



POLITECHNIKA POZNAŃSKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII MECHANICZNEJ

Instytut Technologii Materiałów

ul. Piotrowo 3, 60-965 Poznań, tel. +48 61 665 2202

e-mail: office_mat@put.poznan.pl, www.wim.put.poznan.pl

dr hab. inż. Jacek Andrzejewski
Instytut Technologii Materiałów
Politechnika Poznańska
ul. Piotrowo 3
61-138 Poznań
Email: jacek.andrzejewski@put.poznan.pl

Poznań, 18.11.2025

Recenzja pracy doktorskiej

*„Zagospodarowanie odpadowego poli(tereftalanu etylenu) poprzez otrzymywanie
plastyfikatorów tworzyw sztucznych z wykorzystaniem odpadowego PET jako surowca”*

autorstwa mgr inż. Marcina MUSZYŃSKIEGO

Promotor pracy: dr hab. inż. Gabriela DUDEK

Promotor pomocniczy: dr hab. inż. Janusz NOWICKI

Podstawa formalna wykonania recenzji:

Niniejsza recenzja została wykonana na zlecenie Przewodniczącej Rady Dyscypliny Naukowej Inżynierii Chemicznej Politechniki Śląskiej prof. dr hab. inż. Agaty Jakóbiak-Kolon, z dnia 15 października 2025 (RDICH.512.8.2025) oraz na podstawie umowy przygotowanej w związku z tym zleceniem.

1. Uwagi wstępne

Przedstawiona do oceny rozprawa doktorska stanowi podsumowanie prac badawczych doktoranta Marcina Muszyńskiego w zakresie sposobu przygotowania, analizy właściwości i potencjału zastosowań plastyfikatorów otrzymywanych w wyniku dekompozycji odpadowego poli(tereftalanu etylenu) PET. Rozprawa ma charakter eksperymentalny, gdzie w ramach prowadzonych prac realizowane były liczne próby w zakresie reakcji depolimeryzacji PET, metod oczyszczania otrzymanych produktów oraz sposobów zastosowania otrzymanych związków jako plastyfikatorów PVC.

Pomimo iż rozprawa została zakwalifikowana do oceny w ramach dyscypliny Inżynieria Chemiczna, w mojej ocenie praca łączy w swojej tematyce również wątki obejmujące zagadnienia inżynierii materiałowej i procesowej. Dlatego w trakcie oceny rozprawy głównej analizie poddana została wartość merytoryczna opracowania, nie zaś jej aspekty dotyczące wybranej dyscypliny. Ze względu na obszar moich własnych zainteresowań naukowych, w recenzji uwzględniłem głównie moje uwagi dotyczące zagadnień przetwórstwa mieszanek polimerowych otrzymanych w trakcie prac aplikacyjnych oraz ogólne uwagi w zakresie sposobu przedstawienia wyników prac przez doktoranta.

Przedstawiona do oceny rozprawa obejmuje 202 stronicowy tekst, rozpoczynający się od wprowadzenia i opisu celu pracy, w dalszej części autor omawia dotychczasowy stan wiedzy w tematyce pracy. Zasadnicza część rozprawy obejmującą opis metodyki badań i omówienie wyników. Rozdział podsumowuje uzyskane wyniki oraz wnioski zamyka główny tekst pracy na 163 stronach, natomiast w dalszej części autor zamieszcza informacje bibliograficzne, wykaz dorobku naukowego oraz spis tabel i rysunków.

Praca ma typowy trzyczęściowy schemat, gdzie doktorant scharakteryzował problem badawczy w pierwszej części tekstu, następnie opisał metodykę realizowanych eksperymentów i w końcowej części omówił rezultaty prowadzonych prac. Sposób edytowania przedstawionego tekstu jest zgodny z przyjętymi wymaganiami dla prac doktorskich. Tekst główny, numeracja rozdziałów i podrozdziałów są prawidłowo wyedytowane i czytelne.

