



dr hab. inż. Anna Janina Dolata, prof. PŚ
Wydział Inżynierii Materiałowej
i Cyfryzacji Przemysłu
Politechnika Śląska
Katedra Technologii Materiałowych
ul. Krasińskiego 8, 40-019 Katowice
tel. 32 603 4426

Katowice, 2026-01-19

RECENZJA

rozprawy doktorskiej mgr inż. **Pauliny Kaczor**
pt. **„Opracowanie kompozytów o podwyższonych właściwościach antyadhezyjnych
i biobójczych wytwarzanych na osnwie polioksymetyleny (POM) na elementy aparatury
medycznej o zwiększonej odporności na starzenie i udarowe obciążenia zewnętrzne”**

Praca przedstawiona do publicznej dyskusji Radzie Naukowej Dyscypliny
Inżynieria Materiałowa Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej

Promotor: dr hab. inż. Stanisław Kuciel, prof. PK

Promotor pomocniczy: dr inż. Patrycja Bazan

Opiekun pomocniczy (Elektro Med): dr. n. med. Aleksandra Musiał Wysocka

Podstawa opracowania:

Recenzję wykonano na zlecenie Dziekana Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej Pana dr hab. inż. Janusza Mikuła prof. PK, na podstawie uchwały Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa z dnia 15 października 2025 roku (pismo z dnia 7 listopada 2025 r.).

I. Krótka ocena problematyki badawczej

Recenzowana rozprawa doktorska Pani mgr inż. Pauliny Kaczor została zrealizowana pod opieką naukową dr hab. inż. Stanisława Kuciel profesora Politechniki Krakowskiej w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” we współpracy z firmą „Elektro Med”.

Praca dotyczy istotnych zagadnień związanych z projektowaniem i wytwarzaniem materiałów do zastosowań medycznych, przed którymi stawiane są rygorystyczne wymagania uzależnione od przeznaczenia końcowego produktu.



Dobór materiałów na elementy aparatury medycznej zależy od klasy wyrobu oraz charakteru jego kontaktu z pacjentem. Niezależnie od zastosowania, materiały te winny wykazywać stabilność właściwości fizykochemicznych, chemicznych i biologicznych w całym okresie eksploatacji. Szczególnie istotne są właściwości antybakteryjne i zwiększona odporność na degradację z uwagi na konieczność wielokrotnie powtarzających się procesów dezynfekcji i sterylizacji. Wśród materiałów inżynierskich, zaliczanych do grupy „tworzyw medycznych”, istotne miejsce zajmują polimery i kompozyty wytwarzane na ich podstawie. Główną zaletą tych złożonych materiałów jest możliwość kształtowania struktury i właściwości w szerokim zakresie. Odpowiedni dobór zarówno parametrów technologicznych, jak i materiałowych, takich jak rodzaj, kształt, rozmiar i udział komponentów zbrojących umożliwiając poprawę cech użytkowych materiału osnowy.

Powyższe aspekty stanowią trzon ocenianej rozprawy, w której Autorka skupiła się na odpowiednim doborze komponentów modyfikujących właściwości termoplastycznego polioksymetyleny pod kątem opracowania kompozytów o zwiększonych parametrach antybakteryjnych, antyadhezyjnych i starzeniowych oraz zwiększonej odporności na obciążenia udarowe. Uważam, że **problematyka naukowo-badawcza podjęta w rozprawie doktorskiej przez mgr inż. Paulinę Kaczor jest dobrze ułożona w dyscyplinie „inżynieria materiałowa”**. **Wybór tematyki rozprawy znajduje uzasadnienie zarówno w świetle aktualnego stanu wiedzy w zakresie funkcjonalnych kompozytów polimerowych do zastosowań w przemyśle medycznym, jak i realnej potrzeby wpisującej się w profil działalności partnera przemysłowego.**

