



**POLITECHNIKA
GDAŃSKA**

WYDZIAŁ CHEMICZNY

Gdańsk, 28.11.2024 r.

Politechnika Gdańska

Wydział Chemiczny

ul. G. Narutowicza 11/12

80-233 Gdańsk

dr hab. inż. Justyna Kucińska-Lipka, prof. uczelni, Prorektor ds. rozwoju

tel. 668376436

e-mail: juskucin@pg.edu.pl

Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Leszka Resnera

„OPRACOWANIE HYDROFOBOWEGO UKŁADU IZOLUJĄCEGO DO PODMORSKICH KABLI ELEKTROENERGETYCZNYCH ŚREDNICH I WYSOKICH NAPIĘĆ, NA BAZIE TERMOPLASTYCZNYCH KOPOLIMERÓW BLOKOWYCH”

1. Uwagi ogólne

Przedstawiona praca doktorska dotyczy badań prowadzonych w celu opracowania i wdrożenia do produkcji nowej konstrukcji kabli energetycznych, przeznaczonych do pracy ze średnimi i wysokimi napięciami, z układem izolującym rdzeń kabla przed wnikaniem wody. Praca była realizowana w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego „Doktorat wdrożeniowy” w latach 2020-2024. Tematyka pracy jest aktualna, gdyż dotyczy istotnego zagadnienia jakim jest transport wytworzonej energii elektrycznej z farm wiatrowych położonych na morzach i oceanach na stały ląd. Rosnąca moc instalowanych turbin wiatrowych oraz zwiększanie odległości instalacji takich farm od brzegu rodzi potrzebę stosowania wyższych napięć i/lub niższych częstotliwości przesyłanego prądu w stosunku do obecnych standardów w celu zmniejszenia strat w przesyśle energii. W połączeniu z nowym trendem instalacji kabli dynamicznych, rodzi to potrzebę opracowania nowych metod



produkcji kabli podwodnych oraz materiałów do ich produkcji, które mogłyby pozwolić na zaoferowanie rozwiązań technologicznych, zapewniających niezawodność, możliwość pracy zgodnie z nowymi wymaganiami rynku, przy jednoczesnym zachowaniu przystępnej ceny. Istniejące na rynku rozwiązania nie spełniają potrzeb tej dynamicznie rozwijającej się części sektora energetycznego. Kable typu suchego, używające zabezpieczeń w postaci osłon metalowych, pozwalają na pracę z wysokimi napięciami, nie nadają się jednak do zastosowań dynamicznych oraz są bardzo kosztowne w wykonaniu. Z drugiej strony, kable typu mokrego i pół-mokrego nie pozwalają na pracę z wysokimi napięciami, a ich czas pracy jest ograniczony z uwagi na postępującą w czasie degradację spowodowaną m.in. reakcjami z wodą morską.

Przedstawiona do recenzji dysertacja pt. „Opracowanie hydrofobowego układu izolującego do podmorskich kabli elektroenergetycznych średnich i wysokich napięć, na bazie termoplastycznych kopolimerów blokowych” dotyczy rozwiązania problemów związanych ze stosowaniem materiałów polimerowych w produkcji kabli podmorskich wysokich napięć. Oczywiście istnieją inne, podobne prace w tym temacie, jednakże Doktorant zaproponował w rozprawie doktorskiej nowe podejście opierające się na dwóch różnych drogach rozwiązania tego problemu, które wykorzystywały układy hybrydowe, dotychczas nieopisane w podobnym zastosowaniu. Przedstawiona do recenzji rozprawa jest przygotowana w formie monografii naukowej, przedstawiającej rozwiązanie wyżej opisanego problemu badawczego w sposób oryginalny i twórczy, a zarazem posiada cechy pracy technologicznej i wdrożeniowej.

