dodatkiem nHA, które wykazywały silną piezoelektryczność i wysoką biogodność. Finalnie, Doktorantka otrzymała i zbadała nanowłókniste struktury z PVDF z dodatkiem nHA i naniesionymi ultradźwiękowo na powierzchnię włókien nanocząstkami złota. Istotnym elementem badań było porównanie wpływu sposobu ułożenia włókien (izotropowe vs. anizotropowe) na zdolność do stymulacji komórkowej.

Należy zwrócić uwagę, że cykl publikacji składający się na rozprawę jest spójny i przejrzysty, a kolejne prace – dwie przeglądowe i cztery zawierające wyniki prac eksperymentalnych, stanowią kompletną całość.

Analiza doboru technik eksperymentalnych i metodyk badawczych

Celem badań zrealizowanych przez Doktorantkę było opracowanie nanowłóknistych podłoży komórkowych, wykazujących właściwości piezoelektryczne i wysoką biogodność o potencjalnym wykorzystaniu jako podłoża dla komórek do regeneracji tkanki kostnej i nerwowej. Doktorantka wykorzystwała technikę elektroprzędzenia i dobrała warunki procesu, takie jak stężenie polimeru, szybkość podawania roztworu, napięcie elektryczne, odległość igły od kolektora oraz prędkość obrotową kolektora. Doktorantka przeprowadziła badania stopnia krystaliczności, zawartości faz piezoelektrycznych, izotropowości włókien, zwilżalności, energii swobodnej powierzchni oraz sorpcję wody dla otrzymanych nanowłóknistych mat polimerowych i kompozytowych. Kluczowymi badaniami w kontekście możliwego

zastosowania praktycznego opracowanych materiałów były testy komórkowe z wykorzystaniem czterech linii komórkowych. W przeprowadzanych badaniach, Doktorantka wykorzystwała nowoczesną i adekwatną do zakresu prac aparaturę badawczą, w tym skaningową mikroskopię elektronową (SEM) do oceny morfologii i architektury włóknistych mat, wiskozymetrię do oceny lepkości roztworów, goniometr do oznaczenia kąta zwilżania powierzchni materiałów oraz wyznaczenia energii swobodnej powierzchni i jej polarności, spektroskopię w podczerwieni do potwierdzenia chemicznych grup funkcyjnych i efektu piezoelektryczności, skaningowej kalorymetrii różnicowej (DSC) do wyznaczenia temperatur przejść fazowych oraz szerokokątowego rozpraszania promieni rentgenowskich (WAXS) do oznaczenia stopnia krystaliczności. Pomiar współczynnika piezoelektryczności zostały wykonane przy użyciu specjalistycznego miernika – piezometru d_{33} . Kluczowymi badaniami z punktu widzenia możliwości wykorzystania wytworzonych mat polimerowych w inżynierii tkankowej były badania komórkowe, które Doktorantka przeprowadziła z wykorzystaniem linii mysich fibroblastów L929 i ludzkich komórek osteoblastycznych linii MG-63. Ponadto, oceniła odpowiedź komórkową wybranych podłoży z wykorzystaniem komórek macierzystych pochodzących z ludzkiej tkanki tłuszczowej (ADSC) oraz neuralnych komórek macierzystych z linii ludzkich indukowanych pluripotencjalnych komórek macierzystych (hiPSC-NSC).

Z całym przekonaniem stwierdzam, że zastosowane przez Doktorantkę techniki eksperymentalne i metody badawcze zostały dobrane w sposób trafny i adekwatny do celu i zakresu przeprowadzonych prac badawczych.

Analiza wyników przeprowadzonych badań i elementy nowości w pracy

Wyniki badań zrealizowanych w ramach pracy doktorskiej zostały opublikowane w sześciu publikacjach, które ukazały się w następujących czasopismach: *Polymers* (2020), *Polymers* (2024), *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* (2020), *International Journal of Molecular Sciences* (2024), *Micron* (2025) oraz *Molecules* (2025). Należy podkreślić, że we wszystkich publikacjach Doktorantka jest pierwszą współautorką. Do wszystkich publikacji zostały dołączone oświadczenia współautorów, z których wynika dominujący wkład Doktorantki w przeprowadzone i opublikowane prace badawcze.

Należy stwierdzić, że przygotowane przez Doktorantkę prace przeglądowe, które ukazały się w czasopiśmie *Polymers* (2020 i 2024), stanowią wartościowy wstęp do problematyki badawczej, czyli przeglądu piezoelektrycznych skafoldów jako materiałów do regeneracji tkanki nerwowej oraz tkanki kostnej.

