

Kierownik Laboratorium Technologii Materiałowych i Recyklingu
Zakład Badań Mechanicznych i Inżynierii Materiałowej
Główny Instytut Górnictwa – Państwowy Instytut Badawczy
Plac Gwarków 1
40-166 Katowice

Recenzja rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Pauliny Kaczor zrealizowanej w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy V”, umowa: DWD/5/0234/2021pt.: 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

Przygotowanej pod opieką dr hab. inż. Stanisława Kuciela, prof. PK (Promotor) i dr inż. Patrycji Bazan (Promotor pomocniczy) oraz dr. n. med. Aleksandry Musiał Wysockiej (Opiekun pomocniczy - Elektro Med)

1. Podstawa do opracowania recenzji

Podstawą prawną powołania Pana na recenzenta pracy doktorskiej Pani mgr inż. Pauliny Kaczor jest uchwała nr 32/D/2025 Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria Materiałowa z dnia 15.10.2025 r.

2. Ocena formalna i redakcyjna rozprawy

Przedłożona do recenzji rozprawa doktorska została zredagowana w języku polskim. Praca ma objętość 146 stron. Układ edytorski opracowania jest przejrzysty i co do zasady zgodny z wymogami stawianymi pracom doktorskim, choć nie ustrzeżono się drobnych błędów w zakresie składu tekstu.

Struktura pracy jest poprawna i obejmuje 8 numerowanych rozdziałów merytorycznych, uzupełnionych o wykaz literatury, wykazy rysunków i tabel oraz streszczenia. Warstwa ilustracyjna jest bogata i stanowi istotny atut dokumentacji badawczej – Autorka zamieściła łącznie 89 rysunków oraz 17 tabel, które w czytelny sposób obrazują uzyskane wyniki oraz parametry procesowe.

Analiza formalna rozprawy nie wykazała uchybień w zakresie języka, spójności redakcyjnej, numeracji elementów pracy ani poprawności odwołań do rysunków, tabel i literatury. Praca została przygotowana starannie i zgodnie z wymogami formalnymi stawianymi rozprawom doktorskim. Mimo wskazanych nielicznych uchybień edytorskich, stwierdzam, że praca spełnia wszelkie wymogi formalne. Do rozprawy dołączono streszczenia w języku polskim i angielskim o objętości 2 stron każde. Zawierają one uzasadnienie celowości podjęcia badań oraz syntetyczny opis zawartości pracy. Podział na części: wstęp z definicją celu, przegląd literatury, metodykę badań własnych, szczegółową analizę wyników badań laboratoryjnych, podsumowanie oraz wnioski końcowe jest logiczny i zapewnia przejrzyste przedstawienie problemu badawczego.

3. Ocena celowości podjęcia badań

Ocena celowości podjęcia tematu badawczego w przypadku rozprawy realizowanej w trybie „Doktorat Wdrożeniowy” wymaga uwzględnienia dwóch równoważnych perspektyw: poznawczej (naukowej) oraz utylitarnej. Po wnikliwej analizie założeń pracy stwierdzam, że zdefiniowany przez Doktorantkę problem badawczy jest w pełni uzasadniony i odpowiada na aktualne wyzwania inżynierii materiałowej w obszarze zastosowań biomedycznych.

Problematyka rozprawy wpisuje się w aktualne wyzwania stojące przed przemysłem tworzyw polimerowych. Polioksymetylen (POM), wybrany jako osnowa materiałowa, jest tworzywem konstrukcyjnym o ugruntowanej pozycji w technice medycznej, cenionym za sztywność, stabilność wymiarową i odporność chemiczną. Posiada jednak istotne ograniczenia eksploatacyjne, do których należą niska odporność na promieniowanie UV (krytyczna w procesach sterylizacji) oraz brak samoistnych właściwości biobójczych. W literaturze przedmiotu brakuje kompleksowych opracowań dotyczących hybrydowej modyfikacji POM, która pozwalałaby na jednoczesną poprawę właściwości powierzchniowych (hydrofobowość, antyadhezyjność) przy zachowaniu lub poprawie parametrów mechanicznych. Podjęcie przez Autorkę próby opracowania kompozytu wielofunkcyjnego (POM/Silikon/TiO₂/Włókna), wypełnia zatem istotną lukę w stanie wiedzy na temat synergicznego oddziaływania napełniaczy organicznych i nieorganicznych w osnowie.

Celowość podjętych badań wynika również z rosnących wymagań sanitarnych stawianych wyrobom medycznym. Problem zakażeń wewnątrzszpitalnych oraz konieczność zapewnienia sterylności narzędzi i elementów aparatury wymusza poszukiwanie materiałów o powierzchniach „samoczyszczących” (łatwych do dezynfekcji) i bakteriostatycznych. Opracowanie technologii wytwarzania takich materiałów w oparciu o procesy przetwórstwa jest ekonomicznie uzasadnione i stwarza realne perspektywy wdrożeniowe w firmie partnerskiej (Elektro-Med).