Praca napisana jest w sposób klarowny i nie budzi większych zastrzeżeń pod względem edycyjnym i merytorycznym. Dysertacja składa się z rozdziałów, w których dokonano przeglądu literatury przedmiotu, opisano szczegółowo cele i tezę pracy, jej nowość, metodykę przeprowadzonych badań, przedstawiono analizę wyników wraz z dyskusją, zaprezentowano potencjał wdrożeniowy opracowanych materiału oraz wysnuto wnioski płynące z zaprezentowanej pracy.

2. Cel rozprawy i zadania szczegółowe

Obecnie stosowane rozwiązania w zakresie obniżenia kosztów produkcji wysokonapięciowych kabli podmorskich skupiają się na zastąpieniu osłon metalowych układami izolacyjnymi bazującymi na sieciowanym polietylenie (XLPE) w różnych wariantach. Materiały te, pomimo możliwego zastosowania w kablach dynamicznych oraz



zmniejszonego kosztu wytworzenia i instalacji, posiadają istotną wadę, ograniczającą ich szerokie zastosowanie. Jest to wysoka podatność na procesy starzenia, która jest potęgowana poprzez warunki pracy kabli, takich jak m.in.: podwyższona temperatura pracy, wysokie pola elektryczne oraz środowisko wody morskiej. W połączeniu z obecnymi w materiałach polimerowych zanieczyszczeniami oraz defektami w strukturze kabla, powoduje to powstawanie tzw. „drzewek” wodnych i elektrycznych, czyli segmentów z uszkodzonymi wiązaniami kowalencyjnymi C-C oraz C-H w strukturze polimeru. W wyniku tego procesu zmniejsza się wytrzymałość dielektryczna kabli, co długofalowo prowadzi do zwiększenia awaryjności kabla.

Celem pracy było opracowanie nowego rodzaju materiałów termoplastycznych przeznaczonych do zastosowania w podmorskich kablach energetycznych, cechujących się ograniczonym przenikaniem wody ze środowiska do wnętrza konstrukcji. Główne cele badań wykonanych w ramach niniejszej pracy doktorskiej zagregowano w dwóch, wzajemnie uzupełniających się modelach badań. Pierwszy z nich skupiał się na opracowaniu materiałów barierowych izolujących kable przed wniknięciem do niego wody, natomiast drugi zakładał opracowanie materiału absorbującego wodę, który chroniłby rdzeń kabla przed wodą, która przeniknęła przez pierwszą warstwę izolacji.

W związku z tym, przyjęto trzy główne tezy badawcze:

- Opracowane materiały pozwolą na zastąpienie metali w osłonach kabli podmorskich;
- Wprowadzenie napełniaczy mineralnych do osnowy materiałów termoplastycznych może doprowadzić do polepszenia właściwości materiału w zakresie przenikalności wody, przy zachowaniu odpowiednich właściwości dielektrycznych;
- Wytwarzanie kabli z opracowanych materiałów będzie mogło się odbywać przy użyciu obecnie wykorzystywanego parku maszynowego w przetwórstwie tworzyw termoplastycznych.

W ramach weryfikacji tez badawczych określono:

- Mikrostrukturę wytworzonych kompozytów ze szczególnym uwzględnieniem oddziaływań dodatków z osnową;
- Charakterystykę termiczną otrzymanych materiałów w kontekście temperatur mięknięcia, krystalizacji a także degradacji;
- Właściwości mechaniczne, przetwórcze, fizykochemiczne a także absorpcyjne wody przez przetworzone wyroby.



Analizując uzyskane wyniki oraz biorąc pod uwagę potencjał aplikacyjny wytypowano jeden z proponowanych rodzajów materiałów do użycia w produkcji prototypu kabla podwodnego na bazie konstrukcji o nazwie [REDAKCYJNE] [REDAKCYJNE] obecnie używanej w firmie Tele-Fonika Kable S.A., której Doktorant jest Pracownikiem.

