

Recenzja rozprawy doktorskiej

Tytuł rozprawy: Zagospodarowanie odpadowego poli(tereftalanu etylenu) poprzez otrzymywanie plastyfikatorów tworzyw sztucznych z wykorzystaniem odpadowego PET jako surowca

Autor: mgr inż. Marcin Muszyński

Opis tematyki rozprawy

Rozprawa doktorska Marcina Muszyńskiego została zrealizowana w Katedrze Fizykochemii i Technologii Polimerów Politechniki Śląskiej oraz w Sieci Badawczej Łukasiewicz – Instytucie Ciężkiej Syntezy Organicznej "Blachownia" w ramach badań współfinansowanych przez Ministerstwo Edukacji i Nauki, grant nr DWD/5/0567/2021.

Rozprawa doktorska poświęcona jest opracowaniu metody zagospodarowania odpadowego poli(tereftalanu etylenu) (PET) poprzez jego chemiczny recykling do postaci estrów kwasu tereftalowego pełniących rolę plastyfikatorów polimerowych. Praca koncentruje się na procesie alkoholizy PET z użyciem alkoholi krótkołańcuchowych, np.: izopropanol, n-butanol oraz długołańcuchowych, np.: 2-etyloheksanol, izononanol, izodekanol, w celu otrzymania tereftalanów dialkilowych o funkcjonalnościach pozwalających na wykorzystanie jako bardziej ekologiczne plastyfikatory tworzyw sztucznych. We wprowadzeniu oraz w części literaturowej autor przedstawia obecną rolę tworzyw sztucznych, w tym głównie PET w gospodarce, w szczególności w kontekście funkcjonalności plastyfikatorów. Ponadto autor wskazuje na skalę produkcji, podkreślając narastający problem odpadowy wynikający z trwałości PET. Ponadto wskazano, że konwencjonalne metody utylizacji odpadów PET – głównie recykling mechaniczny i spalanie z odzyskiem energii – mają istotne ograniczenia. Na tym tle autor motywuje podjęcie tematyki recyklingu chemicznego PET, umożliwiającego rozkład polimeru do związków niskocząsteczkowych, które mogą zostać ponownie wykorzystane do syntezy materiałów. Spośród różnych procesów depolimeryzacji PET przedstawiono metody, m.in.: hydrolizy, glikolizy, alkoholizy, czy też z użyciem cieczy jonowych lub rozpuszczalników eutektycznych. W literaturze brakowało jednak szerszych badań nad alkoholizą z udziałem alkoholi o wyższej masie cząsteczkowej.

W rozprawie postawiono hipotezę, że wykorzystanie wyższych alkoholi do depolimeryzacji PET pozwoli otrzymać tereftalany dialkilowe mogące zastąpić tradycyjne plastyfikatory ftalanowe. Autor zauważa, że tereftalowe plastyfikatory (takie jak tereftalan di(2-etyloheksylu), tereftalan diizononylu czy diizodecylu) stanowią atrakcyjną alternatywę dla powszechnie stosowanych ftalanów, których szkodliwość dla zdrowia została uprawdopodobniona w literaturze. Praca wykorzystuje zatem odpadowy PET jako surowiec do syntezy takich plastyfikatorów, co dodatkowo zmniejsza zapotrzebowanie na czysty kwas tereftalowy jako substrat chemiczny. Głównym celem rozprawy było opracowanie procesu chemicznego recyklingu PET do estrów tereftalanowych z użyciem wybranych alkoholi oraz ocena

Strona 1 z 8

przydatności otrzymanych estrów jako plastyfikatorów. Autor zrealizował ten cel poprzez następujące etapy badawcze: (1) analizę literatury i patentów, (2) syntezę i zastosowanie katalizatorów – w tym nowych cieczy jonowych – w procesie depolimeryzacji, (3) badania przesiewowe szeregu katalizatorów metaloorganicznych (głównie związków cyny) i superzasadowych w reakcji alkoholizy PET, (4) przeprowadzenie procesu w skali laboratoryjnej oraz skali półtechnicznej (reaktor 20 dm³), oraz (5) badanie właściwości plastyfikacyjnych wybranych produktów w mieszkach polimerowych (PVC). Tak zakrojona tematyka łączy zagadnienia z zakresu chemii polimerów, katalizy i inżynierii chemicznej, a jej rezultatem ma być nowa metoda recyklingu odpadu PET z wytworzeniem cennych produktów o wysokiej wartości dodanej.

