

dr hab. inż. Danuta Matykiewicz, prof. PP

Poznań, 23.01.2026 r.

Politechnika Poznańska

Wydział Inżynierii Mechanicznej

Instytut Technologii Materiałów

ul. Piotrowo 3, 61-138 Poznań

RECENZJA

Rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. **Natalii Puszczkowskiej**

pt. **„Biodegradowalne kompozyty piezoelektryczne na bazie polilaktydu otrzymywane metodą wytłaczania”**

1. Podstawa opracowania recenzji

Podstawą formalną przygotowania niniejszej recenzji rozprawy doktorskiej, jest uchwała Rady Dziedziny Nauk Inżynieryjno-Technicznych Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy z dnia 17 listopada 2025, zgodnie z Ustawą z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2024 r., poz.1571), oraz zlecenie Przewodniczącego Rady Dziedziny Nauk Inżynieryjno-Technicznych Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy Pana dr hab. inż. Mieczysława Cieszko, prof. uczelni z dnia 17 listopada 2025.

2. Ogólna charakterystyka

Przedstawiona do oceny rozprawa Pani mgr inż. Natalii Puszczkowskiej pt. **„Biodegradowalne kompozyty piezoelektryczne na bazie polilaktydu otrzymywane metodą wytłaczania”** została zrealizowana pod kierunkiem Pana dr hab. Piotra Rytlewskiego, prof. uczelni oraz prof. dr hab. inż. Marka Macko w dyscyplinie inżynieria materiałowa na Wydziale Inżynierii Materiałowej Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy. Praca dotyczy badań nad biodegradowalnymi kompozytami piezoelektrycznymi na bazie polilaktydu wytwarzanymi metodą wytłaczania. Nowe materiały kompozytowe charakteryzowały się zarówno właściwościami piezoelektrycznymi jak i podatnością na biodegradację, a wstępne testy nie wykazały ich cytotoksyczności. Świadczy to o potencjale aplikacyjnym badanych materiałów w zakresie opracowywania resorbowalnych biomateriałów o właściwościach piezoelektrycznych.

3. Ocena rozprawy doktorskiej

Ocena układu rozprawy doktorskiej oraz informacje o jej poszczególnych częściach składowych

Recenzowaną rozprawę doktorską stanowi praca pisemna, która obejmuje 181 stron w tym 26 stron stanowi spis literatury, 28 tabel i 72 rysunki. Układ pracy jest przejrzysty i typowy dla prac doktorskich. Rozprawę rozpoczyna wykaz skrótów i oznaczeń użytych w pracy, a następnie pkt. 1 zawierający wprowadzenie do tematu badań. W rozdziale 2 obejmującym 58 stron autorka w dziewięciu podrozdziałach pkt. 2.1-2.9 analizuje aktualny stan wiedzy z zakresu badanego tematu, opisuje fizyczne podstawy efektu piezoelektrycznego, charakteryzuje materiały ceramiczne, polimery i kompozyty piezoelektryczne, przedstawia metody wytwarzania polimerowych materiałów piezoelektrycznych oraz poprawy ich właściwości piezoelektrycznych. Podrozdział 2.7 dotyczy aspektów biodegradowalności i biokompatybilności materiałów PLA w zastosowaniach biomedycznych, podrozdział 2.8 charakteryzuje obszary zastosowania materiałów piezoelektrycznych. W podrozdziale 2.9 podsumowano w 10 punktach przeprowadzoną analizę literatury. Rozdział trzeci zawiera tezę badawczą oraz cele rozprawy, które autorka zdefiniowała na podstawie analizy literatury oraz wyników przeprowadzonych badań wstępnych. Wyróżniono cel poznawczy rozprawy jak również jej cel użytkowy. Rozdział czwarty zawiera opis zastosowanej metodyki badawczej oraz charakterystykę materiałów. W rozdziale 5 w czterech podpunktach opisano przeprowadzone badania wstępne. W rozdziale szóstym w ośmiu podpunktach przedstawiono wyniki badań zasadniczych obejmujące charakterystykę modyfikowanej folii PLA, oraz kompozytów PLA/BT/RF, oznaczenie ich stabilności termicznej, właściwości piezoelektrycznych oraz podatności na biodegradację. Dla kompozytów przeanalizowano również właściwości strukturalne i przetwórcze oraz oceniono ich biogodność i aktywność biologiczną. Pracę kończy rozdział siódmy zawierający wnioski końcowe, streszczenie oraz wykaz literatury.