Cel rozprawy doktorskiej oraz tezy pracy zostały sformułowane jasno i klarownie, a badania wykonane w ramach tych zadań nie budzą większych zastrzeżeń. Moje wątpliwości w ocenie opisywanej pracy wynikają z zastrzeżeń do staranności procesu redakcyjnego dysertacji, niewystarczającego umotywowania zastosowania konkretnych ilości modyfikatorów, konsekwencji w opisie niektórych metod badawczych oraz otrzymanych przy ich pomocy wyników, jak również braku holistycznego podejścia w krytycznej analizie rezultatów prac badawczych w kontekście obserwowanych trendów i ich powiązań z innymi wynikami badań. W mojej ocenie, na rozwinięcie podczas publicznej obrony zasługuje również aspekt wdrożeniowy proponowanego rozwiązania, gdyż w przedstawionej do recenzji wersji pracy nie zawarto żadnych wyników badań prototypów kabli wytworzonych na bazie opracowanego materiału, a jedynie ogólny opis metodologii oraz procesu wytwarzania.

3. Krótkie omówienie rozprawy doktorskiej

Prace badawcze w ramach przewodu doktorskiego były prowadzone etapowo, a ich realizacja doprowadziła do osiągnięcia zamierzonego celu. Przeprowadzone prace eksperymentalne zostały poprzedzone dość krytycznym przeglądem literatury przedmiotu, gdzie Doktorant opisał m. in.: rodzaje, budowę, warunki eksploatacji kabli podwodnych, trzy główne podejścia w izolacji kabli przed działaniem wody morskiej oraz aktualne trendy w badaniach nad poprawieniem właściwości tych konstrukcji. Przedstawił również proces absorpcji wody w kablu, czynniki, które wpływają na ten proces a także różne rozwiązania powłokowe, które mogłyby przeciwdziałać temu zjawisku. Na koniec opisany został proces produkcyjny kabla podwodnego razem ze szczególnymi wyzwaniami technologicznymi, które są obecne w tym procesie wytwórczym.

Należy w tym miejscu podkreślić, że wstęp teoretyczny był napisany dobrze, szczegółowo, a konstrukcja pracy wprowadza czytelnika stopniowo w zagadnienia badawcze.

Prace badawcze zostały podzielone na dwa obszary. W pierwszym skupiono się na otrzymaniu materiałów o ograniczonej absorpcji wody, konkurencyjnych do obecnie stosowanych wariantów sieciowanego polietylenu. W tym celu został zastosowany jeden z



handlowo dostępnych [REDACTED], który został dodatkowo zmodyfikowany [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED] w celu zmniejszenia absorpcji wody. W drugim obszarze skupiono się na otrzymaniu materiałów o zwiększonej absorpcji wody. W tym celu został zastosowany [REDACTED] [REDACTED] [REDACTED]. Zbadano również materiał referencyjny w postaci polietylenu wysokiej gęstości modyfikowanego [REDACTED] [REDACTED]. Badania zostały przeprowadzone w sposób przemysłowy a rezultaty badań podparte użyciem różnorodnych metod badawczych.

Pozyskana wiedza i informacje z tych badań pozwoliły osiągnąć postawiony cel rozprawy doktorskiej.

4. Ocena merytoryczna rozprawy doktorskiej

Tematyka pracy doktorskiej jest ciekawa i ważna z punktu widzenia pozyskania informacji na temat wpływu poszczególnych modyfikatorów na właściwości otrzymywanych kompozytów w kontekście wytwarzania kabli podmorskich wysokich napięć. Najważniejszym elementem rozprawy, podlegającym szczegółowej ocenie są wyniki badań przedstawione w rozprawie doktorskiej. Wyniki powinny stanowić oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego. Z pełnym przekonaniem mogę stwierdzić, że przedstawione wyniki prac badawczych spełniają powyższy warunek i wskazują na umiejętność samodzielnego prowadzenia badań naukowych, krytycznej dyskusji wyników oraz formułowania na ich podstawie istotnych wniosków. Wniosek ten uzasadnia: opis prowadzonych badań, dyskusja wyników oraz sformułowane konkluzje, które potwierdziły właściwe zaplanowanie a także wykonanie prac eksperymentalnych doprowadzając Doktoranta do realizacji głównego celu rozprawy doktorskiej.