Badania opublikowane w czasopiśmie *Bulletin of the Polish Academy of Sciences: Technical Sciences* (2020), dotyczyły opracowania warunków procesu elektroprzędzenia PVDF i ich wpływu na właściwości strukturalne i biologiczne wytworzonych nanawłóknistych mat. Zbadano wpływ prędkości obrotowej kolektora na morfologię włókien, zawartość faz piezoelektrycznych (głównie fazy β) oraz na odpowiedź komórkową. Przeprowadzone badania wykazały, że najwyższej jakości włókna, tj. włókna pozbawione defektów, uzyskano z roztworu o stężeniu 22%, a wzrost prędkości obrotowej kolektora prowadzi do zwiększenia stopnia ukierunkowania włókien i

zmniejszenia ich średnicy. Ważnym wnioskiem, jaki Doktorantka wysnuła z przeprowadzonych badań było stwierdzenie, że zwiększeniu stopnia ukierunkowania włókien towarzyszy również wzrost zawartości faz piezoelektrycznych (do 94,5 %).

Interesujących wyników dostarczyły badania komórkowe, zwłaszcza badania zorientowanych mat poddanych dodatkowej stymulacji ultradźwiękami – materiały charakteryzowały się wyższą przeżywalnością komórek w porównaniu do włókien niestymulowanych.

Kontynuacją prac nad nanowłóknami z PVDF były badania wpływu masy cząsteczkowej i parametrów procesu elektroprzędzenia na zwiększenie właściwości piezoelektrycznych i odpowiedzi komórkowej. Wyniki tych badań zostały opublikowane w *International Journal of Molecular Sciences* (2024). Doktorantka zaobserwowała wyraźny wpływ masy cząsteczkowej na średnicę włókien tylko przy małych prędkościach obrotowych kolektora. Stwierdziła, że wartość współczynnika anizotropii (α) rośnie wraz ze wzrostem prędkości obrotowej kolektora oraz jest najwyższa przy wartości 22 kV przyłożonego napięcia. Przeprowadzone badania wykazały wyraźną zależność współczynnika piezoelektryczności od zawartości faz piezoelektrycznych, a ich obecność korzystanie wpływała na adhezję komórek do podłoża.

Kolejnym wątkiem badawczym przedstawionym w publikacji w czasopiśmie *Micron* (2025) były prace nad wytworzeniem piezoelektrycznych podłoży komórkowych z biodegradowalnego PLLA zawierającego nHA. Nanowłókna wytworzone metodą elektroprzędzenia charakteryzowały się jednolitą strukturą, bez widocznych aglomeratów nHA, a obecność nHA wpłynęła na nieznaczne obniżenia kąta zwilżania powierzchni różnymi cieczami (woda, dijdometan, formamid) dla włókien ukierunkowanych oraz poprawiła zdolność sorpcji wody. Analiza termiczna metodą DSC wykazała, że obecność nHA zaburza proces krystalizacji PLLA, powodując spadek stopnia krystaliczności z 70% do 40% przy zawartości nHA 10% w/v. Ponadto, wyniki badań współczynnika piezoelektryczności wykazały wyraźny wzrost wartości dla włókien zawierających nHA i ukierunkowanych w porównaniu do mat o losowym ułożeniu włókien dzięki pojawieniu się konformacji piezoelektrycznej w fazie amorficznej. Polepszone właściwości odpowiedzi komórkowej w testach z wykorzystaniem linii osteoblastów MG63 również potwierdziły zasadność wprowadzenia nHA i ukierunkowania włókien kompozytowych.

Nowej wiedzy dostarczyły również badania dotyczące wprowadzenia nHA do matrycy PVDF i dodatkowej modyfikacji powierzchniowej nanowłókien bioaktywnymi nanocząstkami złota - AuNPs. Wyniki tych badań zostały opublikowane w czasopiśmie *Molecules* (2025). Wprowadzenie nHA do matrycy PVDF nie spowodowało zaburzenia jednorodności nanowłókien, znacząco za to poprawiło zdolność sorpcji wody. Podobny efekt zaobserwowano dla materiałów z naniesionymi powierzchniowo nanocząstkami złota. Wprowadzenie nHA wpłynęło również na wzrost współczynnika piezoelektryczności, jednak dla AuNPs zaobserwowano spadek tego parametru. Doktorantka wytłumaczyła to zjawisko lokalnym nagrzewaniem włókien podczas sonikacji i możliwą transformacją faz piezoelektrycznych (β i γ w fazę α). Doktorantka przeprowadziła również badania metodą DSC i WAXS określając wartości przemian fazowych i wyliczając stopień krystaliczności. Zbadanie odpowiedzi komórkowej wobec komórek MG-63 wykazało wysoką przeżywalność, zwłaszcza na podłożach o

ukierunkowanym ułożeniu włókien. Otrzymane materiały wykazały również zdolność różnicowania komórek hiPSC-NSC do neuronów.