Ocena zastosowanego piśmiennictwa w ramach rozprawy doktorskiej

Wykaz literatury zawiera 294 pozycje związane z tematem pracy takie jak artykuły, książki oraz normy. Świadczy to o dokładnym poznaniu tematu pracy oraz zaangażowaniu Doktorantki w wyjaśnienie zagadnień opisywanych w rozprawie. Autorka odpowiednio zastosowała dostępne piśmiennictwo zarówno w języku angielskim jak i polskim. Niewątpliwie, prezentowana rozprawa stanowić będzie cenne źródło wiedzy oraz wartościową pozycję literaturową. Należy podkreślić, że w przyszłości może być podstawą do przygotowania

podobnej pracy przeglądowej podsumowującej osiągnięcia Doktorantki oraz całego zespołu. Spora część zacytowanej literatury pochodzi z lat 2010-2025. We wprowadzeniu do pracy zacytowano aż 40 artykułów; taka duża ilość publikacji przywołana na trzech stronach mogłaby być poparta szerszą dyskusją w następnych rozdziałach.

Wskazanie oraz ocena celu pracy

Podstawowym celem poznawczym rozprawy było zbadanie wpływu ryboflawiny (RF) na biodegradację i właściwości piezoelektryczne wytłaczanych folii z polilaktydu (PLA), zawierających jednocześnie ceramiczny napelniacz piezoelektryczny - tytanian baru (BT). Realizacja celu poznawczego wymagała przeprowadzenia szeregu badań podstawowych, co pozwoliło na rozszerzenie wiedzy z zakresu inżynierii materiałowej na temat biodegradowalnych kompozytów piezoelektrycznych na bazie polilaktydu. Celem użytkowym rozprawy było opracowanie podstaw technologii wytwarzania folii piezoelektrycznej o zwiększonej biodegradowalności. W celu udowodnienia tezy wykonano badania o charakterze interdyscyplinarnym z zakresu przetwórstwa tworzyw polimerowych, mechaniki, elektromechaniki, analizy termicznej oraz badań biologicznych.

Należy podkreślić, że autorka sformułowała poprawnie tezę badawczą rozprawy oraz ją udowodniła i poparła szeregiem wyników badań. Założone cele były słuszne oraz zostały prawidłowo zrealizowane.

Wskazanie oraz ocena zastosowanych metod badawczych

Zastosowane metody badawcze zostały prawidłowo dobrane dla analizowanego materiału badawczego oraz jego właściwości. Opis poszczególnych metod został przedstawiony na 18 stronach w rozdziale czwartym, w którym scharakteryzowano także zastosowane materiały: poli(kwas mlekowy), tytanian baru i ryboflawina oraz sposoby ich przetwarzania. Badania właściwości wytworzonych kompozytów oraz folii przeprowadzono w następujących jednostkach badawczych: w Instytucie Materiałów Polimerowych Sieci Badawczej Łukasiewicz, w Katedrze Inżynierii Materiałów Polimerowych i w Katedrze Fizjologii i Toksykologii Uniwersytetu Kazimierza Wielkiego w Bydgoszczy oraz w Laboratorium Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii Politechniki Wrocławskiej. Co wskazuje na umiejętność Doktorantki do prowadzenia badań w szerokim gronie naukowym oraz nawiązywania współpracy pomiędzy jednostkami badawczymi.

Wykonano następujące analizy: oznaczenie masowego wskaźnika szybkości płynięcia (MFR), analizę termogravimetryczną (TGA), skaningową mikroskopię elektronową (SEM), testy wytrzymałości na rozciąganie, analizę dynamiczno-mechaniczną (DMA), różnicową

kalorymetrię skaningową (DSC), ocenę właściwości piezoelektrycznych w warunkach obciążenia skręcającego, oznaczenie współczynnika d_{33} metodą Berlincourta, oznaczenie współczynnika d_{33} metodą statyczną z wykorzystaniem elektrometru, badania podatności kompozytów na działanie mikroorganizmów i wyznaczenie stopnia dezintegracji kompozytów, ocenę reaktywności biologicznej badanych materiałów i ocenę ich cytotoksyczności.

