

dr hab. inż. Ewa Stodolak-Zych, prof AGH
Akademia Górniczo-Hutnicza im. St. Staszica w Krakowie
Wydział Inżynierii Materiałowej i Ceramiki
Katedra Biomateriałów i Kompozytów

Kraków dn. 7.04.2026

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgr inż. Angeliki Zaszczyńskiej

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

rozprawa doktorska realizowana w Samodzielnej Pracowni Polimerów i Biomateriałów
pod kierunkiem

prof. dr hab. inż. Pawła Łukasza Sajkiewicza

promotor

dr inż. Arkadiusza Dominika Gradysa

promotor pomocniczy

na zlecenie Rady Naukowej Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk, na podstawie decyzji ww. Rady Naukowej IPPT PAN z dnia 5 lutego 2026 (pismo z dnia 6 lutego 2026).

Wstęp

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska została oceniona na podstawie następujących kryteriów:

1. Prawidłowość zdefiniowania problemu naukowego i jego oryginalność
2. Poprawność celów i hipotez badawczych oraz poziomu ich weryfikacji
3. Poprawność prezentacji wyników badań i wnioskowania
4. Umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

1. Zdefiniowanie problemu badawczego i jego oryginalność

Mechanotransdukcja, rozumiana jako proces przekształcania bodźców mechanicznych w sygnały biochemiczne, stanowi jeden z kluczowych mechanizmów regulujących odpowiedź komórek na właściwości biomateriałów. Właściwości fizykochemiczne podłoża, takie jak sztywność, topografia czy skład chemiczny, wpływają na aktywację szlaków sygnałowych odpowiedzialnych za proliferację, migrację i różnicowanie komórek.

W ostatnich latach rośnie zainteresowanie materiałami zdolnymi do aktywnego oddziaływania na komórki, określanymi jako materiały inteligentne (*smart materials*). W tej grupie szczególne miejsce zajmują biomateriały piezoelektryczne, które pod wpływem odkształceń mechanicznych generują lokalne sygnały elektryczne, potencjalnie modulujące środowisko komórkowe. Choć efekt ten jest ściśle powiązany z mechanotransdukcją, wiele badań

koncentruje się obecnie na opracowaniu materiałów zdolnych do generowania takich bodźców, stanowiących podstawę dla dalszych analiz biologicznych.

W tym kontekście istotne znaczenie mają polimerowe materiały piezoelektryczne, takie jak poli(fluorek winylidenu) (PVDF) oraz biodegradowalne poliestry, w tym poli(L-kwas mlekowy) (PLLA). Szczególnie obiecującą formą tych materiałów są struktury włókniste otrzymywane metodą elektroprzędzenia, które łączą wysoką porowatość i rozwiniętą powierzchnię właściwą z możliwością indukcji uporządkowania faz krystalicznych odpowiedzialnych za właściwości piezoelektryczne. Dodatkowo, modyfikacja takich układów poprzez wprowadzenie nanonapełniaczy, takich jak nanocząstki złota czy hydroksyapatytu, pozwala na kształtowanie zarówno właściwości elektroaktywnych, jak i biofunkcjonalnych materiałów. W rezultacie otrzymywane podłoża mogą pełnić rolę platform sprzyjających oddziaływaniom komórka–materiał, integrując efekty topograficzne, mechaniczne i elektroaktywne.

Tematyka pracy wpisuje się w aktualne trendy badań nad biomateriałami funkcjonalnymi, koncentrując się nie tyle na bezpośrednim badaniu mechanotransdukcji, co na projektowaniu i charakterystyce materiałów, które mogą stanowić jej istotny element w przyszłych zastosowaniach inżynierii tkankowej.