Podsumowując, podjęcie badań opisanych w rozprawie doktorskiej było w pełni uzasadnione. Praca dotyczy aktualnych problemów przemysłowych. Sformułowany cel pracy, obejmujący wytworzenie i charakterystykę nowej grupy materiałów kompozytowych dla medycyny, wpisuje się w priorytetowe obszary badawcze dyscypliny Inżynieria Materiałowa. Wyniki badań mają duży potencjał aplikacyjny, a ich realizacja przyczynia się zarówno do rozwoju nauki, jak i wdrażania innowacyjnych rozwiązań w przemyśle.

4. Ocena tytułu rozprawy oraz zgodności celu pracy z założeniami badawczymi

Sformułowany przez Autorkę tytuł rozprawy: *„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”* jest rozbudowany i precyzyjnie definiuje obszar badań, wskazując zarówno na rodzaj materiału, planowane funkcjonalności, jak i docelowe pole aplikacji.

Tytuł pracy koresponduje z jej treścią, choć należy zwrócić uwagę na jego postulatyczny charakter w odniesieniu do członu „o zwiększonej odporności na (...) udarowe obciążenia zewnętrzne”. W toku badań wykazano, co zostało rzetelnie przedstawione w dyskusji wyników, że jednoczesne uzyskanie

funkcjonalności powierzchniowych i poprawy udarności jest zadaniem złożonym, a w niektórych seriach badawczych (szczególnie modyfikowanych włóknem) obserwowano kompromis w zakresie właściwości mechanicznych na rzecz cech biologicznych. Tytuł należy zatem traktować jako definicję kierunku optymalizacji materiałowej.

Zdefiniowany we wstępie cel naukowy pracy jest spójny z przyjętymi założeniami i obejmował opracowanie funkcjonalnych kompozytów na osnowie polioksymetyleny o innowacyjnych właściwościach. Prowadzone badania skupiały się na modyfikacji składu, która w swoim założeniu miała zapewnić poprawę adhezji mikro- i nanocząstek do polimerowej osnowy i elastomerowej fazy uplastyczniającej, przy jednoczesnym zmniejszeniu zwilżalności powierzchni. Istotnym elementem planu badawczego była również praca nad doбором odpowiedniego układu kompatybilizującego i dodatków antystarzeniowych.

W rozprawie nie sformułowano klasycznej tezy badawczej, co w przypadku pracy o charakterze wdrożeniowym oceniam pozytywnie. W tego typu pracach kluczowe znaczenie ma bowiem precyzyjne zdefiniowanie celu naukowego i utylitarne oraz rozwiązanie konkretnego problemu technologicznego, a nie weryfikacja teoretycznych hipotez, które bywają często oczywiste.

Autorka skoncentrowała się na realizacji celu głównego, który został osiągnięty. Otrzymany układ materiałowy umożliwił opracowanie kompozytów o potwierdzonych właściwościach biobójczych, zwiększonej odporności na starzenie fotoksydacyjne oraz antyadhezyjnych, dedykowanych do zastosowań w przemyśle medycznym, z głównym wskazaniem na laboratoria diagnostyczne i patomorfologiczne. Podsumowując, cel pracy został w pełni zrealizowany, co potwierdzają wyniki zaprezentowane w rozprawie. Przedstawione rozwiązania badawcze i opracowana metodologia mają znaczenie zarówno dla rozwoju nauki, jak i dla wdrażania innowacyjnych rozwiązań w przemyśle.

5. Charakterystyka i analiza merytoryczna pracy doktorskiej

Rozdział 1 (Wstęp). W pierwszym rozdziale rozprawy Autorka zarysowuje tło problemowe podjętych badań, osadzając je w realiach współczesnej inżynierii materiałów medycznych. Wstęp w sposób klarowny wprowadza czytelnika w tematykę polimerów konstrukcyjnych stosowanych w medycynie, ze szczególnym uwzględnieniem polioksymetyleny (POM). Na uznanie zasługuje fakt, że Autorka nie ograniczyła się do technicznego opisu materiału, lecz wyszła od zdefiniowania realnego problemu społeczno-gospodarczego, jakim są zakażenia wewnątrzszpitalne (HAI – *Hospital-Acquired Infections*). Wskazano na konieczność modyfikacji powierzchni narzędzi i aparatury medycznej w celu nadania im cech bakteriostatycznych, co stanowi bezpośrednie uzasadnienie dla modyfikacji tworzywa nanocząstkami tlenku tytanu i srebra. W tym rozdziale zdefiniowano również lukę technologiczną – brak na rynku materiałów na osnowie POM, które łączyłyby wysoką odporność tribologiczną z funkcjonalnością biobójczą, co stało się punktem wyjścia do sformułowania celu pracy.