Aktualność i znaczenie naukowe problemu

Poruszony w rozprawie problem zagospodarowania odpadów PET jest bardzo aktualny i istotny naukowo. Tworzywa sztuczne, a szczególnie poli(tereftalan etylenu), należą do najczęściej stosowanych materiałów inżynierskich – ich masowa produkcja i konsumpcja (np. w postaci butelek czy włókien) skutkuje narastającą ilością odpadów trudnych do unieszkodliwienia. PET jest polimerem niezwykle trwałym i praktycznie nieulegającym degradacji, co sprawia, że składowanie lub niekontrolowane wyrzucanie tych odpadów stanowi poważne obciążenie środowiskowe. W obliczu rosnącej presji regulacyjnej i społecznej, konieczne są pilnie nowe rozwiązania pozwalające na zamknięcie obiegu tego surowca, zgodnie z ideą gospodarki o obiegu zamkniętym.

Rozprawa wpisuje się w ten nurt, proponując chemiczny recykling PET jako alternatywę lub uzupełnienie dla recyklingu mechanicznego i spalania. Aktualność podejścia potwierdza fakt, że recykling chemiczny (depolimeryzacja) PET cieszy się coraz większym zainteresowaniem zarówno w badaniach naukowych, jak i w przemyśle. Ważny do podkreślenia jest fakt, że praca dotyczy nie klasycznych metod depolimeryzacji (hydrolizy do kwasu tereftalowego czy glikolizy do oligomerów), lecz alkoholizy PET do estrów – obszaru wciąż słabo rozpoznanego. Autor słusznie identyfikuje lukę w dotychczasowych badaniach: choć procesy depolimeryzacji PET były szeroko opisywane, to alkoholiza z udziałem wyższych alkoholi nie była dotąd przedmiotem kompleksowych badań ani w skali laboratoryjnej, ani przemysłowej. Zaproponowany w rozprawie temat stanowi zatem pionierskie ujęcie ważnego zagadnienia – potencjalnie umożliwiającego otrzymywanie z odpadowego PET nowych, bezpieczniejszych plastyfikatorów w miejsce ftalanów powszechnie uznawanych za szkodliwe. Ftalanowe plastyfikatory budzą uzasadnione obawy zdrowotne i środowiskowe, stąd poszukiwanie alternatyw jest niezwykle istotne z przemysłowego punktu widzenia. Zaprezentowane w pracy podejście łączy zatem dwa aktualne wyzwania: ograniczenie zanieczyszczenia plastikiem oraz eliminację toksycznych dodatków z tworzyw sztucznych. Z naukowego punktu widzenia, rozwiązanie zaproponowane przez autora przyczynia się do poszerzenia wiedzy na temat mechanizmów i efektywności chemicznego recyklingu polimerów, zwłaszcza w kontekście mało zbadanej wcześniej alkoholizy PET wyższymi alkoholami.

Należy również podkreślić znaczenie praktyczne poruszanego problemu. Jeżeli opracowana technologia okaże się opłacalna i zostanie wdrożona, może przyczynić się do zmniejszenia ilości odpadów trafiających na wysypiska lub do spalarni, a zarazem do wytwarzania cennych produktów (plastyfikatorów) z odpadów. Takie działanie wpisuje się w globalne trendy zrównoważonego rozwoju, minimalizacji odpadów i rozwoju zielonej chemii. Podsumowując, tematyka rozprawy jest bardzo aktualna i o dużym znaczeniu – odpowiada na konkretną potrzebę przemysłu tworzyw sztucznych i ochrony środowiska, a jednocześnie stanowi ambitne wyzwanie naukowe.