II. Charakterystyka i ocena formalna rozprawy

Przedstawiona do recenzji rozprawa ma charakter eksperymentalno-badawczy, została napisana w języku polskim w typowej formie dla tego rodzaju opracowań. Praca liczy łącznie 146 stron, w tym spis treści, wykaz najważniejszych oznaczeń, spisy rysunków i tabel oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. W spisie literatury znajduje się 140 pozycji, w tym artykuły naukowe, pozycje książkowe, broszury oraz normy branżowe, co istotne wszystkie są zgodne z tematyką rozprawy. Jedna z cytowanych prac została błędnie oznaczona dwoma numerami bibliograficznymi (dot. pozycji [94] i [95]). 61 pozycji pochodzi z ostatnich 10 lat (okres 2015-2025), 49 pozycji pochodzi z okresu 2004-2014, a 29 prac ukazało się przed rokiem 2004. **Można zatem uznać, że przytoczony przez Doktorantkę stan zagadnienia jest aktualny. W pracy zamieszczono łącznie 75 rysunków oraz 13 tabel, wszystkie są dobrej jakości, przejrzyste i czytelne.**

Rozprawa zawiera 8 głównych rozdziałów. Pierwsze cztery dotyczą przeglądu literatury (rozdziały 1-4, str. 10-34), a kolejne przedstawiają „Cel i zakres pracy” (rozdział 5, str. 35-36), „Plan badawczy” (rozdział 6, str. 37-41) oraz „Badania własne” (rozdział 7, str. 42-115), w tym opisy materiałów bazowych (podrozdział 7.1, str. 42-45) i metodyki badań (podrozdział 7.2, str. 45-49) oraz omówienie uzyskanych wyników wraz z ich analizą i podsumowaniem



(podrozdziały 7.3 -7.6, str. 50-115). Tę część pracy kończy rozdział 8 zatytułowany „Wnioski” (str. 116-117). **W mojej ocenie układ pracy jest poprawny, w podziale na część literaturową i eksperymentalną zachowano dobre proporcje, odpowiednio 30/70.**

Poniżej zamieszczam kilka uwag o charakterze systematyzującym i edycyjnym.

1. W treści pracy zauważalne jest zamienne stosowanie pojęć „osnowa”/„matryca”. Uważam, że do opisu i charakterystyki materiałów kompozytowych poprawnym terminem jest „osnowa”.
2. W miejsce stosowanej liczby mnogiej w odniesieniu do „temperatury”, np. w wyrażeniach takich jak: „...odporność na wysokie temperatury...” (str. 27) czy „Temperatury strefy cylindra” (str. 44, Tab. 7.4) wskazane byłoby użycie liczby pojedynczej, np.: „...odporność na wysoką temperaturę...”, „Temperatura stref cylindra”.
3. W podpisach pod 4 rysunkami zamieszczonymi w części przeglądowej nie zamieszczono odnośników do źródła (rys. 3.2-3.5, str. 24-27). Wszystkie pochodzą z pozycji [56] cytowanej w treści pracy na stronie 24, jej opis podany w spisie literatury (str. 124) wymaga korekty - jest: „Sachhidananda S. ...”, powinno być: „Prashanth, S., Subbaya, K.M., Nithin, K. & Sachhidananda, S. ...”.
4. W krótkiej charakterystyce włókien szklanych (podrozdział 3.2.1., str. 25) błędnie powołano się na pozycję [57], która jest pracą przeglądową i obejmuje zagadnienia związane z włóknami bazaltowymi.
5. W treści rozprawy znajduje się szereg błędów edycyjnych, stylistycznych, interpunkcyjnych oraz drobnych literówek. Uchybienia te nie stanowią o wartości merytorycznej pracy, świadczą jednak o pewnej niestaranności językowej, np.:
 - a) w tytule podrozdziału „3.1.” brakuje spójnika „i”, jest: „...Antybakteryjne nanocząstki metali tlenków metali”, powinno być: „Antybakteryjne nanocząstki metali i tlenków metali” (spis treści oraz str. 20);
 - b) w tytule podrozdziału „7.2.2.” brakuje litery „y”, jest: „Oznaczenie chłonności wod”, powinno być: „Oznaczenie chłonności wody” (spis treści oraz str. 45);
 - c) str. 10 – jest: „...przesyłowych ...”, powinno być: „...przemysłowych...”; jest „...zarówno w niskiej jak i wysokiej...”, powinno być: „...zarówno w niskiej, jak i wysokiej”;
 - d) str. 16 – jest: „...fotooksydacyjngo ...”, powinno być: „...fotooksydacyjnego...”;
 - e) str. 17 – jest: „...POM są jest stosowany ...”, powinno być: „...POM jest stosowany...”;
 - f) str. 20 – jest: „...zależy rodzaju...”, powinno być: „...zależy od rodzaju...”;
 - g) str. 28 – jest: „...skupiają się głównie...”, powinno być: „...skupiają się głównie ...”;
 - h) str. 29 – jest: „...uzyskuje także się...”, powinno być: „...uzyskuje się także ...”;
 - i) str. 30 – jest: „...głównie...”, powinno być: „...głównie...”;