Rozdział 2 (Polioksymetylen jako osnowa termoplastycznych kompozytów do zastosowań biomedycznych). Rozdział ten stanowi monograficzne ujęcie materiału bazowego, jakim jest polioksymetylen (POM). Autorka dokonała w nim szczegółowej charakterystyki fizykochemicznej osnowy polimerowej, omawiając jej strukturę krystaliczną, właściwości mechaniczne oraz tribologiczne. Istotnym elementem tego rozdziału jest analiza przydatności POM w inżynierii medycznej, poparta przeglądem literaturowym dotyczącym wymagań stawianych implantom

i narzędziom chirurgicznym. Doktorantka wykazała się dobrą znajomością specyfiki materiału, trafnie identyfikując jego zalety (sztywność, stabilność wymiarowa) oraz ograniczenia (brak biobójczości), które stały się punktem wyjścia do planowanej modyfikacji.

Rozdział 3 (Charakterystyka wybranych dodatków do tworzyw sztucznych). W tej części pracy Autorka skoncentrowała się na szczegółowym opisie substancji modyfikujących, które zostały wytypowane do badań własnych. Rozdział ten stanowi kompendium wiedzy na temat napełniaczy funkcjonalnych (nanocząstki tlenku tytanu, nanostrukturalne srebro) oraz modyfikatorów właściwości mechanicznych i tribologicznych (oleje silikonowe, włókna aramidowe). Treść rozdziału wykracza poza standardową charakterystykę materiałową. Autorka dokonała wnikliwej analizy zjawisk fizykochemicznych determinujących skuteczność modyfikacji, w tym zjawiska zwilżalności (hydrofobowości i hydrofilowości) układów wielofazowych. Na szczególne uznanie zasługuje fragment dotyczący mechanizmów aktywności przeciwdrobnoustrojowej. Doktorantka poprawnie zanalizowała zjawiska zachodzące na granicy faz materiał-komórka bakteryjna, w tym kluczowy dla pracy mechanizm fotokatalizy indukowanej przez TiO_2 . Opis ten stanowi solidną podbudowę teoretyczną dla późniejszej interpretacji wyników badań mikrobiologicznych oraz wyjaśnienia problemów technologicznych związanych z dyspersją hydrofilowych napełniaczy w hydrofobowej osnowie polimerowej.

Rozdział 4 (Kompozyty hybrydowe). Rozdział ten stanowi dopełnienie części literaturowej, koncentrując się na specyfice materiałów hybrydowych. Autorka omawia w nim koncepcję modyfikacji wieloskładnikowej, która zakłada jednoczesne wprowadzanie do osnowy polimerowej kilku rodzajów dodatków o różnym przeznaczeniu. Istotą tego rozdziału jest analiza potencjalnego efektu synergetycznego, czyli dążenie do uzyskania materiału łączącego zalety wszystkich użytych komponentów. Przegląd literatury w tym zakresie stanowi logiczne uzasadnienie dla przyjętej w dalszej części pracy strategii badawczej, polegającej na jednoczesnym wprowadzaniu do polioksymetyleny modyfikatorów poprawiających wytrzymałość mechaniczną oraz tych odpowiedzialnych za właściwości tribologiczne i aktywność przeciwdrobnoustrojową.

Rozdział 5 (Cel i zakres pracy). W nawiązaniu do szczegółowej analizy założeń badawczych, przedstawionej już w punkcie 2. niniejszej recenzji, w tym miejscu należy jedynie potwierdzić, że sformułowany w rozdziale piątym cel pracy jest klarowny i adekwatny do wymogów stawianych rozprawom wdrożeniowym. Autorka doprecyzowała tutaj zakres planowanych działań, który obejmuje logiczną sekwencję: od doboru komponentów i technologii wytwarzania, poprzez badania strukturalne, aż po ocenę właściwości użytkowych i biologicznych. Tak zdefiniowany zakres stanowił mapę drogową dla realizacji części eksperymentalnej.

Rozdział 6 (Plan badawczy). Rozdział ten prezentuje harmonogram prac badawczych, który – jak wskazuje Autorka – wynika bezpośrednio z założeń projektu realizowanego w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy V”. Plan badawczy skonstruowano w sposób przemyślany i logiczny, przyjmując model selekcyjny.

Autorka rozpoczęła od szerokiego „screeningu” (etap wstępny), obejmującego wytworzenie kompozytów z różnymi dodatkami biobójczymi (srebro, tlenek cynku, tlenek miedzi, tlenek tytanu), aby na podstawie wyników badań wyselekcjonować napełniacz o największym potencjale. Wybór tlenku tytanu (TiO_2) jako bazy do dalszych modyfikacji (pod kątem udarności, zwilżalności i odporności UV) jest czytelnym i uzasadnionym krokiem w przyjętej ścieżce badawczej. Końcowy

etap planu, zdefiniowany jako analiza synergicznego działania modyfikatorów w układach hybrydowych, świadczy o dążeniu do kompleksowego rozwiązania problemu badawczego.