Oryginalność i nowość rozwiązań

Rozprawa doktorska cechuje się wysoką oryginalnością i wnosi nowe elementy do stanu wiedzy. Przede wszystkim, jak już zaznaczono, jest to pierwsze tak kompleksowe opracowanie dotyczące alkoholizy odpadowego PET z użyciem wyższych alkoholi. Autor nie ograniczył się do prostych doświadczeń laboratoryjnych, lecz przeprowadził wszechstronne badania, obejmujące: poszukiwanie skutecznych katalizatorów, optymalizację warunków reakcji, skalowanie procesu, oczyszczanie produktów oraz ocenę właściwości użytkowych otrzymanych estrów. Dzięki temu praca dostarcza nowej wiedzy zarówno w zakresie chemii samego procesu depolimeryzacji, jak i potencjalnych zastosowań otrzymanych związków.

Do nowatorskich osiągnięć należą zwłaszcza:

Wytypowanie efektywnych układów katalitycznych do alkoholizy PET. Autor zbadał szereg katalizatorów, w tym organiczne związki cyny, związki metali i superzasady (np. zasadowe ciecze jonowe). Odkryto, że katalizatory cynoorganiczne – takie jak szczawian cyny czy monobutylo-tris(2-etyloheksanian) cyny – wykazują najwyższą aktywność i selektywność w badanym procesie. Osiągnięte wydajności estrów tereftalowych są bardzo wysokie, sięgające ~85–90% w najlepszych warunkach (np. dla alkoholizy 2-etyloheksanolem uzyskano 90,16% mol tereftalanu). Ponadto, wybrane katalizatory charakteryzują się odpornością na zanieczyszczenia obecne w odpadzie oraz umożliwiają prowadzenie procesu z niewielkim nadmiarem alkoholu – jest to istotna innowacja, gdyż dotychczas większość procedur wymagała znacznego nadmiaru alkoholu i czystego surowca, co ograniczało praktyczność technologii. W pracy wykazano, że możliwe jest skuteczne przetwarzanie rzeczywistego odpadu PET (niepoddanego kosztownemu wstępnemu oczyszczaniu) dzięki doborowi odpowiednich katalizatorów i w skali do 20 dm³.

Synteza i wykorzystanie nowych katalizatorów: Na uwagę zasługuje fakt, że autor sam zsyntetyzował nowe zasadowe ciecze jonowe i zbadał ich działanie katalityczne. Stanowi to dodatkowy element oryginalny – eksploracja niekonwencjonalnych katalizatorów – choć ostatecznie najlepsze okazały się katalizatory cynoorganiczne, to badania nad cieczami jonowymi poszerzają zakres wiedzy o mechanizmach katalizy zasadowej.

Zaproponowanie metody oczyszczania produktów alkoholizy: Jednym z wyzwań było usunięcie barwnych zanieczyszczeń pochodzących z barwników PET (np. z butelek kolorowych). Autor przebadiał różne sorbenty i po raz pierwszy wskazał wysoko porowate węgle aktywne jako skuteczne materiały do adsorpcyjnego usuwania tych zanieczyszczeń. Wytypowane zostały nowe sorbenty węglowe, dotąd nieopisywane w literaturze w kontekście recyklingu PET, które znacząco redukują zabarwienie produktów. To oryginalne rozwiązanie poprawia jakość uzyskiwanych plastyfikatorów i zwiększa ich szanse na zastosowanie praktyczne.

Wytworzenie dwóch typów nowych plastyfikatorów: W wyniku badań otrzymano dwa główne rodzaje estrów tereftalowych (dla alkoholi niższych i wyższych), które mogą znaleźć zastosowanie jako plastyfikatory tworzyw. Oznacza to, że autor nie tylko zademonstrował sam proces recyklingu, ale też dostarczył dowodu konceptu na praktyczną użyteczność otrzymanych związków.

Skala półtechniczna – demonstracja wdrożeniowa: Niezwykle cennym, nowatorskim elementem jest przeprowadzenie syntezy plastyfikatorów z PET w skali 20 dm³. Rzadko zdarza się, by badania doktorskie wychodziły poza skalę laboratoryjną. Tutaj autor dowiódł, że proces można z powodzeniem przeskalować, zachowując wysoką wydajność i powtarzalność, co potwierdza potencjał wdrożeniowy technologii. Skalowanie umożliwiło także obserwację zachowania

katalizatora w dłuższym procesie i ocenę ewentualnych problemów technicznych – takie praktyczne ujęcie jest rzadkością w rozprawach naukowych i stanowi istotną wartość dodaną.