Ocena części rozprawy doktorskiej dotyczącej omówienia wyników badań

W pracy przedstawiono na 20 stronach wyniki badań wstępnych oraz na 42 stronach wyniki badań zasadniczych. Uzyskane rezultaty badań wstępnych zebrane w pkt 5 obejmowały ocenę efektywności procesu wytwarzania kompozytu PLA/BT oraz wpływu BT na właściwości mechaniczne, termomechaniczne i piezoelektryczne oraz podatności na działanie mikroorganizmów dla kompozytu PLA/BT. Stanowią one ważną część pracy ponieważ pozwoliły na realizację założonych celów, potwierdziły, że wytworzone dobraną techniką kompozytowe folie płaskie z PLA wykazały efekt piezoelektryczny d_{33} , którego wartość rosła wraz ze wzrostem zawartości tytanianu baru. Również kompozyty PLA/BT wykazały zwiększoną podatność na biodegradację, jednakże uzyskany efekt był umiarkowany.

W pierwszym etapie badań zasadniczych oceniono wpływ dodatku ryboflawiny na strukturę i właściwości polilaktydu, z uwzględnieniem możliwości uzyskania odpowiedzi napięciowej przy skręcaniu (d_{14}) oraz poprawy podatności materiału na kolonizację mikrobiologiczną. W drugim etapie badań wytworzono kompozyty PLA/BT modyfikowane RF i oceniono ich strukturę, właściwości przetwórcze, stabilność termiczną metodą TGA, wytrzymałość na rozciąganie, właściwości termomechaniczne metodą DMA, właściwości termiczne metodą DSC, właściwości piezoelektryczne (d_{33}), podatność na biodegradację, biogodność i aktywność biologiczną.

Przedstawiona analiza wyników jest przejrzysta, a ich prezentacja w formie tabel i wykresów czytelna. Znaczenie uzyskanych rezultatów poparto odniesieniem do literatury oraz wnioskami własnymi. Przeprowadzona i opisana interpretacja potwierdza odpowiednie zaplanowanie prac badawczych oraz dobór metodologii analitycznej. Należy podkreślić szerokie i interdyscyplinarne podejście do badanego zagadnienia, co niewątpliwie świadczy o dużej dojrzałości naukowej Doktorantki.

Informacje dotyczące praktycznego zastosowania uzyskanych wyników badań

Materiały piezoelektryczne znajdują szerokie zastosowania w technice i medycynie, jednakże popularnie stosowane polimery np. polifluorek winylidenu (PVDF) charakteryzują się ograniczoną biodegradowalnością, z kolei aktywność piezoelektryczna polilaktydu (PLA) jest

niska. Uzyskane wyniki badań mogą stanowić podstawę do projektowania nowoczesnych, funkcjonalnych materiałów przeznaczonych do zastosowań implantologicznych, a wytworzone materiały kompozytowe charakteryzują się dużym potencjałem aplikacyjnym. Z powodzeniem wykazano, że wprowadzenie ryboflawiny (RF) do kompozytów PLA/BT zwiększa ich podatność na biodegradację przy jednoczesnym zachowaniu właściwości piezoelektrycznych. Ponadto do celów polaryzacji elektrycznej kompozytów opracowano nowe stanowisko badawcze oraz procedurę polaryzacji. Należy również podkreślić, że przedstawione wyniki stanowią podstawę do kontynuacji prac badawczych nad zastosowaniem tego typu modyfikowanego polilaktydu w technologii druku 3D przestrzennych struktur biomedycznych do zastosowań implantologicznych.

Informacja o zapoznaniu się z wynikiem badania rozprawy w Jednolitym Systemie Antyplagiatowym

Zapoznałam się i akceptuję wynik badania w Jednolitym Systemie Antyplagiatowym dla recenzowanej rozprawy Pani mgr inż. Natalii Puszczykowskiej.

Ocena czy rozprawa doktorska stanowi oryginalne rozwiązanie problemu naukowego

W ostatnich latach zastosowanie materiałów piezoelektrycznych w regeneracji kości oraz tkanek miękkich, jest intensywnie badane. W tym aspekcie oceniana jest zdolność materiału do generowania sygnałów elektrycznych pod wpływem obciążeń mechanicznych. Aby w pełni wykorzystać cechy polimerowych materiałów piezoelektrycznych, powinny one być ponadto biokompatybilne, biodegradowalne oraz stymulować naturalne procesy regeneracyjne, szczególnie w przypadku implantów resorbowalnych. Tytanian baru jest szeroko stosowanym piezoelektrykiem bezołowiowym, dowiedziono także, że nie wywiera negatywnego wpływu na ludzkie komórki. Polilaktyd to biopochodny, biodegradowalny i biozgodny polimer, jednak prowadzone są intensywne badania nad metodami przyspieszenia jego degradacji w organizmie ludzkim. W dostępnych doniesieniach dowiedziono także, że polilaktyd modyfikowany ryboflawiną może pełnić rolę generatora piezoelektrycznego i wspomagać gojenie ran.