Recenzowana rozprawa przedstawiona jest do oceny w formie cyklu sześciu tematycznie powiązanych publikacji opublikowanych w latach 2020–2025, poprzedzonych przewodnikiem o objętości 52 stron. Dokumentacja zawiera również oświadczenia współautorów, potwierdzające wiodącą rolę Doktorantki w realizacji prac stanowiących podstawę do ubiegania się o stopień doktora w dziedzinie inżynierii materiałowej. Przedstawiony cykl publikacji wskazuje na konsekwentnie realizowaną strategię badawczą ukierunkowaną na rozwiązywanie istotnych problemów zidentyfikowanych w literaturze. Dwa spośród przedstawionych artykułów mają charakter przeglądowy i dotyczą odpowiednio materiałów inteligentnych opartych na efekcie piezoelektrycznym oraz ich potencjalnego zastosowania w regeneracji tkanki nerwowej i kostnej. Prace te stanowią logiczne wprowadzenie do dalszych badań, porządkując aktualny stan wiedzy oraz identyfikując kluczowe wyzwania badawcze. Pozostałe cztery manuskrypty mają charakter eksperymentalny i koncentrują się na wytwarzaniu oraz charakterystyce włóknistych podłoży polimerowych o właściwościach piezoelektrycznych. W pracach tych Doktorantka podejmuje próbę optymalizacji procesu otrzymywania materiałów, a także analizy zależności pomiędzy ich właściwościami strukturalnymi, powierzchniowymi i elektroaktywnymi a odpowiedzią komórkową. Takie podejście wpisuje się w zidentyfikowaną wcześniej potrzebę prowadzenia badań zintegrowanych, łączących charakterystykę materiałową z analizą funkcjonalną w kontekście mechanotransdukcji.

Na szczególne podkreślenie zasługuje zarówno liczba, jak i poziom opublikowanych prac, co znajduje odzwierciedlenie w parametrach bibliometrycznych czasopism (IF w zakresie 1,2–4,9), jak również w liczbie cytowań (2–128 według stanu na dzień 7.04.2026). Wskaźniki te potwierdzają nie tylko aktywność naukową Doktorantki, ale również aktualność i istotność podejmowanej tematyki badawczej. Całość przedstawionych prac tworzy spójny tematycznie i metodologicznie dorobek, odpowiadający na aktualne wyzwania w obszarze biomateriałów piezoelektrycznych.

2. Cele i hipotezy badawcze

Sformułowane w pracy cele badawcze mają charakter spójny i dobrze wpisują się w aktualne kierunki rozwoju biomateriałów piezoelektrycznych. Obejmują one nie tylko optymalizację procesu wytwarzania nanowłóknistych podłoży z wykorzystaniem elektroprądzenia, ale również analizę zależności pomiędzy właściwościami strukturalnymi, piezoelektrycznymi i powierzchniowymi materiałów a odpowiedzią komórkową.

W szczególności uwzględnienie takich aspektów, jak wpływ orientacji włókien, stopnia krystaliczności, udziału fazy piezoelektrycznej oraz obecności nanododatków (AuNPs, nHA), wskazuje na kompleksowe podejście do projektowania materiałów oraz próbę powiązania ich właściwości fizykochemicznych z funkcją biologiczną. W pracy podejmowane są również próby interpretacji obserwowanych różnic w strukturze materiałów, w tym w szczególności w zakresie krystaliczności i udziału fazy piezoelektrycznej, co świadczy o dążeniu do lepszego zrozumienia zjawisk zachodzących w badanych układach, mimo że ich jednoznaczne wyjaśnienie nie zawsze jest możliwe.

Na tym tle hipoteza badawcza sformułowana w pracy, zakładająca *możliwość wytworzenia biozgodnych, nanowłóknistych podłoży o właściwościach piezoelektrycznych z wykorzystaniem odpowiednich polimerów oraz procesu elektroprądzenia*, ma charakter ogólny i koncentruje się przede wszystkim na wykazaniu wykonalności takiego podejścia. W tym ujęciu ma ona charakter raczej technologiczny niż mechanistyczny. Jednocześnie można zauważyć, że pełne brzmienie hipotezy w warstwie językowej mogłaby zostać doprecyzowane, w szczególności w zakresie jednoznacznego określenia relacji pomiędzy inżynierią tkankową a regeneracją tkanek (...*podłoża w zastosowaniach w inżynierii tkankowej do regeneracji tkanki nerwowej i kostnej*).