Podsumowując, nowość naukowa rozprawy jest bezdyskusyjna. Praca wypełnia lukę w wiedzy (alkoholiza PET wyższymi alkoholami), proponuje oryginalne rozwiązania technologiczne (dobór katalizatorów, metoda oczyszczania) oraz dostarcza nowych danych eksperymentalnych o dużym znaczeniu aplikacyjnym. Autor sam podkreśla, że jego badania stanowią pierwsze całościowe ujęcie tematu w literaturze, co trudno przecenić. Wyniki mogą stanowić podstawę do kontynuacji prac zarówno badawczych (optymalizacja, badania trwałości nowych plastyfikatorów) jak i rozwojowych zmierzających do implementacji przemysłowej.

Poprawność metodologiczna badań

Metodyka przeprowadzonych badań jest poprawna, starannie zaplanowana i odpowiada celom pracy. Rozprawa ma klasyczną i przemyślaną strukturę: po wprowadzeniu i przeglądzie literatury następuje opis aparatury i metod badawczych, wyniki własne wraz z dyskusją oraz podsumowanie i wnioski. Taki układ ułatwia śledzenie toku rozumowania autora – najpierw osadza on swoje badania w kontekście teoretycznym, następnie precyzyjnie opisuje, *jak* przeprowadził eksperymenty, by wreszcie przedstawić uzyskane wyniki.

Dobór metod badawczych jest adekwatny i wyczerpujący. Autor wykorzystał szeroki wachlarz nowoczesnych technik analitycznych do charakterystyki otrzymanych produktów i oceny ich właściwości. W pracy opisano zastosowanie m.in.: chromatografii gazowej (GC-FID, GC-MS) do analizy składu mieszanin poreakcyjnych, spektroskopii NMR oraz FT-IR do identyfikacji strukturalnej otrzymanych estrów, technik termicznych DSC/TGA do badania stabilności termicznej, analizy elementarnej, spektroskopii UV-VIS (np. do oceny zabarwienia) czy analiz sorpcji azotu do scharakteryzowania porowatości sorbentów. Tak kompleksowe podejście analityczne gwarantuje rzetelność identyfikacji produktów reakcji i pozwala wszechstronnie ocenić ich parametry użytkowe. Na uwagę zasługuje też fakt, że pomiary były wykonywane z należytą starannością – w tabelach wyników podano nie tylko wartości średnie, ale i odchylenia standardowe, co świadczy o powtarzalności eksperymentów i statystycznym opracowaniu danych. Autor zadbał o odpowiednią liczbę powtórzeń doświadczeń oraz stosował próby kontrolne, dzięki czemu wnioski wyciągane z wyników są dobrze ugruntowane.

Zakres badań został dobrany logicznie: od badań przesiewowych na małą skalę po szczegółowe eksperymenty z najlepszymi układami (optymalizacja warunków, analiza kinetyki, tolerancja na zanieczyszczenia). Następnie przejście do skali większej (20 dm³) było posunięciem ambitnym, ale uzasadnionym – umożliwiło zweryfikowanie, czy uzyskane wcześniej wyniki mają przełożenie na realia procesowe. Metody oczyszczania produktów (destylacja próżniowa, adsorpcja na węglach aktywnych) zostały dobrane odpowiednio do natury zanieczyszczeń i były poparte analizą literatury. Całość badań prowadzono w sposób systematyczny – kolejne eksperymenty wynikały z poprzednich, co świadczy o umiejętności logicznego planowania i reagowania na pojawiające się wyzwania eksperymentalne.

Pod względem technicznego wykonania eksperymentów, praca również zasługuje na uznanie. Autor wykazał się znajomością obsługi zaawansowanej aparatury laboratoryjnej (reaktory ciśnieniowe i z mieszadłem, chromatografy, spektrometry itp.) oraz prawidłowo przeprowadził syntezę kilku związków chemicznych, np.: cieczy jonowych.