W rozdziale tym zestawiono również planowany zakres metod badawczych, przypisanych do poszczególnych grup materiałowych. Dobór technik jest szeroki i obejmuje:

- badania mechaniczne (rozciąganie, zginanie, udarność Charpy'ego, histereza mechaniczna),
- badania strukturalne i fizykochemiczne (gęstość, chłonność wody, DSC, kąt zwilżania, SEM),
- funkcjonalne (aktywność przeciwbakteryjna, przyspieszone starzenie).

Tak sformułowany plan stanowił poprawną podstawę do realizacji części eksperymentalnej, której wyniki opisano w kolejnych rozdziałach.

Rozdział 7 (Badania własne). Rozdział ten stanowi najobszerniejszą część rozprawy i zawiera szczegółowy opis procesu badawczego, począwszy od charakterystyki materiałów, poprzez metodykę, aż po analizę wyników poszczególnych etapów eksperymentu.

7.1. Materiały i technologia wytwarzania. W podrozdziale tym zdefiniowano materiały wyjściowe oraz procedurę przygotowania próbek. Jako podstawę pierwotnie zastosowano kopolimer polioksymetylenu Tarnoform 500 CE, który w dalszym toku prac – w odpowiedzi na wyniki badań udarności – zastąpiono odmianą o podwyższonej odporności na pękanie (Hostaform C2521). Wśród modyfikatorów wykorzystano nanocząstki metali i tlenków (Ag, ZnO, TiO₂, CuO), modyfikatory tribologiczne, włókna aramidowe oraz stabilizatory UV. Autorka przedstawiła również parametry technologiczne procesu wytwarzania kompozytów, który zrealizowano przy użyciu wtryskarki KM 40-125 Winner Krauss, podając profil temperaturowy cylindra i ciśnienie.

7.2. Metodyka badań. Metodyka została dobrana szeroko i obejmowała badania mechaniczne (rozciąganie, zginanie, udarność), fizykochemiczne (kąt zwilżania, gęstość), termiczne (DSC), mikroskopowe (SEM) oraz kluczowe dla celu pracy badania mikrobiologiczne i testy starzeniowe.

7.3. Kompozyty z dodatkiem metali i tlenków metali. W tym etapie Autorka przebadła wpływ dodatków biobójczych: nanocząstek srebra (Ag), tlenku cynku (ZnO) oraz tlenku miedzi (II) (nano- i mikrometrycznego), porównując je z tlenkiem tytanu (TiO₂). Badania mikrobiologiczne wykazały najwyższą skuteczność tlenku tytanu (IV) (100% redukcji *E. coli*), podczas gdy pozostałe dodatki w badanych układach wykazały niższą aktywność. W zakresie właściwości mechanicznych odnotowano, że wprowadzenie napelnaczy proszkowych, w szczególności **mikrometrycznego tlenku miedzi (CuOI)**, wpłynęło na obniżenie parametrów wytrzymałościowych, w tym udarności i odkształcenia przy zerwaniu.

7.4. Kompozyty na osnowie polioksymetylenu z dodatkiem tlenku tytanu (IV) oraz modyfikatorów udarności i dodatków zmniejszających zwilżalność powierzchni. Dążąc do poprawy właściwości wyselekcjonowanego kompozytu z TiO₂, Autorka wprowadziła modyfikacje silikonem oraz włóknami aramidowymi. Analiza mikroskopowa (SEM) wykazała w przypadku kompozytów z silikonem obecność porowatej struktury, natomiast w układach z włóknem aramidowym zaobserwowano zjawisko wyciągania włókien ("pull-out"). Zjawiska te znalazły odzwierciedlenie w wynikach badań mechanicznych. W celu poprawy charakterystyki udarnościowej, na tym etapie podjęto decyzję o zmianie materiału osnowy na Hostaform C2521.

7.5. Kompozyty na osnwie polioksymetyleny z dodatkiem tlenku tytanu (IV) i stabilizatorów UV.

Kolejny etap prac poświęcono zagadnieniu trwałości materiału w warunkach eksploatacyjnych. Celem badań opisanych w tym podrozdziale był dobór skutecznego stabilizatora, chroniącego kompozyt przed degradacją fotoooksydacyjną. Autorka przebadła cztery rodzaje dodatków antystarzeniowych. Analiza właściwości mechanicznych wykazała, że wprowadzenie stabilizatorów (w ilości 2% wag.) skutkuje nieznacznym obniżeniem wytrzymałości na rozciąganie oraz modułu sprężystości w porównaniu do kompozytu wyjściowego. Kluczowe rezultaty przyniosły jednak testy przyspieszonego starzenia (symulacja UV). Wykazano w nich, że obecność tlenku tytanu (IV) – pełniącego funkcję absorbera promieniowania – w połączeniu z chemicznymi stabilizatorami skutecznie zabezpiecza osnowę polimerową. W przeciwieństwie do czystego polioksymetyleny, na powierzchni którego zaobserwowano proces kredowania i drastyczny spadek właściwości, kompozyty stabilizowane zachowały swoje parametry użytkowe. Na podstawie tych badań wytypowano dwa systemy stabilizujące (oznaczone jako UV1 i UV3) do finalnego etapu prac.