Biorąc jednak pod uwagę zakres celów szczegółowych oraz ich realizację, należy stwierdzić, że praca wykracza poza tak ogólnie sformułowaną hipotezę, podejmując próbę analizy zależności pomiędzy strukturą materiału, jego właściwościami piezoelektrycznymi a odpowiedzią biologiczną. Brzmienie hipotezy nie wpływa negatywnie na wartość naukową rozprawy, której zakres i sposób realizacji odpowiada aktualnym wyzwaniom badawczym w obszarze biomateriałów piezoelektrycznych oraz ich potencjalnych zastosowań w inżynierii tkankowej czy medycynie regeneracyjnej.

Zakres przeprowadzonych badań oraz liczba zrealizowanych prac eksperymentalnych są obszerne, a jednocześnie stanowią spójny i konsekwentnie realizowany program badawczy. Uzyskane wyniki przybliżają Doktorantkę do identyfikacji oraz opracowania materiału o najbardziej korzystnych właściwościach z punktu widzenia odpowiedzi komórkowej. Otrzymane rezultaty porządkują aktualny stan wiedzy na temat biomateriałów piezoelektrycznych i stanowią istotny wkład Doktorantki w rozwój dyscypliny inżynierii materiałowej.

3. Ocena poprawność prezentacji wyników badań i wnioskowania

Przewodnik poprzedzający cykl publikacji ma przejrzystą i logiczną strukturę, obejmującą siedem podrozdziałów. Zawiera on krótkie wprowadzenie, a następnie koncentruje się na przedstawieniu celów badawczych oraz sformułowaniu hipotezy badawczej (podrozdziały 1–3). Kolejne części (rozdziały 4–5) obejmują opis materiałów i metod zastosowanych w

realizacji badań. Włączenie szczegółowego opisu metod do przewodnika, mimo że analogiczne informacje zawarte są również w poszczególnych publikacjach, można uznać za element ułatwiający odbiór całości rozprawy, choć jego zasadność z formalnego punktu widzenia może być przedmiotem dyskusji. Ostatnie części przewodnika (rozdziały 6–7) obejmują wykaz publikacji wchodzących w skład rozprawy, zestawienie danych bibliometrycznych oraz syntetyczne podsumowania poszczególnych prac.

Z uwagi na fakt, że wszystkie prace wchodzące w skład cyklu zostały wcześniej poddane procesowi recenzji i publikacji w czasopismach naukowych, poniższe uwagi mają charakter uzupełniający, porządkujący i dyskusyjny, a nie zasadniczo oceniający poprawność przedstawionych wyników.

1. Pierwsze dwie prace przeglądowe dotyczą materiałów piezoelektrycznych, których potencjał aplikacyjny odnosi się do tkanek szczególnie wrażliwych na zmiany ładunku elektrycznego, a tym samym podatnych na oddziaływanie efektu piezoelektrycznego. Obie publikacje — *Piezoelectric scaffolds as smart materials for neuronal tissue engineering* oraz *Piezoelectric scaffolds as smart materials for bone tissue engineering* — stanowią uporządkowane opracowania aktualnego stanu wiedzy w tym obszarze. Widoczna jest również ewolucja podejścia Autorki — druga z publikacji prezentuje wyższy stopień uporządkowania literatury oraz bardziej wyraźne powiązanie pomiędzy właściwościami materiałów piezoelektrycznych a odpowiedzią biologiczną.