Reasumując, metodologia badań nie budzi zastrzeżeń. Praca została wykonana zgodnie z dobrymi praktykami badawczymi, a zastosowane metody i narzędzia są adekwatne do postawionych pytań naukowych. Autor udowodnił, że potrafi

samodzielnie zaprojektować i przeprowadzić złożone eksperymenty chemiczne oraz poprawnie je zinterpretować.

Dobór literatury

Część literaturowa rozprawy świadczy o gruntownej znajomości tematu przez autora oraz o umiejętności wyszukiwania i selekcji informacji z różnych źródeł. Literatura przedmiotu została dobrana kompleksowo – obejmuje zarówno podstawowe informacje o chemii i technologii PET, klasyczne metody jego recyklingu, jak i najnowsze osiągnięcia z dziedziny recyklingu chemicznego, plastyfikatorów polimerowych oraz katalizy. Wykaz literatury liczy aż ponad 250 pozycji bibliograficznych, co jest liczbą imponującą, ale uzasadnioną zakresem pracy. Co istotne, wśród cytowanych źródeł znajdują się bardzo aktualne publikacje – również z ostatnich lat 2022–2025.

W mojej ocenie przegląd literatury jest wyczerpujący i dobrze zbalansowany. Autor przedstawił tło historyczne produkcji i recyklingu PET, omawiając szczegółowo mechanizmy poszczególnych metod (hydroliza, glikoliza, alkoholizy) i ich wady oraz zalety. Następnie płynnie przeszedł do tematyki alkoholizy, opisując dotychczasowe próby zastosowania różnych alkoholi i katalizatorów (w tym przytaczając konkretne przykłady z literatury i patentów komercyjnych).

Dobór literatury obejmuje też obszar plastyfikatorów – autor opisuje, czym są plastyfikatory, jakie mają właściwości i jakie alternatywne związki są już stosowane. Ten segment literatury również należy ocenić pozytywnie ponieważ pokazuje szerszy kontekst aplikacyjny prowadzonych badań.

Pod względem formalnym, cytowania są poprawne i konsekwentne. W tekście odwołania do piśmiennictwa pojawiają się tam, gdzie trzeba, wspierając prezentowane informacje faktograficzne. Bibliografia jest ułożona w kolejności cytowań, zgodnie z przyjętymi standardami edytorskimi.

Reasumując, literatura została dobrana wzorowo. Autor wykorzystał bogaty zestaw źródeł, co zapewniło solidne podstawy teoretyczne podjętych badań.

Sposób prezentacji wyników oraz ich interpretacja

Wyniki badań zostały zaprezentowane w pracy w sposób przejrzysty i logiczny, a ich interpretacja jest rzeczowa i poparta argumentami. Rozdział rezultaty podzielono na podrozdziały odpowiadające kolejnym etapom badań, co ułatwia śledzenie toku eksperymentów. Tekst jest bogato ilustrowany rysunkami, wykresami i tabelami, które znacząco ułatwiają zrozumienie danych liczbowych i zależności. Jakość tych elementów graficznych jest dobra – są czytelne, odpowiednio opisane (legendy, jednostki, oznaczenia statystyczne) i wprost powiązane z omówieniem w tekście.

Autor umiejętnie prowadzi czytelnika przez wyniki: najpierw przedstawia badania wstępne (np. wyniki testów różnych katalizatorów, zestawione w tabelach porównawczych), następnie skupia się na najlepszych układach i omawia je dogłębnie. Przykładowo, wyniki wydajności alkoholizy dla kilkunastu katalizatorów cynoorganicznych zostały zestawione w tabeli, co pozwoliło od razu wychwycić najskuteczniejsze z nich. Następnie autor analizuje, dlaczego właśnie te katalizatory są tak aktywne – odwołując się do ich właściwości chemicznych i mechanizmu transestryfikacji. W interpretacji wyników porównano je z danymi literaturowymi, co dodaje wiarygodności wnioskowi. Na przykład, autor wskazuje, że otrzymane przez niego wydajności estrów są wyższe lub porównywalne z najlepszymi wynikami publikowanymi wcześniej dla recyklingu PET. Podkreślono też, że nowe katalizatory umożliwiają znaczne skrócenie czasu reakcji.

