

Prof. dr hab. inż. Mariusz Oleksy  
Katedra Kompozytów Polimerowych  
Wydział Chemiczny  
Politechnika Rzeszowska im. I. Łukasiewicza  
35-959 Rzeszów, Al. Powstańców Warszawy 6  
e-mail: molek@prz.edu.pl

Rzeszów, dnia 28.11.2024 r.

## OCENA

rozprawy doktorskiej mgr inż. Łukasza Suheckiego  
pt. „ ***Analiza wpływu zastosowania surowców z recyklingu na właściwości kompozytów polimerowych ekranujących pole elektromagnetyczne***”

wykonanej pod kierownictwem dr hab. inż. Adama Gnatowskiego, prof. PCz i dr hab. inż. Adama Jakubasa, prof. PCz na była realizowana na Wydziale Inżynierii Mechanicznej i Informatyki - zmiana nazwy wydziału na Wydział Inżynierii Mechanicznej nastąpiła 1 września 2024 r.  
Recenzja wykonana na podstawie pisma nr R-WIMil-BOD-510-5/21 z dnia 25.11.2024 r. Prodziekana ds. Nauki Wydziału Inżynierii Mechanicznej Politechniki Częstochowskiej dr hab. inż. Janusz Szmidla, prof. PCz

Ocenę opracowano na podstawie przekazanej mi pracy doktorskiej pt. „*Analiza wpływu zastosowania surowców z recyklingu na właściwości kompozytów polimerowych ekranujących pole elektromagnetyczne*” obejmującej opracowanie Doktoranta zawarte na 132 stronach.

## **Informacje ogólne dotyczące pracy doktorskiej i dorobku naukowego**

Przedłożona mi do oceny rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Suheckiego zatytułowana „*Analiza wpływu zastosowania surowców z recyklingu na właściwości kompozytów polimerowych ekranujących pole elektromagnetyczne*” została zrealizowana, jak wspomniałem, na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki

Częstochowskiej jej promotorami byli dr hab. inż. Adam Gnatowski, prof. PCz i dr hab. inż. Adam Jakubas, prof. PCz.

Doktorant jest współautorem 8 publikacji w tym 4 o zasięgu międzynarodowym (m. in. *Materials*, *Web of Conferences*, *Energies*). Jest także współautorem 2 zgłoszeń patentowych związanych z pracą doktorską (nr: P.439466, P.439467). Wystąpił na 8 krajowych konferencjach naukowych i na 1 o zasięgu międzynarodowym (81st Conference of the University of Latvia (16 lutego 2023 r.)). Brał udział w 2 komercyjnych projektach badawczych (Eko-innowacyjne materiały kompozytowe wykorzystujące surowce pochodzące z recyklingu do zastosowań elektrotechnicznych”, projekt badawczy nr 0049/L-10/2018 w ramach konkursu NCBiR LIDER X, realizowany w latach luty 2019– styczeń 2021 i „Opracowanie tektonicznej maty higienicznej z systemem redukcji mikrobiologicznej oraz funkcją grzewczą” projekt badawczy nr RPLD.01.02.02-10-0047/21 26.09.2022-30.04.2023). Odbił 9 szkoleń, a w bazie Web of Science IH = 2.