Dlatego też podjęta tematyka badań w obszarze inżynierii materiałowej dotycząca opracowania kompozytów piezoelektrycznych, które łączą cechy elastycznych polimerów z ceramicznymi domieszkami o wysokiej aktywności funkcjonalnej stanowi aktualny obszar badawczy. Przeprowadzone badania oraz ich interpretacja mają istotne znaczenie poznawcze. Doktorantka w oparciu o przegląd literatury określiła następujące luki badawcze:

- brak badań łączących ocenę właściwości piezoelektrycznych materiałów na bazie PLA z analizą ich degradacji biologicznej oraz oddziaływania na żywe komórki,

- brak jednoznacznych danych dotyczących skutecznych metod wytwarzania kompozytów PLA/BT o wysokim napelnieniu, jednorodnej strukturze i powtarzalnych właściwościach,
- brak kompozytów piezoelektrycznych na bazie polilaktydu o zwiększonej podatności na biodegradację, odpowiednich właściwości strukturalnych i funkcjonalnych dla zastosowań implantologicznych, gdzie materiał powinien ulec rozkładowi po spełnieniu swojej funkcji, w określonym czasie.

W odpowiedzi na zdefiniowane luki, wykonane badania miały ważny charakter poznawczy i pozwoliły na sformułowanie wniosków o charakterze użytecznym. Podsumowując stwierdzam, że w rozprawie doktorskiej przedstawiono oryginalne wyniki badań dotyczące opracowania kompozytów piezoelektrycznych na bazie polilaktydu, a wyniki stanowią istotną wartość naukową.

Ocena czy rozprawa doktorska prezentuje ogólną wiedzę teoretyczną kandydata w dyscyplinie oraz umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej

Przygotowany obszerny przegląd literatury, opis i analiza uzyskanych wyników badań wstępnych i zasadniczych potwierdzają, że Pani mgr inż. Natalia Puszczykowska posiada umiejętności samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. W mojej ocenie rozprawa świadczy o wiedzy teoretycznej Doktorantki w dyscyplinie inżynieria materiałowa. Praca napisana jest w sposób dojrzały, poprawny metodycznie i cechuje się odpowiednim poziomem naukowym.

Informacje o ewentualnych nieprawidłowościach, które pojawiły się w ocenianej rozprawie:

Praca została przygotowana bardzo starannie, napisana zrozumiałym i naukowym językiem, również układ graficzny jest czytelny. Pojawiają się nieliczne błędy edytorskie, które nie wpływają na opisywane osiągnięcie naukowe.

Uwagi ogólne

1. Niepoprawne cytowanie literatury:
 - str.18, autorka przywołuje pracę autorstwa Wady, a odnośniki [70,91] dotyczą prac Karaki T. i inni Jpn J Appl Phys 2007 oraz Sezer N, Nano Energy 2021,
 - str. 28 autorka przywołuje pracę autorstwa Curry, a odnośnik [145] dotyczy pracy Fukada E., Proceedings 1999.
2. Na str. 74 autorka używa zwrotu „folii czystego PLA” i na str. 115: „próbki referencyjnej (czyste PLA)” korzystniej byłoby użyć zwrotu niemodyfikowany PLA; podobne określenia „czystego/czyste PLA” pojawiają się na str. 91, 93, 125, 126 i w innych częściach tekstu.

3. Bibliografia jest uporządkowana, niemniej jednak zapis nie jest ujednolicony; nazwy czasopism zapisywane są w pełnej formie np. [2] International Journal of Biological Macromolecules, czasem w formie skrótów np. [22] Mater Chem Front.
4. Str. 111; Na rysunku 45. Opisy osi podano w języku angielskim.
5. Str. 114; Pkt 6.2 Stabilność termiczna PLA z ryboflawiną, zakłada ocenę stabilności termicznej, niemniej opis uzyskanych wyników nie odnosi się bezpośrednio do tej właściwości, a przedstawia termiczne właściwości PLA określone podczas analizy DSC.