Studium tematyczne przedstawione w pierwszej części pracy zawiera około 40 stronicowe wprowadzenie do tematyki. Co istotne w ramach tej części przygotowane zostało bardzo obszerne rozeznanie literaturowe, gdzie niemal w każdym akapicie autor odnosi się do licznych pozycji literaturowych. Ogólna liczba referencji zamieszczonych w pracy obejmuje 256 pozycji, co sugeruje bardzo szczegółowe podejście autora do kwestii studium literaturowego. Na uwagę zasługuje znaczna ilość cytowań z zakresu procesu depolimeryzacji PET, co potwierdza zasadniczo fakt wpisywania się badań realizowanych w ramach doktoratu w ogólnoswiatowe trendy prac naukowych.

2. Ocena doboru tematyki rozprawy

Obszar tematyczny podejmowany w omawianej rozprawie doktorskiej obejmuje aspekt depolimeryzacji odpadów poliestrowych z poli(tereftalanu etylenu) oraz zagadnienia zastosowania produktów końcowych tego procesu. Analiza spisu treści oraz samego tekstu pozwala wyłonić kilka głównych wątków tematycznych pracy:

- ogólne omówienie zastosowań i technik otrzymywania poli(tereftalanu etylenu), jego sposobów zbiórki, segregacji i recyklingu,
- opis technik hydrolizy i alkoholizy stosowanych w celu depolimeryzacji PET i innych poliestrów,
- rodzaje katalizatorów stosowanych w poszczególnych metodach oraz techniki oczyszczania produktów depolimeryzacji,
- omówienie podstawowych cech i koncepcji działania plastyfikatorów w przetwórstwie polimerów, oraz przykłady zastosowania plastyfikatorów tereftalowych w przetwórstwie PVC.

Biorąc pod uwagę zakres prowadzonych prac badawczych główny nacisk w trakcie eksperymentów był położony na opracowanie efektywnych metod alkoholizy z udziałem katalizatorów. W trakcie prac wstępnych zastosowano ponad 20 różnych związków, które autorzy podzielili na 3 grupy: katalizatory metaloorganiczne, superzasadowe i ciecze jonowe. Badania wstępne pozwoliły wyselekcjonować układy zastosowane w testach półprzemysłowych, które następnie zostały użyte do plastyfikacji próbek PVC. W trakcie badań doktorant przeprowadził skuteczne próby reakcji w skali półprzemysłowej, co wskazuje na potencjał przeskalowania opracowanej metody i zastosowania w instalacjach wielkotonażowych.

3. Ocena szczegółowa rozprawy

Część literaturowa będąca obszernym wstępem do realizowanych prac badawczych obejmuje dość szeroki zakres tematyczny zebrany w kilkunastu podrozdziałach. W pierwszym krótkim podrozdziale autor omawia podstawowe informacje dotyczące poli(tereftalanu etylenu), w drugiej kolejności zaś przechodzi do charakteryzacji plastyfikatorów, omawia ich rolę w przetwórstwie materiałów polimerowych, a następnie nieco bardziej szczegółowo opisuje istotny z punktu widzenia realizowanych badań przypadek poli(chloru winylu), omawia teorię plastyfikacji dla tego materiału i wskazuje na potencjał zastosowania plastyfikatorów tereftalowych. W kolejnych krótkich podrozdziałach doktorant uzupełnia tematykę przetwórstwa materiałów na bazie PET poprzez omówienie metod zbiórki, segregacji i procesów recyklingu mechanicznego PET. W dalszej części autor przechodzi o omówienia chemicznych metod recyklingu PET, co można uznać za zasadniczy, najważniejszy podrozdział części literaturowej.