- j) str. 31 – jest: „...zarówno pozytywny jak i negatywny...”, powinno być: „...zarówno pozytywny, jak i negatywny...”;
 - k) str. 33 – jest: „...stosunek wytrzymałości do masy...”, powinno być: „...stosunek wytrzymałości do gęstości...”; jest: „...w różnych...”, powinno być: „...w różnych...”;
 - l) str. 35 – jest: „...do wielokrotnego jak i jednorazowego...”, powinno być: „...do wielokrotnego, jak i jednorazowego...”;
 - m) str. 38, Rys.6.3 – jest: „...z dodatkiem tlenku tytanu (IV) z dodatkiem stabilizatorów UV...”, powinno być: „...z dodatkiem tlenku tytanu (IV) oraz stabilizatorów UV...”;
 - n) str. 48, Tab. 7.5 – jest: „...przyspieszone go starzenia...”, powinno być: „...przyspieszonego starzenia...”;
 - o) str. 53 – jest: „...właściwości...”, powinno być: „...właściwości...”;
 - p) str. 65 – jest: „Badania kalorymetryczne DSC...”, powinno być: „Badania kalorymetryczne DSC...”;
 - q) str. 66 – jest: „...spadł pod dodaniu...”, powinno być: „...spadł po dodaniu...”;
 - r) str. 67 – jest: „...najwyższą aktywność...”, powinno być: „...najwyższą aktywnością...”;
 - s) str. 70, Tab. 7.8 – jest: „Właściwości...”, powinno być: „Właściwości...”;
 - t) str. 75 – jest: „...próbki PTC...”, powinno być: „...próbki PCT...”;
 - u) str. 88 – jest: „Część przedstawionych w tym podrozdziale wyników są przedmiotem...”, powinno być: „Część przedstawionych w tym podrozdziale wyników jest przedmiotem...”;
 - v) str. 89, Tab. 7.10 – jest: „Właściwości...”, powinno być: „Właściwości...”;
 - w) str. 93 – jest: „...zarówno przed jak i po degradacji...”, powinno być: „...zarówno przed, jak i po degradacji...”;
 - x) str. 104, Tab. 7.12 – jest: „Właściwości...”, powinno być: „Właściwości...”;
 - y) str. 114, Tab. 7.13 – jest: „napięcie...”, powinno być: „Napięcie...”;
6. Wybrane przykłady zdań, które wymagają doprecyzowania ze względu na zastosowanie tzw. „skrótów myślowych” lub niespójną konstrukcję, która utrudnia odbiór treści:
- str. 25 – „Włókna szklane (rys. 3.3) są powszechnie stosowane do wzmocnienia kompozytów.”;
 - str. 26 – „...zauważono, iż udarność zaczęła wzrastać po dodaniu 10% wag. i więcej, co można przypisać mechanizmowi transformacji pęknięcia...”;
 - str. 46 – „Wykonano pomiary energii dyssypacji mechanicznej wytworzonych kompozytów na maszynie wytrzymałościowej Shimadzu...”;
 - str. 99 – „W przypadku zastosowania tlenku tytanu (IV) oraz stabilizatorów UV zaobserwowano, iż temperatury topnienia różniły się nieznaczco lub w ogóle, co sugeruje, że większość kryształów pozostała w swoim pierwotnym stanie.”;