Pan mgr inż. Leszek Resner posiada w swoim dorobku dwie, wieloautorskie publikacje naukowe: Resner, L.; Paszkiewicz, S. Radial Water Barrier in Submarine Cables, Current Solutions and Innovative Development Directions. Energies 2021, 14, 2761. <https://doi.org/10.3390/en14102761> oraz Resner, L.; Lesiak, P.; Taraghi, I.; Kochmanska, A.; Figiel, P.; Piesowicz, E.; Zenker, M.; Paszkiewicz, S. Polymer Hybrid Nanocomposites Based on Homo and Copolymer Xlpe Containing Mineral Nanofillers with Improved Functional Properties Intended for Insulation of Submarine Cables. Polymers 2022, 14, 3444. <https://doi.org/10.3390/polym14173444>. Pierwsza z przytoczonych publikacji jest przeglądem



literatury w kontekście obecnych trendów w stosowaniu izolacji wodnych w kablach podmorskich. Druga z nich jest natomiast pracą eksperymentalną skupiającą się na modyfikacji handlowych polimerów nanowypełniaczami oraz określeniu ich przydatności w kontekście możliwego wykorzystania jako izolacji wodnych w kablach podmorskich. Porównanie treści pierwszego wymienionego artykułu z przedstawioną do recenzji dysertacją wykazało, że duża część przeglądu literaturowego (str. 19 – 44) została omówiona i zaprezentowana w części teoretycznej. Zwrócić uwagę należy, że odsyłacze do publikacji pojawiają się jedynie przy niektórych (ale nie wszystkich) rysunkach, które zostały wykorzystane zarówno w dysertacji jak i publikacji – rysunki 4 i 5.

Mimo to, ten fragment pracy nie jest kluczowy w ocenie dysertacji, a sam fakt braku wyraźnego oznaczenia pierwotnego źródła tekstu można uznać za błąd redakcyjny tej pracy. Druga z publikacji Doktoranta dotyczy problematyki podniesionej w przedstawionej do recenzji rozprawie, jednak użyto tam innych materiałów osnowy niż w recenzowanej pracy, toteż nie ma bezpośredniego powiązania między tymi dwoma pracami.

Przedstawione w recenzowanej pracy doktorskiej rezultaty badań wnoszą wg mnie elementy nowości w rozwoju nauki dotyczącej kompozycji polimerowych oraz praktycznego zastosowania wyników tych prac do wytworzenia funkcjonalnych wyrobów. Do najważniejszych osiągnięć Doktoranta zaliczyłabym:

1. Opracowanie nowego rodzaju materiału w postaci termoplastycznego poliuretanu modyfikowanego zeolitami, zdolnego do absorpcji wody, przy zachowaniu wymaganych właściwości dielektrycznych i przetwórczych.
2. Wytworzenie w warunkach przemysłowych kabla z układem dwóch powłok.
3. Przedstawienie interakcji między stosowanymi modyfikatorami w układach hybrydowych.

Do przedstawionych wyników w pracy mam jednak kilka uwag i komentarzy, które nie wpływają znacząco na moja ogólną ocenę rozprawy doktorskiej:

1. Dlaczego badaniom (m.in. mikroskopia, DSC, TGA, gęstość) nie zostały poddane same modyfikatory? Znajomość ich właściwości znacząco ułatwiłaby analizę otrzymanych wyników, a także mogłaby potwierdzić trafność wyciąganych wniosków.
2. W pracy nie przedstawiono podstawowych parametrów dla przetwórstwa wytłaczakowego (m.in.: L/D, stopień kompresji czy też układ segmentów układu



uplastyczniającego), co uniemożliwia weryfikację poprawności przetwórstwa wybranych materiałów. Pozostawia to również niewiadomą komplementarność pomiędzy układem laboratoryjnym a przemysłowym – zostało to częściowo zweryfikowane w próbie przemysłowej, gdzie pierwotny układ uplastyczniający okazał się być nieodpowiedni do przetwórstwa wybranego materiału.