## **1. Wprowadzenie**

Kompozyty polimerowe są obecnie coraz częściej wykorzystywane jako materiały konstrukcyjne zastępując stopy metali, ze względu na wysoki stosunek wytrzymałości do masy oraz odporność na korozję. Jednakże wadą tego typu materiałów jest ich niska przewodność elektryczna, przez co nie chronią one np. przed wyładowaniami atmosferycznymi oraz nie stanowią dobrej ochrony przed polem elektromagnetycznym. Właściwości te są szczególnie ważne w przypadku przemysłu lotniczego, ze względu na duże narażenie na uderzenie piorunem, które w przypadku materiałów o niskiej przewodności elektrycznej może spowodować powstanie poważnych uszkodzeń. Jedną z popularniejszych metod poprawy przewodności elektrycznej kompozytów jest modyfikacja osnowy. Obecnie stosuje się głównie dodatki w postaci polimerów przewodzących (najczęściej polianilina) oraz napełniaczy węglowych (grafit, grafen, sadza przewodząca, nanorurki węglowe). W ciągu ostatnich 5 lat najczęściej wykorzystywanym sposobem na poprawę przewodnictwa elektrycznego kompozytów polimerowych było zastosowanie w ich strukturze warstw o zwiększonej konduktywności. Mogą być one wkomponowane w kompozyt w postaci przekładek lub warstw licowych. Podobnie jak w przypadku

modyfikacji osnowy bądź wzmocnienia tutaj również w celu poprawy właściwości elektrycznych stosuje się dodatki węglowe i metaliczne.

Autor w ramach niniejszej dysertacji otrzymał kompozyty (różniące się składem procentowym osnowy i napełniacza) na osnowie wytypowanych materiałów polimerowych z dodatkiem surowców metalicznych pochodzących z recyklingu. Otrzymane kompozyty poddał badaniom skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego w komorze bezodbićowej dla różnych częstotliwości. W oparciu o badania mechaniczne oraz badania ekranowania pola elektromagnetycznego wykazał, że kompozyt mieszany o zawartości 55% zendry walcowniczej, 30% HDPE, 15% rozdrobnionej blachy nanokrystalicznej charakteryzuje się korzystnymi właściwościami termomechanicznymi oraz ekranującymi pole elektromagnetyczne.

Głównym celem pracy było określenie jakościowego i ilościowego składu kompozytów, o zadowalających właściwościach ekranujących pole elektromagnetyczne, przy jednoczesnym wyznaczeniu optymalnych parametrów niezbędnych do wytwarzania ich metodą prasowania na gorąco. Cel pracy zawierał także dobór rodzaju napełniacza, jego kształtu, uziarnienia, właściwości elektromagnetycznych oraz sposobu jego połączenia z matrycą polimerową dla uzyskania takiej struktury kompozytu, która umożliwi budowę przesłon ekranujących pole elektromagnetyczne w szerokim zakresie częstotliwości. Świadczy to o nowości badanego przez Doktoranta zagadnienia, a także daje nam pełny obraz, z jakimi trudnościami technicznymi Doktorant musiał się zmierzyć.

## **2. Struktura pracy doktorskiej**

Rozprawa doktorska mgr inż. Łukasza Sucheckiego pt. *„Analiza wpływu zastosowania surowców z recyklingu na właściwości kompozytów polimerowych ekranujących pole elektromagnetyczne”* ma charakter doświadczalny i dotyczy między innymi badań nad otrzymywaniem kompozytów polimerowych z dodatkiem wytypowanych materiałów pochodzących z recyklingu w postaci proszków i płatków wytworzonych z zendry i taśm nanokrystalicznych o wyraźnie poprawionych właściwościach ekranujących pole elektromagnetyczne w szerokim zakresie częstotliwości.

Dysertacja została opracowana na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Częstochowskiej w Katedrze Technologii i Automatykacji pod opieką promotorów dr hab. inż. Adama Gnatowskiego, prof. PCz i dr hab. inż. Adama Jakubasa, prof. PCz. Obejmuje 132 strony, w skład których wchodzi: streszczenie w języku polskim i angielskim, wykaz skrótów i oznaczeń, wprowadzenie zawierające 3 podrozdziały, cel oraz zakres pracy, część literaturową zawierającą 4 główne rozdziały (pierwszy - 6 podrozdziałów, drugi - 3 podrozdziały, trzeci - 1 podrozdział i czwarty - 4 podrozdziały). Szkoda tylko, że całość części literaturowej nie została na koniec podsumowana. Następnie Doktorant przedstawił część doświadczalną zawierającą 2 rozdziały (Materiały i surowce; Wytworzenie próbek i metodyka badawcza). Rozdział ósmy poświęcony jest analizie uzyskanych wyników badań i wnioskowi końcowemu. Literatura obejmuje 222 pozycje ze źródeł krajowych i zagranicznych, w tym opracowania książkowe i publikacje naukowe.