Jednocześnie w obu pracach można wskazać pewne ograniczenie polegające na braku wyraźnie zdefiniowanej syntezy wyników literaturowych w postaci jednoznacznych wniosków końcowych. Mimo że w drugiej publikacji zidentyfikowano luki badawcze oraz wskazano kierunki dalszych badań, ich przełożenie na konkretne implikacje projektowe pozostaje niewystarczająco wyeksponowane. W związku z tym zasadne byłoby silniejsze podkreślenie relacji pomiędzy projektowaniem materiałów piezoelektrycznych a ich zastosowaniami w inżynierii tkankowej oraz wynikających z tego kierunków dalszego rozwoju tej grupy materiałów. Pojawia się pytanie: **jakie syntetyczne wnioski można sformułować na podstawie przedstawionych analiz literatury w odniesieniu do relacji pomiędzy projektowaniem materiałów piezoelektrycznych a ich zastosowaniami oraz ich dalszym rozwojem?**

2. W manuskrypcie *Influence of process–material conditions on the structure and biological properties of electrospun PVDF fibers* Doktorantka przedstawia badania eksperymentalne obejmujące wytwarzanie włókien PVDF oraz ich charakterystykę strukturalną, mikrostrukturalną i biologiczną. Istotnym elementem pracy są również badania z wykorzystaniem stymulacji ultradźwiękowej w celu aktywacji efektu piezoelektrycznego materiału.

Zastosowane warunki odpowiadają niskointensywnej stymulacji ultradźwiękowej i stanowią interesujące podejście do analizy odpowiedzi komórkowej w warunkach dynamicznych. Jednocześnie interpretacja uzyskanych wyników wymaga ostrożności, ponieważ obserwowany efekt może wynikać z nakładających się mechanizmów, takich jak bezpośrednia stymulacja komórek ultradźwiękami, odpowiedź na deformacje mechaniczne materiału indukowane falą akustyczną oraz oddziaływanie środowiska hodowlanego poddanego działaniu ultradźwięków. W konsekwencji obserwowane zjawiska należy traktować jako potencjalną superpozycję tych efektów.

Choć zastosowane parametry mieszczą się w zakresie typowym dla niskointensywnych ultradźwięków, przedstawiony opis nie pozwala jednoznacznie ocenić wpływu

lokalnych warunków fizycznych (np. gradientów naprężeń w medium) ani odróżnić efektów wynikających z działania ultradźwięków od ewentualnych artefaktów związanych z geometrią układu eksperymentalnego.

Proszę o doprecyzowanie geometrii układu, kierunku propagacji fali względem scaffoldu oraz sposobu sprzężenia akustycznego. Istotne jest również wyjaśnienie, czy schematycznie przedstawiona deformacja podłoża (Rys 3.) odpowiada rzeczywistemu mechanizmowi oddziaływania w warunkach eksperymentalnych. Dodatkowo proszę o wskazanie, czy analizowano wpływ ultradźwięków na właściwości strukturalne materiału, w tym stopień krystaliczności PVDF.

3. Kolejna praca z cyklu zaytułowana; *Enhanced electroactive phases of poly(vinylidene fluoride) fibers for tissue engineering applications*, pokazuje, że systematyczna modyfikacja parametrów elektrospinningu pozwala na kontrolę struktury włókien PVDF, w tym zawartości faz elektroaktywnych (β/γ), a uzyskane wyniki potwierdzają potencjalną użyteczność materiału w inżynierii tkankowej. Jednocześnie część wniosków dotyczących zastosowań aplikacyjnych wydaje się opierać głównie na charakterystyce strukturalnej i cytozgodności, bez bezpośrednich testów funkcjonalnych (np. markerów osteogenezy czy modeli bardziej złożonych niż testy metaboliczne lub choćby różnicowania komórkowego – które wymienione jest w streszczeniu pracy).

W tym kontekście proszę o doprecyzowanie, w jakim stopniu przedstawione dane pozwalają na wnioskowanie o rzeczywistym potencjale osteoindukcyjnym lub osteokondukcyjnym analizowanych rusztowań.