Uwagi krytyczne

1. Na str. 94 autorka opisuje że „Ze wzrostem zawartości napelnacza i jednoczesnym zmniejszeniem udziału PLA w materiale, obserwuje się systematyczny spadek zarówno wytrzymałości na rozciąganie, jak i zdolności do odkształceń. ... Zmiany te można powiązać z ograniczoną adhezją międzyfazową oraz redukcją udziału osnowy, odpowiedzialnej za przenoszenie obciążeń.”
Natomiast na str. 95 opisano, że „Początkowo wysokie wartości E’ wskazują na istotny wpływ obecności BT na sztywność kompozytów. Wraz ze wzrostem zawartości napelnacza, E’ utrzymuje się na wyższym poziomie w całym analizowanym zakresie temperatur, co potwierdza wzmocnienie struktury materiału i skuteczne zespolenie fazy ceramicznej z osnową PLA.”
Należałoby wyjaśnić w jaki sposób nastąpiło „skuteczne zespolenie fazy ceramicznej z osnową PLA”, jakie są oddziaływania pomiędzy składnikami w kontekście wyników uzyskanych w próbie rozciągania gdzie podano, że „zmiany właściwości wiążą się z ograniczoną adhezją międzyfazową”.
2. Na str. 106 nie podano jaką metodą determinowano temperatury T_{pocz} (początek rozkładu) i T_{kon} (koniec rozkładu). Należy zdefiniować, w jaki sposób wyznaczano temperaturę początku i temperaturę końca rozkładu dla badanych materiałów.
3. Na str. 108 w zdaniu: autorka pisze, że „Na podstawie przebiegu krzywych stwierdzono, że RF prowadzi do obniżenia T_{max} oraz poszerzenia głównego piku”, należy wyjaśnić z czego wynika taka zmiana i co autorka rozumie poprzez „poszerzenie głównego piku”.
4. Na str. 101 w zdaniu autorka pisze: „Najwyższe wartości (powyżej 30 pC/N) uzyskano przy niskich naciskach dla próbek zawierających 40% obj. BT...” należałoby zdefiniować co oznaczają „niskie naciski”, można by podać zakres.
5. Na str. 136 w zdaniu autorka pisze że „że RF pełni rolę promotora biodegradacji”, warto byłoby opisać ten efekt i odnieść do literatury.

Przedstawione uwagi krytyczne nie obniżają wartości merytorycznej recenzowanej rozprawy, ale zwracają uwagę na zachowanie większej uważności podczas redagowania pracy. Doktorantka odpowiednio wykonała i opisała wyniki prac doświadczalnych, podsumowała zrealizowane działania badawcze, cechujące się odpowiednim poziomem naukowym. Postawiona w pracy hipoteza została zweryfikowana poprawnie.

4. Podsumowanie

Cel pracy określony i zdefiniowany w recenzowanej rozprawie został w pełni osiągnięty przez Doktorantkę, która wykazała się znajomością wiedzy z różnych obszarów nauki, zarówno inżynierii materiałowej, przetwórstwa polimerów, metod analizy właściwości elektrycznych, biologicznych, termicznych, strukturalnych i mechanicznych materiałów, jak również przygotowana jest do prowadzenia badań naukowych na dalszych etapach kariery.

Podsumowując stwierdzam, że będąca przedmiotem niniejszej recenzji rozprawa doktorska Pani mgr inż. Natalii Puszczykowskiej pt. „***Biodegradowalne kompozyty piezoelektryczne na bazie polilaktydu otrzymywane metodą wytłaczania***” spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim wynikające z art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (t. j. Dz. U. z 2024 poz. 1571). W związku z powyższym **wnoszę o przyjęcie rozprawy doktorskiej i dopuszczenie** Pani mgr inż. Natalii Puszczykowskiej do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony.

Ponadto mając na uwadze wysoki poziom naukowy przeprowadzonych prac badawczych i znaczący wkład w rozwój dyscypliny inżynierii materiałowej wynikający z interdyscyplinarnego podejścia oraz użyteczny charakter wnoszę o wyróżnienie pracy.

dr hab. inż. Danuta Matykiewicz, prof. Politechniki Poznańskiej