7.6. Antybakteryjne kompozyty hybrydowe o podwyższonej udarności, zmniejszonej zwilżalności z dodatkiem stabilizatorów UV Ostatni podrozdział części badawczej stanowi syntezę wszystkich poprzednich etapów i dotyczy oceny **efektu synergetycznego** w układach wieloskładnikowych. Autorka wytworzyła finalne formułacje kompozytów hybrydowych, łączące w sobie wyselekcjonowany dodatek biobójczy (TiO₂), najskuteczniejsze stabilizatory UV oraz – co istotne – nową osnowę polimerową o podwyższonej udarności (Hostaform C2521). Uzyskane wyniki potwierdziły słuszność przyjętej strategii modyfikacji. Opracowane materiały hybrydowe (w szczególności układ oznaczony jako **PCTUV3**) wykazały:

- Bardzo wysoką aktywność przeciwdrobnoustrojową (redukcja szczepów *E. coli* i *S. aureus* na poziomie 99,4–100%).
- Zwiększoną odporność na degradację w warunkach atmosferycznych.
- Istotną poprawę udarności w porównaniu do pierwotnych kompozytów (dzięki zastosowaniu osnowy Hostaform), co pozwoliło na skompensowanie kruchości wywołanej dodatkiem napełniaczy proszkowych. Tym samym **w rozdziale tym udowodniono, że możliwe jest uzyskanie wielofunkcyjnego materiału konstrukcyjnego o pożądanach cechach użytkowych.**

Rozdział 8 (Wnioski). Rozdział 8 Rozprawy Doktorskiej, zatytułowany „Wnioski”, stanowi podsumowanie pracy, w którym Autorka syntetyzuje najważniejsze rezultaty badań, ich znaczenie naukowe i praktyczne oraz odnosi się do założeń projektu wdrożeniowego. Struktura wniosków jest logiczna, a ich prezentacja klarowna, co ułatwia ocenę rezultatów oraz zrozumienie najistotniejszych osiągnięć wynikających z przeprowadzonych badań.

W szczególności należy docenić podkreślenie praktycznego znaczenia wyników, zwłaszcza w kontekście potencjalnego zastosowania opracowanych kompozytów hybrydowych w branży medycznej. Wskazanie stopnia realizacji konkretnych „kamieni milowych” projektu (m.in. osiągnięcie 100% redukcji bakterii *E. coli*, wzrost udarności o 72% dzięki zmianie osnowy) stanowi ważny aspekt tej części pracy, podkreślając jej użytkową użyteczność. Autorka zwróciła uwagę na wyzwania technologiczne napotkane w trakcie realizacji pracy, w tym niewystarczającą udarność pierwotnych

układów, co skutkowało koniecznością zmiany materiału bazowego na kopolimer o podwyższonej odporności (Hostaform C2521). Świadomość konieczności elastycznego reagowania na wyniki eksperymentalne i modyfikacji założeń materiałowych jest istotnym atutem warsztatu inżynierskiego Doktorantki.

Pomimo wyraźnych zalet, rozdział zawiera pewne niedociągnięcia, które ograniczają jego wartość naukową. Wnioski są momentami zbyt ogólne i nie w pełni oddają złożoności przeprowadzonych badań i przyczyn obserwowanych zjawisk, skupiając się głównie na efektach końcowych. Autorka mogła bardziej szczegółowo omówić wpływ parametrów technologicznych na uzyskane właściwości, w szczególności odnosząc się krytycznie do przyjętej metody wytwarzania (bezpośredni wtrysk bez etapu compoundowania). We wnioskach zabrakło wyraźnego powiązania między pominięciem etapu homogenizacji a problemami z dyspersją napełniaczy proszkowych i spadkiem właściwości mechanicznych w pierwszych etapach badań. Wzbogacenie wniosków o analizę przyczynowo-skutkową w aspekcie przetwórczym (zamiast jedynie materiałowym) istotnie zwiększyłoby ich wartość poznawczą dla technologii polimerów.

Ponadto, brak szerszych odniesień do literatury w dyskusji końcowej sprawia, że trudno jednoznacznie ocenić nowatorskość uzyskanych synergetycznych efektów starzeniowych na tle innych, współczesnych rozwiązań hybrydowych. Rozwinięcie porównań z wynikami innych autorów w zakresie skuteczności stabilizacji układów z TiO_2 mogłoby istotnie zwiększyć wiarygodność sformułowanych konkluzji.

Przedstawione wnioski spełniają swoje zadanie jako podsumowanie pracy doktorskiej o charakterze wdrożeniowym, uwypuklając jej najważniejsze osiągnięcia oraz wskazując na ich bezpośrednie znaczenie praktyczne. Klarowność i uporządkowanie wniosków pod kątem celów projektu to silne strony tej części rozprawy. Niemniej jednak, pewien brak szczegółowości w analizie technologicznych przyczyn niepowodzeń ogranicza pełne wykorzystanie potencjału naukowego przeprowadzonych badań.