W analizie FTIR-ATR wykorzystano widma do oszacowania udziału faz krystalicznych β i γ , które determinują właściwości piezoelektryczne materiału. Należy jednak zauważyć, że w przypadku materiałów włóknistych, takich jak elektroprzędzone włókniny PVDF, jakość kontaktu próbki z kryształem ATR może być niejednorodna, co wpływa na intensywność rejestrowanych pasm i powtarzalność pomiarów. Dodatkowo zastosowanie stosunkowo niewielkiej liczby skanów może skutkować obniżonym stosunkiem sygnału do szumu, co również może wpływać na dokładność wyznaczania udziału poszczególnych faz. W konsekwencji uzyskane wyniki należy interpretować przede wszystkim jako porównania względne w obrębie analizowanej serii materiałów, z zachowaniem ostrożności przy ich traktowaniu jako danych ilościowych. **Zasadne jest pytanie, w jakim stopniu przedstawiona analiza pozwala na wiarygodne różnicowanie zawartości faz elektroaktywnych oraz czy uwzględniono potencjalne ograniczenia wynikające ze specyfiki badanych materiałów i warunków pomiaru.** W kolejnych publikacjach Doktorantka wykorzystuje różne techniki do charakterystyki strukturalnej materiałów, w tym FTIR-ATR do oceny udziału faz elektroaktywnych oraz WAXS i DSC do analizy faz krystalicznych i stopnia krystaliczności. Jednocześnie wskazane są ograniczenia każdej z tych metod, co jest istotnym i trafnym elementem dyskusji. W tym kontekście zasadne wydaje się pytanie, czy podejmowano próbę korelacji wyników uzyskanych różnymi technikami, w szczególności pomiędzy udziałem faz piezoelektrycznych (β/γ) a stopniem krystaliczności materiału. Tego typu podejście mogłoby nie tylko pomóc w lepszym zrozumieniu zależności struktura-właściwości, ale również stanowić dodatkowy argument w ocenie wiarygodności i spójności stosowanych metod pomiarowych (FTIR, WAXS, DSC).

Czy, zdaniem Autorki, możliwe jest wskazanie metody (lub zestawu metod), która w sposób najbardziej reprezentatywny odzwierciedla rzeczywistą zawartość faz piezoelektrycznych w analizowanych materiałach?

4. W artykule *On the structural and biological effects of hydroxyapatite and gold nano-scale particles in poly(vinylidene fluoride) smart scaffolds for bone and neural tissue engineering* gdzie włókna polimerowe modyfikowano nanaocząstkami o charakterze piezoelektrycznym przeprowadzona analiza w zakresie porowatości a szczególnie wielkości porów wymaga wyjaśnienia. Problem ten pojawia się również w poprzednich pracach ale z racji braku tabelarycznego zestawiania – to tu pojawia się dość wyraźnie. Obliczenia porowatości i wielkości porów opierają się na teoretycznych założeniach, które wydają się różnić od rzeczywistej morfologii materiału, widocznej na obrazach SEM. Jeśli średnia średnica włókien wynosi od 290 ± 30 nm (dla PVDF/nHA_A przy wyższej prędkości obrotowej kolektora) do 903 ± 54 nm (dla PVDF_R przy niskiej prędkości obrotowej) a średnia wielkość porów wyznaczona na podstawie metody grawimetrycznej wynosi od 200 nm do 250 nm (podawana jest z dokładnością do 10nm, tabela 1) to jak to się ma do zdjęć SEM pokazujących, że wielkość porów znacząco przekracza $1 \mu\text{m}$? **Proszę o komentarz lub propozycje, jak uzyskać wiarygodną wartość porowatości i/lub wielkości porów uwzględniając przestrzenie między włóknami. Czy w takim przypadku należy podawać tak dokładne dane liczbowe?**