Wyniki dotyczące właściwości otrzymanych plastyfikatorów zostały również przejrzysto przedstawione. Autor wykonał szereg testów aplikacyjnych na

Strona 5 z 8

mieszkankach PVC. Wyniki te zilustrowano wykresami porównującymi mieszaniny zawierające nowe plastyfikatory z próbkami referencyjnymi. Autor stwierdza, że nowe plastyfikatory wykazują parametry co najmniej porównywalne do komercyjnych, a w niektórych aspektach nawet przewyższają tradycyjne dodatki. Ta konkluzja jest dobrze udokumentowana wynikami eksperymentów i ma duże znaczenie praktyczne, pokazując realną wartość otrzymanych związków.

Na pochwałę zasługuje sposób, w jaki autor dyskutuje wyniki. Nie ogranicza się do opisu obserwacji, lecz stara się je wyjaśniać i łączyć z wiedzą teoretyczną, np. omawiając nieco niższe wydajności katalizatorów superzasadowych, wskazuje możliwe przyczyny i odwołuje się do mechanizmów chemicznych. Analizując skuteczność usuwania barwników przez różne węgle aktywne, zwraca uwagę na korelację między strukturą porowatą węgla a zdolnością adsorpcji barwnych zanieczyszczeń. Tego typu spostrzeżenia świadczą o głębszym zrozumieniu badanych zjawisk.

Co ważne, autor jasno zaznacza granice zastosowania swoich wyników i dostrzega aspekty wymagające dalszych badań. W podsumowaniu stwierdza m.in., że choć opracowana metoda jest efektywna i ma potencjał przemysłowy, to konieczna jest dalsza optymalizacja etapu usuwania zabarwienia (gdyż węgle aktywne nie eliminują go całkowicie), a także długoterminowe testy stabilności nowych plastyfikatorów. Takie podejście pokazuje krytyczne spojrzenie autora na własne rezultaty i unikanie nieuprawnionych uogólnień.

Pod względem językowym i klarowności przekazu, rozdział z wynikami jest napisany poprawnie. Styl jest rzeczowy, naukowy, pozbawiony zbędnych dygresji. Każda tabela i rysunek są omówione w tekście, co zapewnia samowystarczalność opisu. Nie zaobserwowałem również tendencyjności czy pomijania niewygodnych wyników – autor rzetelnie przedstawia także mniej pozytywne obserwacje (np. niższą efektywność niektórych katalizatorów, częściowe sukcesy w usuwaniu barwników), po czym konstruktywnie je analizuje.

Podsumowując, prezentacja wyników w rozprawie stoi na wysokim poziomie merytorycznym i edytorskim. Interpretacja danych jest wnikliwa, spójna z celami pracy i prowadzi do logicznych wniosków. Dzięki temu czytelnik ma pełne zaufanie do przedstawionych argumentów, a cele rozprawy można uznać za osiągnięte i udowodnione wynikami.

Uwagi krytyczne

Moje uwagi krytyczne do recenzowanej rozprawy mają charakter drobnych sugestii i nie podważają ogólnej wysokiej oceny pracy:

Usunięcie zanieczyszczeń barwnych: Jak sam autor zauważa, zastosowane węgle aktywne **nie zapewniły całkowitego odbarwienia** produktów alkoholizy – choć znacząco zredukowały intensywność barwy, pewna jej resztkowa ilość pozostała. Konieczność dalszej optymalizacji tego etapu (dobór jeszcze lepszego sorbentu bądź warunków procesu adsorpcji) stanowi wyzwanie na przyszłość. Być może warto rozważyć połączenie adsorpcji z innymi metodami celem uzyskania całkowicie bezbarwnego produktu, co mogłoby mieć znaczenie w zastosowaniach wymagających wysokiej czystości optycznej estrów.