Rozdział 9 (Literatura). Literatura wykorzystana w recenzowanej Rozprawie Doktorskiej, obejmująca łącznie **140 pozycji**, charakteryzuje się szerokim zakresem źródeł, zarówno naukowych, jak i normatywnych. Przeprowadzona kwerenda literaturowa wskazuje na dogłębną analizę tematu oraz udaną próbę ujęcia go w sposób wieloaspektowy i interdyscyplinarny. Bibliografia integruje publikacje z różnych obszarów nauki, takich jak inżynieria materiałowa, chemia i przetwórstwo polimerów, a także mikrobiologia oraz tribologia, co zapewnia szeroki i adekwatny kontekst dla omawianych zagadnień badawczych. W zestawieniu uwzględniono zarówno zwarte pozycje książkowe (monografie), jak i artykuły z renomowanych czasopism naukowych o zasięgu międzynarodowym (m.in. *Polymers*, *Wear*, *Materials* czy *Journal of Applied Polymer Science*). Świadczy to o osadzeniu problematyki badawczej w aktualnym nurcie światowej nauki o materiałach. Integracja doniesień literaturowych z treścią pracy wspiera interpretację wyników, szczególnie w zakresie mechanizmów działania dodatków biobójczych oraz procesów degradacji polimerów.

Szczególnie wartościowym aspektem bibliografii, bezpośrednio wynikającym z wdrożeniowego charakteru doktoratu, jest szerokie wykorzystanie norm technicznych (ISO/PN-EN) w kontekście opisu metodyki badań. Autorka przywołuje kluczowe normy dotyczące badań mechanicznych, termicznych, a także specjalistyczne procedury oceny właściwości przeciwdrobnoustrojowych na

powierzchniach nieporowatych (ISO 22196). Odwołania te wskazują na próbę osadzenia przeprowadzonych eksperymentów w ustandaryzowanych, przemysłowych ramach, co znacząco zwiększa ich wiarygodność, powtarzalność i wartość aplikacyjną dla branży medycznej. Dzięki temu Autorka stworzyła solidne podstawy metodologiczne, niezbędne przy projektowaniu materiałów inżynierskich.

Jednakże szczegółowa analiza struktury wiekowej i tematycznej literatury wskazuje również na pewne obszary wymagające uwypuklenia. Część cytowanych źródeł, zwłaszcza tych dotyczących podstawowych mechanizmów modyfikacji tworzyw i ich właściwości (np. w zakresie oddziaływań osnowy z napełniaczami), pochodzi z lat 80. i 90. O ile jest to zrozumiałe w przypadku opisu fundamentalnych cech polioksymetylenu, o tyle może ograniczać perspektywę w świetle dynamicznego rozwoju nanotechnologii w ostatnich dekadach. Dodanie większej liczby najnowszych publikacji, szczególnie tych z ostatnich 3–5 lat, wzbogaciłoby kontekst badawczy pracy, uwzględniając aktualne trendy w zakresie synergicznego działania nanonapełniaczy hybrydowych. Szczególnie w kontekście szybko rozwijających się biomateriałów, aktualizacja bibliografii o wyniki najnowszych badań z wiodących ośrodków światowych mogłoby znacząco podnieść wartość naukową dyskusji i precyzyjniej pozycjonować uzyskane wyniki na tle obecnego stanu wiedzy.

Istotnym mankamentem w wykorzystaniu cytowanej literatury jest także niedostateczny poziom krytycznej analizy porównawczej w części dyskusyjnej pracy. W rozważaniach Autorki przeważają odniesienia opisowe, potwierdzające zgodność ogólnych trendów, natomiast brakuje pogłębionej konfrontacji wyników własnych - uzyskanych w specyficznej technologii bezpośredniego wtrysku z rezultatami innych badaczy stosujących np. pełne compoundowanie na wyciączarkach. Bardziej szczegółowe porównanie efektywności dyspersji napełniaczy w zależności od technologii wytwarzania, w oparciu o literaturę przedmiotu, pozwoliłoby lepiej wyjaśnić obserwowane w pracy spadki udarności i uwypuklić wkład własny Autorki w optymalizację składu materiałowego.

Literatura wykorzystana w Rozprawie Doktorskiej jest różnorodna, obszerna i dobrze dobrana pod kątem tematyki wdrożeniowej, co stanowi silny fundament teoretyczny dla analizowanego tematu. Niemniej jednak, aktualizacja źródeł o najnowsze doniesienia z zakresu nanokompozytów oraz wzmocnienie krytycznego podejścia do analizy technologii wytwarzania w świetle literatury, mogłoby znacząco podnieść jakość naukową tej części pracy.