3. W przypadku poliuretanu producent materiału bazowego zaleca wygrzewanie wytworzonych produktów w 100°C przez 20 godzin. Dlaczego te zalecenia nie zostały uwzględnione w pracach badawczych?
4. Dlaczego w przypadku przetwarzania wytłaczakowego polietylenu oraz [REDACTED] znacząco przekroczone zalecane przez producenta temperatury przetwórstwa a także charakterystyczne temperatury przemian obserwowane w badaniach DSC?
5. Dlaczego wyników badań mechanicznych nie skonfrontowano z danymi z kart technicznych? Otrzymane wyniki znacząco odbiegają od wartości tam przedstawionych, co w żaden sposób nie zostało skomentowane w pracy. Dodatkowo dane podane w większości tabel w rozdziale 4.1. nie posiadają odnośników literaturowych (w tekście pracy obecne są odnośniki literaturowe, ale są one błędnie sformatowane i nie pozwalają na dotarcie do konkretnych źródeł) i część z nich odbiega od wartości dostępnych na stronach producenta (np. dla [REDACTED] wytrzymałość na rozciąganie podano 33 MPa, gdzie na stronie producenta [REDACTED]-1 [REDACTED] podano 45 MPa, a dla polietylenu podano odkształcenie przy zerwaniu 1%, gdzie na stronie producenta [https://www.borealisgroup.com/storage/Datasheets/borstar/he6062/HE6062-PDS-REG_WORLD-EN-V6-PDS-WORLD-3649-PDS_BORSTAR%20HE6062_6_02112023.pdf] podano 700%).
6. Nieprawdopodobne wydają się przedstawione wyniki badania udarności materiałów bazujących na [REDACTED] w świetle zarówno podstawowej wiedzy inżynierskiej na temat elastomerów, jak i dostępnych kart technicznych, próbki badanego [REDACTED] nie powinny ulegać zniszczeniu w tym teście. Jeśli rzeczywiście [REDACTED] próbki pękały, może to oznaczać ich nieprawidłowe wytworzenie.
7. W mojej ocenie [REDACTED] pod wpływem dodatku [REDACTED] ulegał degradacji podczas przetwórstwa, na co wskazuje pogorszenie wielu istotnych właściwości materiałowych otrzymywanych próbek oraz znaczące zwiększenie wskaźnika szybkości płynięcia. Mogło to być spowodowane niewłaściwym przetwórstwem



materiału, jak i zasadowym charakterem dodatku, który powodował hydrolizę wiązań w strukturze [REDAKCYJNE]. Wydaje się to mieć potwierdzenie również w obserwowanej porowatej strukturze materiałów będącej prawdopodobnie efektem wydzielającego się dwutlenku węgla. Celowym wydaje się więc przeprowadzenie badań pozwalających określić masę cząsteczkową łańcuchów polimerowych w celu weryfikacji opisanego wyżej procesu.

Inne drobne uwagi oraz komentarze zostały zawarte w punkcie "Ocena formy redakcyjnej rozprawy".