Aspekty ekonomiczne i środowiskowe: Praca koncentruje się głównie na zagadnieniach chemiczno-technologicznych. Choć to zrozumiałe na etapie badań podstawowych, to dla pełnego obrazu przydatności proponowanej metody w przyszłości warto byłoby pokusić się o wstępną analizę ekonomiczną procesu lub chociaż dyskusję na temat opłacalności w porównaniu z istniejącymi technologiami. Na przykład, wartością dodaną byłyby szacunki dotyczące kosztów katalizatorów cy노organicznych czy porównanie kosztu otrzymanego plastyfikatora z cenami rynkowymi tradycyjnych plastyfikatorów. Podobnie, ocena środowiskowa (np. w

kategoriach *green metrics*) pomogłaby wykazać, na ile faktycznie proces jest ekologicznie korzystny. Zdaję sobie jednak sprawę, że takie analizy wykraczają poza ramy typowej rozprawy doktorskiej w dziedzinie chemii – traktuję to raczej jako sugestię kierunku uzupełniających badań, które autor zresztą planuje podjąć (wniosek o finansowanie dalszych prac rozwojowych).

Objętość i styl części literaturowej: Część przeglądowa jest bardzo obszerna, momentami wręcz encyklopedyczna. Choć doceniam gruntowność, miejscami mogłaby być ona bardziej zwięzła. Na przykład podrozdziały wprowadzające ogólnie do chemii poliestrów czy historii odkrycia PET są interesujące, ale nie wszystkie zawarte tam szczegóły były niezbędne dla dalszej części pracy. Z drugiej strony, rozumiem że autor chciał przedstawić pełne tło – a zaprezentowana wiedza faktycznie pozwala lepiej zrozumieć szerszy kontekst. Jest to więc raczej kwestia stylu niż błędu. Na plus należy zaliczyć, że mimo dużej objętości tekst pozostaje komunikatywny i dobrze zorganizowany, z wyraźnymi podsumowaniami na końcu ważnych sekcji.

Drobne uchybienia redakcyjne: Praca jest napisana poprawnym językiem polskim, wolnym od poważnych błędów. Zauważyłem jedynie nieliczne literówki czy drobne uchybienia formatowania, które nie zakłócają odbioru.

Ponadto w przypadku kilku związków chemicznych stosowane dwie różne nazwy, np.: tris(2-etyloheksanian) monobutylo cyny lub monobutylo tris(2-etyloheksanianu) cyny. Korzystna byłaby weryfikacja poprawności nazewnictwa pod kątem zgodności z rekomendacjami IUPAC.

Są to detale, które można łatwo skorygować przed publikacją pracy. Ogólna jakość edytorska (w tym układ tabel, rysunków, wykresów) jest wysoka.

Podkreślam, że powyższe uwagi nie umniejszają wartości merytorycznej rozprawy, a stanowią jedynie wskazówki, które autor mógłby rozważyć przy dalszym rozwijaniu swoich badań. Żaden z wymienionych punktów nie wpływa negatywnie na wniosek końcowy płynący z oceny pracy.

Dorobek naukowy kandydata

Ocena rozprawy doktorskiej nie byłaby pełna bez spojrzenia na ogólny dorobek naukowy jej autora. Z rozdziału 6. *Wykaz dorobku* wynika, że mgr inż. Marcin Muszyński może pochwalić się imponującymi osiągnięciami, rzadko spotykanymi na etapie przewodu doktorskiego.

Przede wszystkim, główne wyniki rozprawy zostały już opublikowane w formie trzech artykułów naukowych w renomowanych czasopismach międzynarodowych. Fakt opublikowania wyników w wysoko punktowanych czasopismach z tzw. Listy JCR świadczy o ich jakości i oryginalności, a także o zdolności kandydata do prezentacji swoich badań na forum międzynarodowym. Należy podkreślić, że we wszystkich tych publikacjach Marcin Muszyński jest pierwszym autorem, co sugeruje jego wiodący wkład w powstanie pracy – to istotne potwierdzenie samodzielności badawczej doktoranta.

Poza wspomnianymi artykułami, kandydat jest współautorem szeregu innych publikacji naukowych (łącznie wykazano 11 pozycji), w tym prac z zakresu cieczy jonowych i katalizy opublikowanych w latach 2013–2019. Świadczy to o systematycznym zaangażowaniu w działalność naukową już od czasów wcześniejszych (prawdopodobnie studiów magisterskich lub pracy w zespole promotora). Taki dorobek, wykraczający poza bezpośrednią tematykę rozprawy, pokazuje wszechstronność zainteresowań kandydata oraz umiejętność pracy zespołowej w projektach badawczych.