Podsumowując, stwierdzam, że Doktorantka przedstawiła interesujące, wcześniej nie publikowane wyniki badań, które pozwoliły Jej na udowodnienie postawionej hipotezy badawczej. Należy również podkreślić, że Doktorantka wykazała się dużą umiejętnością dogłębnej analizy wyników przeprowadzonych badań i prawidłowego wnioskowania.

Uwagi dyskusyjne

Rozprawa doktorska Pani mgr inż. Zaczyńskiej ma formę przewodnika po 6 publikacjach, które stanowią cykl powiązanych ze sobą prac o charakterze przeglądowym (dwie publikacje w czasopiśmie *Polymers* oraz cztery publikacje zawierające wyniki prac badawczych). Badania zostały zaprojektowane w sposób logiczny i spójny, a dyskusja wyników odnosząca się do poszczególnych prac ma formę zwięzłego opisu najważniejszych wyników uzyskanych w zrealizowanych pracach. Szata graficzna opracowania jest przejrzysta i zawiera tylko nieliczne błędy stylistyczne (np. na str. 52 Doktorantka pisze „dotychczasowych badań literaturowych” choć raczej powinno być „dotychczasowych doniesień literaturowych”).

Z ciekawości recenzenta proszę o dyskusję nad potencjalnymi przyczynami identycznego zachowania się różnych cieczy: polarnych i niepolarnych (woda i diiodometan) na właściwości zwilżalności powierzchni ukierunkowanych i nieukierunkowanych włókien PLLA zawierających nHA.

Podsumowując stwierdzam, że nie wnoszę uwag do interpretacji wyników i sposobu przeprowadzenia badań.

Wnioski końcowe

Przedstawiona do recenzji praca doktorska Pani mgr inż. Angeliki Zaczyńskiej dostarczyła nowych wyników badań nad materiałami piezoelektrycznymi w kontekście ich potencjalnego wykorzystania w inżynierii tkankowej, zwłaszcza tkani nerwowej i kostnej. Praca wnosi cenny wkład w aspekty poznawcze dotyczące wytwarzania nanowłókien polimerowych i kompozytowych techniką elektroprzędzenia z wykorzystaniem polimerów piezoelektrycznych i dodatków o podobnych właściwościach. Doktorantka przeprowadziła szczegółowe badania nad strukturą i właściwościami nowych, nieopisanych w literaturze materiałów, w tym określając ich zachowanie w kontakcie z czterema liniami komórkowymi. Wykazała, że właściwości piezoelektryczne zależą od kierunkowości włókien i stopnia uporządkowania fazy piezoelektrycznych oraz że korzystanie wpływają one na właściwości biologiczne *in vitro*. Doktorantka wniosła również nową wiedzę na temat zależności pomiędzy masami cząsteczkowymi polimerów oraz warunkami wytwarzania nanowłókien metodą elektroprzędzenia a właściwościami piezoelektrycznymi i morfologią włókien z PLLA i PVDF.

Warto podkreślić, że Kandydatka do stopnia doktora jest współautorką sześciu artykułów opublikowanych w indeksowanych czasopismach, będąc we wszystkich pracach pierwszym Autorem. Całkowity dorobek naukowy Doktorantki jest bardzo obszerny – składają się na niego 26 publikacji w czasopismach i 19 publikacji konferencyjnych. Doktorantka zrealizowała trzy krótkoterminowe staże zagraniczne: jeden w USA i dwa w Niemczech.

Biorąc pod uwagę osiągnięte wyniki i sposób ich interpretacji, stwierdzam iż przedłożona do recenzji praca doktorska mgr inż. Angeliki Zaczyńskiej spełnia warunki przewidziane ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (art. 187).

Dlatego wnoszę o przyjęcie rozprawy i dopuszczenie Pani mgr inż. Angeliki Zaczyńskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz do publicznej obrony.

Ponadto, biorąc pod uwagę wyniki uzyskane w pracy doktorskiej, w tym opisanie po raz pierwszy układów piezoelektrycznych na podstawie PVDF i PLLA zawierających nHA, wysoki poziom merytoryczny dyskusji zawartej w przewodniku oraz wysoką jakość publikacji, które ukazały się w wiodących czasopismach (sumaryczny IF czasopism=22,3), wnoszę o wyróżnienie pracy doktorskiej Pani mgr inż. Angeliki Zaczyńskiej.

Szczecin, 17.04.2026 r.