Dodatkowo z racji pełnionej roli recenzenta czuję się zobowiązana do wskazania kilku uchybień o charakterze edytorskim i metodologicznym, które pojawiają się w przedstawionym cyklu publikacji. Dotyczą one m.in. powtórzenia rysunku w publikacji nr 3 (Rys 11), niepełnego przedstawienia danych dotyczących porowatości w publikacji nr 5 (informacja w tekście odnosi się jedynie do części analizowanych materiałów) oraz braku niektórych informacji metodycznych, takich jak rodzaj kryształu zastosowanego w przystawce ATR. Uwagi te mają charakter porządkujący i praktyczny, stanowiąc wskazówkę w dalszej pracy naukowej, i nie wpływają na ogólną, wysoką ocenę opracowań. Przedstawione wyniki badań oraz ich pogłębiona interpretacja dotyczą złożonego i aktualnego zagadnienia, jakim są materiały inteligentne, w tym materiały piezoelektryczne modyfikowane poprzez drugą faz (np. dodatki nanometryczne), jak i sposób formowania (elektroprzędzenie włókien o różnej orientacji). Uzyskane rezultaty mają istotne znaczenie poznawcze i przyczyniają się do lepszego zrozumienia czynników wpływających na właściwości tych materiałów. W szczególności wskazują, że nie tylko masa cząsteczkowa polimeru, ale również parametry procesu formowania oraz obecność nanododatków odgrywają kluczową rolę w kształtowaniu ich właściwości piezoelektrycznych i funkcjonalnych.

Podsumowując, istotną wartością rozprawy jest silny komponent badań podstawowych, który w odniesieniu do analizowanych materiałów potwierdza dobre przygotowanie Doktorantki do samodzielnej pracy naukowej.

4. Umiejętność samodzielnej prowadzenia pracy naukowej oraz dorobek naukowy

Rozprawa doktorska mgr inż. Angeliki Zaszczyńskiej stanowi oryginalną pracę naukowo-badawczą osadzoną w aktualnym stanie wiedzy z zakresu inżynierii materiałowej, chemii polimerów oraz inżynierii biomedycznej. Doktorantka poprawnie zdefiniowała problemy naukowe, opierając je na opracowanych przeglądach literaturowych opublikowanych

w czasopismach z obszaru inżynierii materiałowej (*Polymers*) oraz chemii bioorganicznej (*Biuletyn PAN, Micron, IJMS, Molecules*). W kolejnych pracach prezentowała spójne i systematyczne podejście do postawionych problemów badawczych, a poprawność wnioskowania była weryfikowana na etapie recenzji w czasopismach naukowych (m.in. *Polymers* – MDPI, *Micron* – Elsevier, *Molecules* – MDPI). We wszystkich sześciu publikacjach Doktorantka jest pierwszym autorem, a w dwóch również autorem korespondencyjnym.

Planowanie eksperymentów ukierunkowanych na rozwiązanie problemu naukowego oraz rzetelna analiza uzyskanych wyników świadczą o dużej sprawności naukowej Doktorantki. Przedstawiony cykl publikacji oraz wiodąca rola Doktorantki w jego realizacji potwierdzają jej umiejętność samodzielnego planowania, prowadzenia i analizy wyników badań, a jednocześnie – ze względu na interdyscyplinarny charakter pracy – wskazują na zdolność efektywnej współpracy zespołowej, co stanowi istotną cechę młodego badacza. Potwierdza to również bogaty dorobek naukowy Doktorantki (w sumie 26 publikacji naukowych i 19 abstraktów konferencyjnych, 3 staże naukowe w ośrodkach zagranicznych).

Przedstawione w recenzji uwagi w żaden sposób nie wpływają na wysoką ocenę cyklu publikacji zatytułowanego: *Piezoelektryczne polimerowe nanowłókna jako inteligentne podłoża komórkowe do zastosowań w inżynierii tkankowej*. Tym samym stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Angeliki Zaszczynskiej stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Praca spełnia wymagania określone w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. W związku z powyższym wnioskuję o dopuszczenie rozprawy pani mgr inż. Angeliki Zaszczynskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego oraz publicznej obrony.

Stefan Zych