Kluczowy z punktu widzenia tematyki rozprawy podrozdział 2.5 omawia w bardzo szerokim zakresie główne techniki depolimeryzacji poli(tereftalanu etylenu). Jako najbardziej podstawowa metoda została tutaj omówiona hydroliza, natomiast z uwagi na tematykę badań własnych pozostała część opisu skupia się na opisie technik alkoholizy, gdzie autor przedstawia bardzo obszerny stan wiedzy w temacie metanolizy, glikozy i pozostałych metod depolimeryzacji PET. W tej części pracy autor przedstawił bardzo szczegółowe opracowanie obejmujące w szczególności omówienie tematyki katalizatorów poszczególnych reakcji alkoholizy, warunków procesu (temperatura, czas, rodzaj rozpuszczalnika), wydajności poszczególnych technik reakcji. Tekst jest uzupełniony o liczne przykłady reakcji i tabele stanowiące zestawienie wyników dla poszczególnych doniesień literaturowych. Część literaturowa została uzupełniona o podrozdział dotyczący metod oczyszczania mieszanin poreakcyjnych, gdzie autor w krótkim paragrafie omówił kilka podstawowych zagadnień związanych z tym zagadnieniem.

W mojej ocenie podrozdział omawiający tematykę plastyfikatorów, mógłby stanowić część końcową opracowania literaturowego, co pozwoliłoby w bardziej logiczny sposób zakończyć tę część rozprawy. Są to tylko moje osobiste preferencje, a sama kolejność prezentowanych podrozdziałów nadal ułatwia nawigację w tekście pracy. Jako pewien mankament uważam brak bardziej szczegółowego opisu technologii przetwórstwa PET, w szczególności techniki produkcji butelek, co stanowi w kontekście technik recyklingu kluczowy element/czynnik wpływający na późniejszy obieg materiału w łańcuchu logistycznym. Również w przypadku podrozdziału omawiającego metody oczyszczania

produktów depolimeryzacji, wskazane byłoby rozwinięcie tematyki i bardziej szczegółowe przedstawienie aktualnego stanu wiedzy.

Zasadniczy opis metodyki prowadzonych eksperymentów zamieszczono w rozdziale 3. Autor opisał sposób przygotowania poszczególnych instalacji/reaktorów używanych w trakcie badań wstępnych oraz aplikacyjnych. Przy czym w mojej ocenie zamieszczone informacje są dość wybiórcze i nieusystematyzowane. Poza krótkim opisem autor przedstawił 3 zdjęcia instalacji, co w mojej opinii jest niewystarczające. Podrozdział powinien być uzupełniony o bardziej szczegółowe opisy, schematy poszczególnych procedur oraz wygląd przykładowych produktów procesu depolimeryzacji.

W dalszej części autor omówił zastosowane metody analityczne, zarówno te dotyczące pomiarów dla mieszanin reakcyjnych jak i próbek plastyfikowanych PVC. W tej części pracy, ze względu na znaczną ilość zastosowanych technik pomiarowych, opis metody, aparatury i warunków pomiaru został zredukowany do minimum, co jest dość zrozumiałym zabiegiem przy opisie około 20 metod analitycznych. Niemniej autor zamieścił liczne informacje na temat zastosowanej normy lub procedury pomiarowej co pozwala czytelnikowi odtworzyć sposób postępowania w trakcie prac badawczych.

Opis metodyki uzupełnia wykaz zastosowanych odczynników, obejmujący jego dostawcę i poziom czystości. Biorąc pod uwagę bardzo szeroki wachlarz prowadzonych pomiarów, w szczególności prac na etapie badań przesiewowych opis metodyki jest wyczerpujący i pozwala na odtworzenie omawianych eksperymentów na podstawie dostarczonych w rozprawie informacji.