- str. 100 – „...fotodegradacja powoduje ułatwianie się cząsteczek amorficznych na powierzchni, co może skutkować rekrytalizacją wewnątrz próbek i w rezultacie prowadzić do chwilowego zwiększenia stopnia krystaliczności. Jednakże wzrasta ona jedynie do pewnego momentu, a następnie po 500 godzinach ekspozycji na działanie promieniowania UV zaczyna się zmniejszać. Może to być spowodowane degradacją cząstek na powierzchni w początkowej fazie starzenia, co prowadzi do wzrostu krystaliczności, a następnie zniszczenia struktury krystalicznej, które staje się kluczowym powodem późniejszego zmniejszenia krystaliczności...”;
- str. 103 – „Badania właściwości wytrzymałościowych po symulowanym starzeniu wykazały korzystny wpływ stabilizatorów właściwości wytrzymałościowe po fotodegradacji.”;
- str. 110 – „Zaobserwowano znacznie wyższą zdolność do rozpraszania energii kompozytów na osnowie polioksymetylenu Hostaform C2521. Natomiast dodatek stabilizatorów UV nieznacznie ją obniżył zwiększając sztywność próbek”;
- str. 113 – „Rysunek 7.75 przedstawia kąty zwilżania kompozytów...”.

III. Ocena merytoryczna rozprawy

Stan zagadnienia mgr inż. Paulina Kaczor opisała w 4 pierwszych rozdziałach (str. 10-34), które wprowadzają czytelnika w główną problematykę badawczą pracy dotyczącą materiałów kompozytowych wytwarzanych na osnowie polioksymetylenu (POM). Doktorantka w dwustronicowym wstępie w sposób syntetyczny przedstawiła główną ideę, motywację oraz cel pracy (rozdział 1, str. 10-11). W rozdziale 2 (str. 12-19) omówiła podstawowe właściwości fizyczne i mechaniczne niemodyfikowanego polioksymetylenu zwracając uwagę na istotne kwestie dotyczące stabilności wymiarowej, chemicznej oraz odporności na degradację wskutek starzenia fotoooksydacyjnego, kluczowe z punktu widzenia produkcji wyrobów medycznych. Wskazała także na możliwość poprawy powyższych parametrów i potencjał jaki wykazują w tym zakresie nanokompozyty. W rozdziale 3 (str. 20-32) Autorka dokonała krótkiej charakterystyki wybranych komponentów zarówno w postaci cząstek (podrozdział 3.1., str. 20-21), jak i włókien wprowadzanych do polimerowej osnowy w celu poprawy jej właściwości użytkowych tak funkcjonalnych, jak i mechanicznych (podrozdział 3.2.1., str. 24-28). Omówiła główne dodatki polimerowe (podrozdział 3.2.2, str. 28-29) oraz stabilizatory UV wskazując na korzystne działanie w tym zakresie nanocząstek TiO_2 (podrozdział 3.3., str. 29-32). Przegląd literatury kończy rozdział 4 zatytułowany „Kompozyty hybrydowe” (str. 33-34).

Uważam, że w części przeglądowej pracy zasadnym byłoby zwrócenie większej uwagi na zagadnienia związane z teorią materiałów kompozytowych, zwłaszcza z wpływem postaci komponentów wzmacniających (tj. cząstki, włókna) na mechanizm i efektywność umocnienia materiałów kompozytowych. Pozwoliłoby to na uniknięcie pewnych niezręczności, jak np.: zamienne stosowanie pojęć napełniacz/modyfikator/wypełniacz /wzmocnienie/zbrojenie, czy też zaliczenie charakteryzowanych włókien (szklanych,



bazaltowych, węglowych i aramidowych, podrozdział 3.2.1, str. 24-28), stosowanych powszechnie jako wzmocnienie materiału osnowy do „modyfikatorów udarności oraz antyadhezyjności kompozytów polimerowych” (podrozdział 3.2, str. 23-29).