Podsumowując powyższą analizę poszczególnych rozdziałów, można stwierdzić, że konstrukcja rozprawy doktorskiej jest poprawna, a Autorka z powodzeniem zastosowała logiczną strukturę, która pozwala na spójne przedstawienie złożonej problematyki badawczej. Treści zostały starannie dobrane i uporządkowane, obejmując wprowadzenie w kontekst inżynierii materiałowej, szczegółowy przegląd literatury, wieloetapowe i szeroko zakrojone badania własne oraz propozycje wdrożeniowe. Autorka w sposób przejrzysty przedstawia tematykę modyfikacji tworzyw, odwołując się do istotnych zagadnień naukowych (nanotechnologia, starzenie) i praktycznych (wymogi medyczne). Całość pracy charakteryzuje się odpowiednim poziomem merytorycznym, co znajduje odzwierciedlenie w szczegółowym przedstawieniu problematyki, rzetelnej analizie stanu wiedzy oraz ambitnie zaplanowanym harmonogramie badawczym. Przedstawione treści jasno podkreślają użyteczne znaczenie podejmowanego tematu, łącząc podstawy teoretyczne z praktycznymi implikacjami i potencjalnym zastosowaniem wyników w przemyśle medycznym.

6. Uwagi szczegółowe i redakcyjne do pracy doktorskiej

Oceniając stronę redakcyjną jako Recenzent muszę zwrócić uwagę na kilka niekonsekwencji i uchybień formalnych, które nieznacznie obniżają estetykę pracy:

1. W tekście pracy Autorka stosuje zamiennie pojęcia „osnowa” i „matryca” w odniesieniu do fazy polimerowej kompozytu. W polskiej terminologii technicznej pojęcie „matryca” jest zazwyczaj zarezerwowane dla narzędzi formujących, natomiast właściwym odpowiednikiem angielskiego *matrix* w inżynierii materiałowej jest „osnowa”.
2. W kilku miejscach pracy (m.in. w części eksperymentalnej) widoczne jest oderwanie tytułów tabel od ich zawartości (tytuł na dole strony, tabela na kolejnej) lub rozdzielenie tabeli i legendy, co utrudnia analizę danych.
3. W pracy występuje niekonsekwencja w pisowni terminu określającego pochłanianie wody. Autorka używa zamiennie formy „absorpcja” (poprawnej) oraz „absorbcja” (błędnej, np. w Tabeli 2.1 na s. 14 oraz na s. 41). Zgodnie z zasadami polskiej pisowni terminologicznej, w naukach ścisłych właściwą formą jest „absorpcja” (przez „p”).
4. Na stronie 43, przy opisie tlenku tytanu (IV), pojawia się sformułowanie „proszek anarazowy”. Jest to błąd wynikający z niedopatrzenia redakcyjnego, tlenek tytanu występuje w odmianie polimorficznej anatazu (proszek anatazowy), a nie „anarazowy”.
5. W tytule podrozdziału 7.2.2 na s. 45 widnieje nagłówek „Oznaczenie chłonności **wod**”.
6. W opisie wyników Autorka stosuje sformułowania typu: „właściwość, która uległa pogorszeniu” (s. 68), „nieznaczne pogorszenie właściwości” (s. 67) czy „pogorszenie odporności” (s. 74). W precyzyjnym języku technicznym parametry i właściwości fizyczne nie ulegają „pogorszeniu” ani „polepszeniu” (są to określenia wartościujące), lecz ulegają zmianie (wzrostowi lub obniżeniu/spadkowi) wartości. Należy operować mierzalnymi zmianami wartości, a nie ich oceną jakościową w kategoriach „lepsze/gorsze”.
7. Spis literatury, przygotowany jest poprawnie, jednak w niektórych pozycjach literatury zauważalna jest niekonsekwencja w lokalizacji roku wydania publikacji (raz po nazwiskach autorów, innym razem na końcu opisu) oraz w formatowaniu nazw czasopism.

Wymienione powyżej nieliczne błędy głównie redakcyjne i terminologiczne mają charakter marginalny i nie wpływają w znaczący sposób na ogólną ocenę pracy. Nie ograniczają jej czytelności ani nie utrudniają analizy opisanych badań i uzyskanych wyników, które zostały przedstawione w sposób rzetelny i przejrzysty. Pomimo tych drobnych niedociągnięć, zasadnicza wartość naukowa pracy pozostaje niekwestionowana.

7. Uwagi krytyczne i pytania do dyskusji

Praca doktorska wnosi istotny i wartościowy wkład w rozwój technologii materiałów kompozytowych na osnowie polioksymetylenu, szczególnie w kontekście zastosowań medycznych. Niemniej jednak, wnikliwa analiza rozprawy ujawnia pewne kwestie wymagające doprecyzowania lub dodatkowego omówienia przez Autorkę:

1. Opis procesu wytwarzania kompozytów (s. 44) wskazuje na zastosowanie technologii bezpośredniego wtrysku mieszanki fizycznej polimeru i napełniaczy proszkowych, z pominięciem etapu wstępnej homogenizacji (kompoundowania) na wytłaczarce dwuślimakowej. Czy Autorka rozważała wpływ braku tego etapu na stopień dyspersji nanocząstek (TiO_2 , Ag, ZnO) i mikrocząstek CuO w osnowie POM? Jak, zdaniem Autorki, wprowadzenie etapu kompoundowania wpłynęłoby na strukturę (szczególnie ograniczenie aglomeracji widocznych pośrednio w wynikach udarność) oraz właściwości mechaniczne badanych kompozytów, zwłaszcza tych modyfikowanych włóknem aramidowym i silikonem, gdzie zaobserwowano istotne defekty na granicy faz?
2. Godne pochwały jest wykorzystanie przez Autorkę badań starzeniowych w komorze UV oraz analizy termicznej DSC do oceny zmian strukturalnych. Dlaczego jednak Autorka nie zdecydowała się na uzupełnienie tej analizy o badania spektroskopowe (FTIR) i wyznaczenie indeksu karbonylowego dla próbek starzonych? Zastosowanie tego wskaźnika pozwoliłoby na ilościową ocenę stopnia degradacji chemicznej łańcucha polioksymetylenu i precyzyjniejsze określenie mechanizmu ochronnego działania tlenku tytanu (IV) oraz stabilizatorów UV.
3. W pracy zastosowano szeroką gamę napełniaczy, w tym tlenek miedzi (II) o zróżnicowanej granulacji (nano i mikro). Analiza wyników wykazała drastyczny spadek udarność dla kompozytów z mikrometrycznym CuO. Czy Autorka mogłaby szerzej skomentować, czym podyktowany był wybór tak dużych cząstek (10-20 μm) do osnowy POM, która jest wrażliwa na karb strukturalny? Czy przeprowadzono analizę rozkładu wielkości cząstek dla użytych proszków przed procesem wtrysku, aby wykluczyć ich zbrylanie się jeszcze na etapie dozowania?
4. Autorka zauważa zmiany w stopniu krystaliczności po dodaniu napełniaczy (Tabela 7.7). Czy analizowano wpływ *szybkości chłodzenia* w formie wtryskowej na strukturę krystaliczną kompozytów hybrydowych? Obecność nanocząstek może działać zarodkująco, co przy szybkim chłodzeniu (wtrysk) prowadzi do powstania drobnokrystalicznej struktury, ale może też generować naprężenia wewnętrzne. Czy rozważano przeprowadzenie badań DMA (Dynamicznej Analizy Mechanicznej), które są czulsze na zmiany w obszarach amorficznych i międzyfazowych niż standardowe testy statyczne?
5. Opisane w rozprawie wdrożenie obejmowało wytworzenie kompozytów w skali laboratoryjnej/półtechnicznej. Jak Autorka ocenia możliwość przeniesienia opracowanej technologii na skalę przemysłową, biorąc pod uwagę konieczność zapewnienia powtarzalności właściwości antybakteryjnych w dużej serii produkcyjnej? Czy w przypadku produkcji masowej elementów medycznych, technologia bezpośredniego wtrysku z pominięciem procesu wytłaczania, zapewni wystarczającą jednorodność rozkładu dodatku biobójczego w całej objętości wypraski?

8. Podsumowanie i wniosek końcowy

Na podstawie szczegółowej analizy przedłożonej mi rozprawy doktorskiej Pani mgr inż. Pauliny Kaczor, zatytułowanej „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”, stwierdzam, że praca spełnia wszystkie wymagania formalne i merytoryczne stawiane rozprawom doktorskim.

Doktorantka wykazała się wysokim poziomem dojrzałości naukowej, co znajduje odzwierciedlenie w umiejętności precyzyjnego formułowania problemów badawczych, właściwego doboru metod analitycznych oraz szczegółowej interpretacji uzyskanych wyników funkcjonalnych. Praca charakteryzuje się spójnością strukturalną, logicznie przeprowadzonym wywodem oraz znaczącym wkładem Autorki w rozwój inżynierii materiałowej, szczególnie w kontekście funkcjonalizacji tworzyw polimerowych do zastosowań medycznych. Wykorzystanie szerokiego spektrum metod badawczych, w połączeniu z ich praktycznym zastosowaniem w ramach doktoratu wdrożeniowego, świadczy o gotowości Doktorantki do prowadzenia samodzielnych badań naukowych oraz do dalszego rozwoju w tej dziedzinie.

Uwzględniając jakość przeprowadzonych badań, wartość poznawczą wyników oraz ich bezpośrednie znaczenie użytkowe dla przemysłu medycznego, uważam, że praca powinna zostać dopuszczona do publicznej obrony.

Rozprawa spełnia wszystkie wymogi stawiane pracom doktorskim, wynikające z przepisów ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. 2018 poz. 1668 z późniejszymi zmianami). W związku z powyższym wnioskuję o umożliwienie Pani mgr inż. Paulinie Kaczor przystąpienia do dalszych etapów procedury przewodu doktorskiego i publicznej obrony jej rozprawy doktorskiej.


dr hab. inż. Jerzy Korol, prof. GIG-PIB