Właściwy opis przeprowadzonych eksperymentów omówiony został w rozdziale 4. Autor w pierwszej kolejności przedstawił wyniki charakterystyki zastosowanych katalizatorów. W tej części omówione zostały głównie wyniki pomiarów NMR, FTIR i TGA/DTG dla czystych związków, podczas gdy wyniki dla opracowanych technik depolimeryzacji zostały podsumowane w dalszych podrozdziałach. Ponieważ poniższy podrozdział stanowi kluczową część pracy, dlatego warto wskazać na ten fragment rozprawy. W mojej ocenie autor dokonał słusznego wyboru systematyzując wyniki prac w postaci tabelarycznej, co znacznie ułatwia orientację w dość dużej liczbie przeprowadzonych reakcji/eksperymentów. Opis wyników zamieszczony w tym podrozdziale jest dość obszerny i rzeczowy, niestety w dalszym ciągu w tekście występują znaczne trudności w identyfikacji toku postępowania, co w szczególności jest utrudnione przez występowanie wielu pełnostronicowych tabel i wykresów. Jako istotny brak w tej części pracy uważam pominięcie dokumentacji fotograficznej dla otrzymanych mieszanin poreakcyjnych, autor opisuje ich kolor lub konsystencję (lepkość), jednak biorąc pod uwagę te cechy powinny one zostać lepiej scharakteryzowane lub porównane. Podrozdział 4.3 obejmuje omówienie prac realizowanych na reaktorze o pojemności 20 litrów, gdzie prace obejmowały tylko ograniczoną ilość prób. Wybór składu mieszaniny reakcyjnej został dobrany na podstawie testów wstępnych. W przypadku prób aplikacyjnych autor skupił się głównie na ocenie efektywności procesu alkoholizy, prowadzonej w trzech wariantach, za pomocą alkoholu 2-etyloheksylowego, izononyowego i oraz izodecyłowego. Część otrzymanych mieszanin poreakcyjnych poddano rektyfikacji i oczyszczeniu za pomocą sorbentów, gdzie w dalszych próbkach ich zastosowania jako dodatków do PVC zostały oznaczone jako plastyfikatory „surowe” i „oczyszczone”.

W części aplikacyjnej opisu prac autor przygotował serię wyrobów uplastycznianych na mieszalniku periodycznym, gdzie w skład mieszanki poza PVC wchodził stabilizator procesowy, kreda oraz wybrany plastifikator wytworzony na etapie depolimeryzacji PET. Podrozdział omawia bardzo kluczowy aspekt aplikacyjny prowadzonych prac, jednak same wyniki badań zostały potraktowane z niezbyt należytą uwagą. Zakres realizowalnych prac jest dość obszerny, zostały przeprowadzone testy twardości, gęstości, oraz pomiary migracji plastifikatora, jednak poza wyszczególnieniem wyników w formie tabelarycznej, omówienie wyników ma bardzo skrótową formę, dane podane w tabeli 58 nie zostały uzupełnione o wartości błędu pomiarowego. Pomimo iż próbki wykonywane były na mieszalniku periodycznym i autorzy podają czas plastyfikacji, w wynikach trudno się doszukać krzywych plastyfikacji, które w bardziej szczegółowy sposób opisują ten proces. Autorzy wskazują też na różnice gęstości, które w mojej opinii mogłyby świadczyć o porowatości, co nie zostało przeanalizowane. Wygląd poszczególnych próbek został też przedstawiony na fotografiach o bardzo niskiej rozdzielczości, a przyczyny dużych różnic w kolorze próbek, nie zostały dostatecznie opisane i wyjaśnione.

Ostatni podrozdział dotyczący pomiarów efektywności procedury usuwania zabarwienia za pomocą różnych odmian węgla aktywnych można potraktować jako formę uzupełnienia badań, gdzie autor dokonuje oceny efektywności usunięcia barwy mieszaniny reakcyjnej przez różne odmiany sorbentów (węgli aktywnych). W mojej ocenie wyniki te nie wnoszą istotnego wkładu w samą pracę, są też opisane w mało szczegółowy sposób. Mogą mieć jednak istotny wpływ na dalsze badania aplikacyjne.