Za cel naukowy rozprawy Doktorantka przyjęła „**opracowanie funkcjonalnych kompozytów na osnowie polioksymetylenu o innowacyjnych właściwościach**” przy założeniu, że materiały te zostaną wykorzystane do produkcji zarówno drobnych elementów sprzętu medycznego, jak i precyzyjnych wyrobów wielokrotnego i jednorazowego zastosowania z wykorzystaniem metody wtrysku (rozdział 5, str. 35-36). **Cel rozprawy został zrealizowany w oparciu o szeroki zakres prac korelujących z opracowanym planem badawczym, który Autorka słusznie podzieliła na kilka etapów (rozdział 6, str. 37-41). Ich konsekwentna realizacja pozwoliła na dobór składu materiału kompozytowego o założonych właściwościach antybakteryjnych, odporności na starzenie i podwyższonej udarności.** Zastosowane materiały, metodykę oraz wyniki badań własnych wraz z ich analizą mgr inż. Paulina Kaczor opisała w obszernym rozdziale 7 (str. 42-115), kluczowym dla wartości merytorycznej pracy. Każdy etap prac został zakończony syntetycznym „podsumowaniem”, w którym znajdują się główne wnioski wynikające z przeprowadzonych badań. Takie podejście pozwoliło na bieżącą ocenę parametrów materiałowych determinujących założone właściwości użytkowe opracowywanych materiałów, ułatwiło także zrozumienie treści pracy.

Ostatni 8 rozdział zatytułowany „Wnioski” (str. 116-117) stanowi w istocie syntetyczne podsumowanie wyników etapowo prowadzonych prac badawczych, a ich **efektem końcowym jest antybakteryjny kompozyt opracowany na osnowie polioksymetylenu o podwyższonych właściwościach antyadhezyjnych, przeciwstarzeniowych oraz zwiększonej odporności na obciążenia udarowe.**

Badania zrealizowano z wykorzystaniem szerokiej gamy metod i technik, które wykorzystano do oznaczenia gęstości i nasiąkliwości wytworzonych próbek materiałów, oceny ich właściwości wytrzymałościowych w oparciu o wyniki uzyskane w próbach rozciągania, trójpunktowego zginania i udarności zarówno przed, jak i po procesie degradacji hydrolytycznej oraz testach przyspieszonego starzenia fotoooksydacyjnego. Powyższe badania rozszerzono o rejestrację pętli histerezy mechanicznej w czasie cyklicznego obciążenia i pomiar wartości dyssypowanej energii oraz analizę mikrostruktury (SEM) przetomów uzyskanych w próbie rozciągania. Do wyznaczenia wartości temperatury topnienia (T_m) i krystalizacji (T_c) oraz udziału fazy krystalicznej w badanych materiałach wykorzystano różnicową kalorymetrię skaningową (DSC). Charakterystykę właściwości powierzchniowych opracowanych materiałów prowadzono pod kątem oceny ich zwilżalności (wyznaczono wartości kąta zwilżania i napięcia powierzchniowego) oraz skuteczności przeciwbakteryjnej i biobójczej wobec dwóch różnych szczepów bakterii *Escherichia coli* ATCC 8739 i *Staphylococcus aureus* ATCC 6538.

Uważam, że **zestaw użytych metod i technik badawczych w odniesieniu do założonego celu pracy jest poprawny. Badania prowadzono zgodnie z normami. Uzyskane wyniki są interesujące zarówno z punktu widzenia poznawczego, jak i aplikacyjnego.**



W toku dyskusji, proszę Doktorantkę o odniesienie się do poniższych kwestii.