Całość zamyka spis rysunków i tabel. Można stwierdzić, że proporcje pomiędzy opracowaniami o charakterze naukowym, a pozostałymi pozycjami zawartymi w literaturze są prawidłowe. Można tu wyszczególnić wiele opracowań literaturowych o charakterze fundamentalnym dla omawianego zagadnienia naukowego.

### **3. Charakterystyka rozprawy doktorskiej**

Wyniki badań oraz ich analiza odnoszą się do ważnych i aktualnych zagadnień, nie tylko z punktu widzenia naukowego, ale również aplikacyjnego. Prace badawcze zostały zrealizowane z wykorzystaniem specjalistycznych maszyn i urządzeń znajdujących się na Wydziale Inżynierii Mechanicznej Politechniki Częstochowskiej. Pozwoliły one Doktorantowi na wnikliwe zrealizowanie badań w zakresie tematu rozprawy.

W recenzowanej pracy doktorskiej Doktorant skupił się na analizie właściwości ekranujących pole elektromagnetyczne w szerokim zakresie częstotliwości i właściwości termomechanicznych na potrzeby określenia warunków niezbędnych do otrzymywania kompozytów polimerowych z materiałami metalicznymi pochodzącymi z recyklingu (materiały odpadowe z zakładów przemysłowych) w postaci proszków i płatków.

W badaniach wstępnych Doktorant zweryfikował parametry wybranych materiałów takich jak przenikalność magnetyczna, rezystancja skrośna i powierzchniowa. Na podstawie przeprowadzonych badań wykonał symulacje obliczeniowe w środowisku Matlab, celem dokładnego sprawdzenia kryteriów spełniających założenia skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego. W wyniku przeprowadzonych badań wstępnych wytypował dwa materiały spełniające kryteria założone w tezach pracy, które poddał kolejnym badaniom szczegółowym. Do tych badań wytypował zgorzelinę walcowniczą oraz taśmy nanokrystaliczne. Wykazywały one bardzo dobre właściwości ekranujące pole elektromagnetyczne. Kompozyty na osnowie HDPE z różną zawartością recyklatu metalicznego otrzymał przy wykorzystaniu technologii prasowania tłocznego. W ramach tych badań Doktorant przeanalizował wpływ struktury kompozytu na właściwości skuteczności ekranowania dla próbek o tym samym składzie, lecz różnej strukturze. Materiały te także poddał badaniom w zakresie właściwości termomechanicznych.

W ramach badań, Doktorant wykonał kompozyty o strukturze warstwowej i homogenicznej. W wyniku przeprowadzonych badań termomechanicznych wytypował skład kompozytu, który użył do wykonania komór zgodnych z normą dla zbadania efektywności ekranowania pola elektromagnetycznego. Następnie przetestował go w warunkach zbliżonych do rzeczywistych na skonstruowanych komorach pomiarowych do badania skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego w zakresie częstotliwości od 50 Hz do 15 GHz.

Z przedłożonej do recenzji rozprawy doktorskiej wynika, że możliwe jest uzyskanie kompozytu na osnowie PEHD z dodatkiem wytypowanego recyklatu metalicznego o znacząco poprawionych właściwościach ekranujących pole elektromagnetyczne.