5. Ocena formy redakcyjnej rozprawy

Mimo należytej staranności Doktorant nie ustrzegł się błędów edytorskich, stylistycznych czy drobnych merytorycznych. Poniżej przedstawione są przykłady wymienionych błędów:

1. Kolejność opisywanych wyników badań nie pokrywa się z kolejnością przedstawioną w opisie metodologii badawczej.
2. W wielu miejscach występują błędy przy podawaniu wartości z częściami dziesiętnymi i setnymi – czasem jest używany przecinek a czasem kropka.
3. W wielu miejscach występują błędy w zapisywaniu wartości z jednostką, np.: „110kV”, gdzie powinno być „110 kV”.
4. W wielu przypadkach przedstawione wykresy i zdjęcia są niskiej jakości, szczególnie w części literaturowej.
5. W kilku miejscach występują błędy w wprowadzaniu cytowań np. na stronie 64.
6. W przypadku kilku rysunków występują opisy w języku angielskim, które nie są przetłumaczone, bądź wyjaśnione w opisach rysunków.
7. W wielu miejscach podawane są nazwy w języku angielskim bez stosownej adnotacji i tłumaczenia na język polski np. „TIG (Tungsten Inert Gas)”.
8. W wielu miejscach brakuje konsekwencji w stosowaniu konkretnego stylu tabel czy też opisów – np.: Tabela 6 i 7 z różnymi stylami odstępów po akapicie/interlinii czy też wymieniane zastosowania [REDAKCYJNE] na stronach 71 i 72, gdzie w pkt. a-g zastosowania są właściwie tylko wymieniane, natomiast w pkt g są opisane pełnymi zdaniami.



9. W tekście pracy brakuje odniesień do większości rysunków i tabel umieszczonych w pracy, a gdy się już pojawiają są one w błędnej formie gramatycznej np. „W Tabela 14”.
10. W języku polskim nie używa się słowa „pik” w kontekście przywołanym w pracy. Odpowiednim słowem jest np. „maksimum”.
11. W opisie Tabeli 10 przywołano błędną nazwę surowca.
12. Kilka źródeł literaturowych jest błędnie opisanych.
13. W dysertacji brakuje podsumowania zarówno części teoretycznej, jak i eksperymentalnej.
14. Przedstawione wnioski są pozbawione głębszej analizy otrzymanych wyników w kontekście zastosowania przemysłowego, brak jest też m.in. jasnego opisanie ograniczeń przedstawionych badań czy też możliwych sposobów dalszego rozwinięcia powziętej tematyki badawczej.

Pomimo tych nieścisłości, pod względem edytorskim, szaty graficznej, piśmiennictwa przedstawioną do recenzji pracę należy ocenić pozytywnie.

6. Podsumowanie recenzji

Na zakończenie recenzji chciałabym podkreślić, że rozprawa doktorska mgr inż. Leszka Resnera „Opracowanie hydrofobowego układu izolującego do podmorskich kabli elektroenergetycznych średnich i wysokich napięć, na bazie termoplastycznych kopolimerów blokowych”, przedstawia znaczącą wartość naukową oraz aplikacyjną, co jest szczególnie ważne przy awansie naukowym na stopień doktora nauk w Dziedzinie nauk inżynieryjno-technicznych w Dyscyplinie Inżynieria Materiałowa. Moja ostateczna ocena rozprawy doktorskiej Pana mgr inż. Leszka Resnera jest pozytywna. Otrzymane wyniki badań wzbogacają wiedzę na temat zastosowań materiałów bazujących na polimerach termoplastycznych w zastosowaniu jako element izolujący kable podwodne. Doktorant wykazał się umiejętnością posługiwania się nowoczesną aparaturą analityczną, planowaniem badań, dyskusją uzyskanych wyników oraz sformułowaniem poprawnych konkluzji.

Uważam że rozprawa doktorska spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane doktorantom określone w Ustawie z dnia 20 lipca 2018 r. – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz.U. z 2024 r. poz. 1571 z późn. zm.). W związku z powyższym zwracam się do Rady Dyscypliny Inżynieria Materiałowa. Zachodniopomorskiego



Uniwersytetu Technologicznego w Szczecinie o dopuszczenie Pana mgr inż. Leszka Resnera do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Prorektor ds. rozwoju

mgr inż. Eustyja Kucińska-Lipka, prof. PG