1. Jaka była geneza wprowadzenia pojęcia „*odporności na udarowe obciążenia zewnętrzne*”? Czy istnieje odporność na udarowe obciążenia wewnętrzne?
2. Jaka była procedura wytwarzania materiałów, których skład podano w tabeli 7.4?
3. Proszę o jednoznaczną identyfikację roli komponentów wprowadzanych do polimerowej osnowy. Które z nich pełnią funkcję napelnacza/modyfikatora, a które wzmocnienia/zbrojenia biorąc pod uwagę zarówno definicję materiału kompozytowego, jak i znane mechanizmy umocnienia materiałów kompozytowych.
4. Proszę o doprecyzowanie stwierdzenia: „*...połączenie dodatku z osnową polimerową jest umiarkowane*” (str. 62).
5. Jaka była średnica włókien aramidowych, zastosowanych w części badawczej pracy? Na jakiej podstawie przyjęto ich podział na włókna krótkie i włókna długie, czy określono długość krytyczną? Czy zastosowany 5% udział wagowy włókien aramidowych jest udziałem większym niż udział krytyczny w świetle wyników badań wytrzymałościowych przedstawionych w rozdziale 7.4?
6. Jaką metodę wykorzystano do oceny porowatości badanych materiałów w świetle stwierdzenia: „*Ilość i wielkość porów wzrasta wraz z zawartością dodatku Dow Corning MB40-006*” (str. 75)?
7. Na stronie 75 podano, że: „*Obrazy SEM wykazały różnice w strukturze włókien aramidowych zastosowanych w próbkach PTAF₅SS5 i PTAF₅SS5. Pierwsze z nich są bardzo gładkie (...) w przypadku próbek PTAF₅SS5 włókna mają bardziej chropowatą strukturę...*”. Włókna aramidowe pochodziły od jednego dostawcy, zatem pojawia się pytanie z czego wynika ta różnica? Jaka była struktura powierzchni włókien przed ich wprowadzeniem do polimerowej osnowy? Czy ich powierzchnia była modyfikowana?
8. W jakim stopniu analizowane obszary przełomów uzyskanych po próbie rozciągania są reprezentatywne dla całej powierzchni badanych próbek (rozdział 7.4.2)? Czy w mikrostrukturze badanych materiałów zaobserwowano defekty, np. wynikające z tendencji do aglomeracji - zwłaszcza komponentów w rozmiarze nano. Na podstawie ilu próbek dokonano obserwacji mikrostruktury?
9. Proszę o wyjaśnienie mechanizmu wzrostu wytrzymałości na rozciąganie badanych materiałów po degradacji hydrolitycznej (str. 63, 87, 97, 103).
10. Proszę o wyjaśnienie zasadności wprowadzenia pojęcia „kompozyty hybrydowe” dla materiałów opisanych w podrozdziale 7.6 (str. 104-115).
11. Czy do opisu zjawisk i zmian właściwości związanych z degradacją opracowywanych materiałów zasadnym byłoby wykonanie badań geometrii powierzchni przed i po przeprowadzonych procesach degradacji hydrolitycznej i przyspieszonego starzenia?

Pytania dyskusyjne mają charakter uzupełniający i nie wpływają na moją ostatecznie pozytywną ocenę końcową recenzowanej rozprawy, w której zawarto cenne informacje i wartościowe wyniki.



IV. Podsumowanie i wniosek końcowy

Podsumowując stwierdzam, że problematyka badawcza rozprawy doktorskiej autorstwa mgr inż. Pauliny Kaczor jest oryginalna, wpisuje się także w obraną ścieżkę doktoratu wdrożeniowego. Opracowane materiały kompozytowe mogą zostać wykorzystane w praktyce przemysłowej firmy „Elektro Med.”. **Autorka pracy wykazała się wystarczającą wiedzą w dyscyplinie inżynieria materiałowa w zakresie inżynierii materiałów kompozytowych oraz umiejętnością planowania i samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, co czyni zadość wymaganiom stawianym rozprawom doktorskim.**

We wnioskach końcowych stwierdzam, że recenzowana **rozprawa doktorska** mgr inż. Pauliny Kaczor pt.: „Opracowanie kompozytów o podwyższonych właściwościach antyadhezyjnych i biobójczych wytwarzanych na osnowie polioksymetylenu (POM) na elementy aparatury medycznej o zwiększonej odporności na starzenie i udarowe obciążenia zewnętrzne”, zrealizowana pod kierunkiem dr hab. inż. Stanisława Kuciela, prof. PK, **spełnia wymagania formalne zawarte w art. 187 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce. Wnioskuje zatem o dopuszczenie jej do publicznej obrony przed Radą Naukową Dyscypliny Inżynieria Materiałowa Wydziału Inżynierii Materiałowej i Fizyki Politechniki Krakowskiej.**