Wnioski podsumowujące pracę przedstawione w rozdziale 5 stoją w korelacji z wynikami przedstawionymi w poprzedzających rozdziałach rozprawy. W mojej ocenie rozdział końcowy rozprawy mógłby omówić w nieco bardziej szczegółowy sposób potencjał aplikacyjny przedstawionych wyników, jednak jest to tylko sugestia niezwiązana z merytoryczną wartością samego opracowania.

4. Uwagi szczegółowe

Ze względu na moją główną specjalizację obejmującą techniki przetwórstwa tworzyw termoplastycznych, uwagi szczegółowe odnoszą się głównie do tego aspektu realizowanych w ramach pracy badań. Komentarze odnoszą się głównie do pewnych nieścisłości w tekście rozprawy, i nie dotyczą istotnych błędów merytorycznych, których w tekście nie znalazłem, mogą stanowić sugestię w przypadku dalszych publikacji w tej tematyce. Wskazane jest jednak by autor odniósł się do tych komentarzy w trakcie dalszej procedury dyplomowej w formie pisemnej lub ustnej.

1. Czy w trakcie wszystkich prac został zastosowany identyczny rodzaj płatków PET, i czy kolor zanieczyszczonych mieszanin poreakcyjnych był związany z zabarwieniem samych odpadów PET?
2. Czy w trakcie procesu uplastyczniania wystąpiły problemy z degradacją materiału PVC? Zabarwienie próbek referencyjnych sugeruje takie problemy.
3. Czy po uwzględnieniu wartości błędu statystycznego wyników pomiarów dla próbek aplikacyjnych z PVC (tabela 58) zmiany poszczególnych wartości średnich mają wpływ na realne różnice pomiędzy poszczególnymi próbkami?

Uwagi edycyjne:

1. W przypadku wielu zamieszczonych rysunków i tabeli przypisy zostały zamieszczone na kolejnej stronie pracy, co negatywnie wpływa na estetykę pracy. Uwaga ta dotyczy też przeniesienia części tabel na kolejną stronę, gdzie dla podanych wartości brakuje punktów odniesienia, czyli rodzaju próbki lub analizowanej wartości.
2. W wielu przypadkach rozmiar zamieszczonych zdjęć i rysunków jest nieadekwatny do zamieszczonej treści, dotyczy to przede wszystkim zamieszczonych chromatogramów i widm NMR, gdzie poszczególne wyniki mogłyby być zamieszczone w załącznikach.

5. Podsumowanie i wnioski końcowe

Analiza przesłanego do recenzji tekstu pracy pozwala na sformułowanie kilku kluczowych dla procedury dyplomowej wniosków:

- praca wskazuje na duże doświadczenie doktoranta w planowaniu i realizacji eksperymentów naukowych w obrębie technik reakcji depolimeryzacji na materiałach pochodzenia odpadowego,
- tematyka pracy bazuje na bardzo istotnej koncepcji efektywnego zagospodarowania odpadów materiałów polimerowych,
- główny cel pracy został osiągnięty, dyplomant opracował skuteczną i skalowalną procedurę otrzymywania plastyfikatorów PVC z odpadów pokonsumenckich PET,
- wyniki prac mają wysoki potencjał publikacyjnym i patentowy co zostało potwierdzone przez aktywność autora na tym polu,
- rozprawa doktorska przygotowana w postaci monografii stanowi wartościowe podsumowanie dla przeprowadzonych prac konstruktorskich i pomiarów technologicznych, znaczna część wyników ma też potencjał publikacyjny.

Biorąc pod uwagę powyższe wnioski należy stwierdzić, że rozprawa doktorska pt. *„Zagospodarowanie odpadowego poli(tereftalanu etylenu) poprzez otrzymywanie plastyfikatorów tworzyw sztucznych z wykorzystaniem odpadowego PET jako surowca”* spełnia wszystkie wymogi pracy doktorskiej opisane w ustawie „Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce”. W związku z powyższym stwierdzeniem chciałbym prosić o przyjęcie rozprawy Pana Marcina Muszyńskiego i realizację dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Podpisano odręcznie przez autora