Bardzo mocną stroną dorobku są także osiągnięcia o charakterze wdrożeniowym i aplikacyjnym. W ramach pracy doktorskiej dokonano 5 zgłoszeń patentowych, z

Strona 7 z 8

których jedno już zakończyło się udzieleniem patentu. Taki wynik (5 zgłoszeń, 1 patent) jest niezwykle na poziomie pracy doktorskiej i dowodzi, że praca ma wysoki poziom innowacyjności oraz potencjał praktycznego zastosowania. Kandydat wykazał się tutaj również umiejętnością ochrony własności intelektualnej swoich rozwiązań, co jest cenne z punktu widzenia współpracy z przemysłem.

Ponadto, Marcin Muszyński aktywnie prezentował swoje wyniki na konferencjach naukowych – w wykazie osiągnięć wymieniono łącznie 7 wystąpień konferencyjnych (głównie w formie posterów). Świadczy to o tym, że kandydat na bieżąco komunikował postęp swoich badań społeczności naukowej, zdobywając zapewne cenne uwagi i budując sieć kontaktów. Umiejętność przedstawiania i obrony swoich wyników w środowisku naukowym to ważna kompetencja doktoranta – tutaj została ona zrealizowana wzorowo.

Na uwagę zasługują także informacje o udziale kandydata w projektach badawczych – np. autor był zaangażowany w projekt ministerialny dotyczący recyklingu PET w kole naukowym oraz we współpracę z przemysłem (projekt z firmą Orlen Oil w 2012 r.). Choć te osiągnięcia wykraczają poza ramy samej rozprawy, pokazują aktywność kandydata i umiejętność zastosowania wiedzy w praktycznych inicjatywach.

Podsumowując, dorobek naukowy mgr inż. Marcina Muszyńskiego związany z rozprawą jest znakomity i zdecydowanie wykracza poza minimum wymagane na tym etapie. Trzy publikacje z listy JCR, liczne konferencje oraz patenty dowodzą, że kandydat nie tylko przeprowadził wartościowe badania, ale również potrafił je przekuć w konkretne osiągnięcia naukowe i aplikacyjne. Taki wynik w pełni potwierdza, że mamy do czynienia z kompetentnym, dobrze rokującym naukowcem, którego praca już teraz wnosi istotny wkład do dyscypliny.

Wniosek

Rozprawa doktorska Marcina Muszyńskiego *„Zagospodarowanie odpadowego poli(tereftalanu etyleny) poprzez otrzymywanie plastyfikatorów tworzyw sztucznych z wykorzystaniem odpadowego PET jako surowca”* stanowi spójne, dojrzałe i wysoce wartościowe opracowanie o charakterze naukowym. Praca realizuje w pełni założone cele i dostarcza nowych rezultatów o znaczeniu poznawczym oraz potencjale praktycznym. Doktorant wykazał się głęboką wiedzą z zakresu chemii polimerów i recyklingu, umiejętnością samodzielnego planowania i prowadzenia zaawansowanych badań doświadczalnych, a także zdolnością do krytycznej analizy i prezentacji wyników. Oryginalność rozprawy nie budzi wątpliwości, podobnie jak zgodność jej treści z profilem dyscypliny (technologia chemiczna/chemia).

Praca spełnia wszystkie stawiane wymagania formalne i merytoryczne określone dla rozpraw doktorskich. Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Marcina Muszyńskiego zasługuje na pozytywną ocenę. Wnoszę tym samym do Rady Dyscypliny o dopuszczenie Pana Marcina Muszyńskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego, w tym do publicznej obrony rozprawy. Jestem również przekonany, że po pomyślnej obronie, nadanie mu stopnia doktora nauk technicznych będzie w pełni uzasadnione.

Prof. dr inż. Rafał Łukasik



Signed by /
Podpisano przez:

Rafał Marcin Łukasik

Date / Data: 2025-
12-12 07:36