Uzyskane wyniki badań, umożliwiły Doktorantowi na wnikliwą obserwację i trafne wyciągnięcie wniosków. Najważniejsze konkluzje jakie przedstawione zostały we wnioskach końcowych to:

- w toku przeprowadzonych badań potwierdzono, że istnieje możliwość doboru rodzaju, ilości i wielkości cząstek napełniacza magnetycznego wprowadzonego do polimerowej osnowy dla uzyskania podatnego

do prasowania na gorąco kompozytu, co umożliwi otrzymanie wyrobu o zadowalających właściwościach termomechanicznych;

- analizując badania przenikalności elektromagnetycznej stwierdzono, że istnieje możliwość wytworzenia kompozytów o zadowalających, dla określonych zastosowań, właściwościach ekranujących pole elektromagnetyczne, zależnych od rodzaju polimeru stanowiącego osnowę kompozytu oraz od rodzaju, ilości, ułożenia i kształtu wypełniacza;
- kompozyty zawierające recyklat metaliczny poniżej zawartości 50% wypełnienia dają niezadowalające wyniki przenikalności elektromagnetycznej;
- wypełniacze takie jak pyły złomowiskowe, mosiądz i aluminium wykazywały niską skuteczność ekranowania (SE) co spowodowało wycofanie ich z dalszych badań;
- dla zwiększenia skuteczności ekranowania wykonano kompozyty wykorzystując dwa wypełniacze. W wyniku analizy SE kompozytów dwuskładnikowych przeprowadzono badanie zmiany natężenia pola magnetycznego w niskich częstotliwościach. Wyniki doraźnego sprawdzenia skuteczności ekranowania pozwoliły dokonać wyboru składu kompozytu do badań termomechanicznych;
- analizując termogramy dla jednego kompozytu różniącego się orientacją warstwy ceramicznej w badaniach metodą DMTA, w fazie szklistej zarejestrowano różnicę wartości około 2000 MPa. Porównując wpływ warstwy ceramiki na różnice w module zachowawczym stwierdzono, że korzystniejsze jest ściskanie warstwy ceramiki niż rozciąganie;
- wykorzystując wyniki badania dla kompozytu składającego się z trzech warstw wykonano próbę metodą DMTA. Analizując wszystkie termogramy kompozytów stwierdzono, że najwyższe wartości modułu zachowawczego w funkcji temperatury w fazie szklistej zaobserwowano w kompozycie bez warstwy ceramiki, gdzie zarejestrowano wartość  $EY'$  ponad 14000 MPa. Dodanie do powyższego składu kompozytu warstwy ceramiki znacznie pogorszyło wartość modułu zachowawczego w fazie szklistej, różnica wynosiła około 4000 MPa. Porównując termogramy DMTA, wartości  $EY'$

kompozytu składającego się z trzech warstw, do zhomogenizowanego bez warstwy ceramiki różnica wynosiła około 2000 MPa;

- dodatek do kompozytu warstwy ceramiki powoduje zmniejszenie wytrzymałości na rozciąganie, twardości oraz udarności. Porównując wyniki badań stwierdzono, że najkorzystniejsze właściwości termomechaniczne wykazywały próbki kompozytowe o strukturze mieszanej bez ceramiki, natomiast dodanie proszku ceramicznego pogarszało właściwości termomechaniczne.

Na szczególną uwagę zasługuje staranność wykonywanych przez Doktoranta prac badawczych, która wymagała od niego opanowania nowoczesnych metod badawczych. Zostały one prawidłowo dostosowane do zagadnień i problemów jakie musiał rozwiązywać. Wiadomym jest, że zapewne wykorzystanie specjalistycznej aparatury i interpretacja wyników pomiarów nie mogą być przypisane w całości Doktorantowi, ponieważ zawsze wymaga to współpracy ze specjalistami, a przede wszystkim z Panami Promotorami, czego wyniki przedstawiono we współautorskich pracach będących uzupełnieniem osiągnięcia.

Praca jest napisana poprawną polszczyzną, choć nie udało się uniknąć drobnych błędów o charakterze stylistycznym i redakcyjnym, które przekazałem Doktorantowi (np. brak tytułu 4 rozdziału w spisie treści pt. Ekranowanie pola elektromagnetycznego). Generalnie praca spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim, a zauważone uchybienia nie umniejszają jej wysokiej wartości naukowej jak i aplikacyjnej.

Analizując wyniki przeprowadzonych przez Doktoranta badań mam kilka uwag i pytań o charakterze merytorycznym:

- nie wytłumaczono jakie właściwości polimerów (HDPE, POM, PVC) wpłynęły na wstępne wytypowanie ich do wykonania osnowy przygotowanych kompozytów.
- w tabeli 7.1. przedstawiono parametry prasowania, które oprócz niższej o 5°C temperatury dla PVC są identyczne, jednak nie wytłumaczono, dlaczego zostały dobrane na danym poziomie. Jest to istotne ze względu na opisanie degradacji dwóch z wytypowanych tworzyw.

- parametry ciśnienia prasowania próbek przedstawione w tabeli 7.2. znacznie różnią się od podanych w tabeli 7.1. jednak nie opisano skąd wynika tak duża różnica.
- w tabeli 7.2. m.in. przedstawiono próbki, które w swoim składzie jako osnowę zawierały PVC, pomimo wcześniejszego odrzucenia go podczas selekcji ze względu na niską wytrzymałość termiczną. Znajdują się w niej również próbki zawierające nieopisaną wcześniej i niewskazaną podczas procesu wyboru osnowy żywicę fenolową. Brakuje w niej również konsekwencji w przedstawieniu poszczególnych wartości: jednostki, czasu grzania, nazwy próbek, miejsca znaczące. Skróty wykorzystane w opisie składu próbek powinny być wcześniej objaśnione. Dodatkowo temperatura grzania dla 3 próbki znacząco odbiega od pozostałych.
- nie podano jednostek dla wymiaru przygotowanych próbek do badania rezystancji skrośnej, powierzchniowej oraz przenikalności magnetycznej i pomiaru skuteczności ekranowania.
- w podsumowaniu analizy obliczeniowej skuteczności ekranowania pola elektromagnetycznego brakuje przytoczenia wyników, które pozwoliły na wysnucie wniosku o zwiększeniu odbicia fali EM, przy wskazanym składzie kompozytów. Podobnie w podsumowaniu badań wstępnych, brakuje wartości najważniejszych wyników, które pozwoliły na wytypowanie opisanych napełniaczy.
- we wnioskach końcowych skupiono się głównie na wynikach badania DMTA, pozostałe badania zostały opisane bez przytaczania wyników, które powinny być również porównane z właściwościami dostępnych na rynku materiałów o podobnych zastosowaniach. Pozwoliłoby to na oszacowanie szansy wykorzystania otrzymanych kompozytów jako ich odpowiedników, co jest szczególnie ważne, ze względu na pochodzenie surowców do ich otrzymania z recyklingu. Brakuje też wskazania konkretnych obszarów, w których mogłyby znaleźć zastosowanie przygotowane opisaną metodą kompozyty.

#### **4. Podsumowanie**

Podsumowując praca doktorska Pana mgr inż. Łukasza Suheckiego stanowi zwarty opis osiągnięcia naukowego, a zatem spełnia wymogi formalne zawarte w



obowiązujących przepisach ustawowych. W pracy opisane zostały nowatorskie i warte kontynuacji kierunki badań. Z kolei przedstawiona do oceny dysertacja jest opracowana bardzo starannie z nielicznymi tylko potknięciami edytorskimi.

Bez wątpliwości stwierdzam, że przedłożona mi do oceny rozprawa w dyscyplinie naukowej inżynieria mechaniczna w pełni spełnia warunki określone w ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce ( Dz.U. 2018 poz. 1668 ze zm.), zatem wnioskuję do Rady Dyscypliny Naukowej Inżynieria Mechaniczna Politechniki Częstochowskiej o dopuszczenie Doktoranta do dalszych etapów postępowania doktorskiego.