

dr hab. inż. Tomasz Rydzkowski
profesor Politechniki Koszalińskiej
Politechnika Koszalińska
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Energetyki
Raławicka 15-17
75-620 Koszalin

Koszalin, 09.02.2026

RECENZJA ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

mgra inż. Piotra Wieczorka

pod tytułem:

Gospodarka w obiegu zamkniętym termoplastycznych wyprasek wielowarstwowych wytwarzanych metodą współwtryskiwania

Promotor rozprawy doktorskiej: **dr hab. inż. Dariusz Sykutera, prof. PBS**
Promotor pomocniczy: **dr inż. Piotr Czyżewski**

Praca realizowana w dziedzinie **Nauk Inżynieryjno-Technicznych**,
w dyscyplinie **Inżynieria Mechaniczna**

Podstawą opracowania niniejszej recenzji jest pismo numer 3/NB.520.9.2025 z dnia 25.11.2025 roku skierowane do mnie przez Pana Profesora Łukasza Muślewskiego, Przewodniczącego Rady Naukowej Dyscypliny Inżynieria mechaniczna w Politechnice Bydgoskiej im J. i J. Śniadeckich w Bydgoszczy. Podstawę prawną wykonania niniejszej recenzji stanowi ustawa Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. 2024, poz. 1571 z późniejszymi zmianami).

1. Przedmiot recenzji

Przedmiotem recenzji jest rozprawa doktorska pana mgra inż. Piotra Wieczorka pod tytułem: *Gospodarka w obiegu zamkniętym termoplastycznych wyprasek wielowarstwowych wytwarzanych metodą współwtryskiwania*. Dysertacja jest dość obszerna. Wraz ze spisem treści, wykazem oznaczeń i skrótów, spisem źródeł literaturowych, dwoma streszczeniami i jednym załącznikiem ma objętość 204 stron. Sam tekst pracy, rozpoczynający się od analizy i stanu wiedzy a kończący wnioskami i kierunkami dalszych badań zajmuje 176 stron, zawiera łącznie 85 rysunków i 49 tabel.

Rozprawa dotyczy zagadnień przetwórstwa tworzyw polimerowych a zwłaszcza cyklu recyklingu współwtryskiwanych wyprasek polipropylenowych o geometrii kubka z warstwą barierową EVOH. Z uwagi na fakt, że zajmuję się zagadnieniami przetwórstwa oraz recyklingu tworzyw polimerowych, technikami opakowaniowymi, budową maszyn a także inżynierią materiałową, to znam tematykę podjętą przez Autora zagadnień, czuję się zatem kompetentny do opracowania zleconej recenzji.

Analiza tematyki, podjętych problemów i zastosowanych metod badawczych pozwala na stwierdzenie, że badanie możliwości zastosowania recyklatów polipropylenu PP oraz kopolimeru etylenu i alkoholu winylowego EVOH w procesie współwtryskiwania cienkościennych opakowań mieści się na pograniczu dyscyplin naukowych Inżynieria mechaniczna i Inżynieria materiałowa.

Uważam, że w dobie wzrastających wymagań związanych z gospodarką obiegu zamkniętego a zwłaszcza, wynikających z Rozporządzenia UE w sprawie opakowań i odpadów opakowaniowych (PPWR - Packaging and Packaging Waste Regulation) rosnących wymagań co do zawartości recyklatów w opakowaniach podjęta tematyka została właściwie wybrana, jest bardzo aktualna i niezwykle ważna. Po lekturze pracy stwierdzam, że temat został w pełni zrealizowany a postawione w pracy tezy zostały zweryfikowane i potwierdzone. Praca wnosi istotny wkład w wiedzę oraz ma znaczący potencjał aplikacyjny.

2. Tematyka rozprawy doktorskiej

W ocenianej rozprawie podjęto kompleksową analizę zagadnienia wytwarzania i recyrkulacji trójwarstwowych, cienkościennych wyprasek PP/EVOH/PP, wytwarzanych metodą współwtryskiwania, w cyklu mechanicznego recyklingu tych materiałów a badania miały na celu zbadanie technologii współwtryskiwania trójwarstwowych wyprasek o geometrii kubka oraz możliwości wykorzystania recyklatów jako warstwy rdzeniowej (z efektem barierowym) w nowych wypraskach. Hipoteza badawcza zakłada, że istnieje możliwość ponownego zastosowania materiału uzyskanego w procesach recyklingu mechanicznego trójwarstwowych wyprasek opakowaniowych wytworzonych w technologii współwtryskiwania jako warstwy rdzeniowej w nowych wyrobach tego typu, a także możliwość świadomego kształtowania ich właściwości użytkowych, mechanicznych i barierowych poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu wytwarzania.

W ramach realizacji pracy przeprowadzono analizę literaturową oraz zrealizowano bardzo obszerną część eksperymentalną, w której uwzględniono badania wstępne oraz trzy etapy badawcze:

- Badania wstępne – przeprowadzono z użyciem pierwotnych wyprasek PP/EVOH/PP, oceniono przenikalność tlenu oraz podatność materiału na procesy cięcia, rozdrabniania i separacji warstw. Zbadano także właściwości przetwórcze regranulatu otrzymanego z pierwszego cyklu recyklingu mechanicznego. Właściwości te oznaczono za pomocą wskaźnika MFR i pomiarów lepkości pozornej w formie wtryskowej.
- Pierwszy etap badań głównych – dotyczył cienkościennych wyprasek PP/EVOH/PP z różnym udziałem objętościowym warstwy rdzeniowej (8, 10 i 12%). Przeprowadzono szczegółową identyfikację materiałową, weryfikację zawartości EVOH w warstwie rdzeniowej, badania cięcia i rozdrabniania oraz analizę

podatności przemiału na separację faz. Wytypowano najbardziej efektywną geometrię noży ruchomych i optymalną prędkość wirnika młyna, minimalizując energochłonność procesu.

- Drugi etap badań głównych – objął „kapsułki kawowe” PP/EVOH/PP zawierające 5% EVOH w rdzeniu oraz cienkościenne wypraski PP/R₁(PP+EVOH)/PP ze zmiennym udziałem recyklatu. W tym etapie dokonano: rozdrobnienia materiału, regranulowania recyklatu/przemiału R₁(PP+EVOH), formowania nowych wyprasek trójwarstwowych, oceny rozkładu grubości warstw w ścianie, badania właściwości mechanicznych, przenikalności tlenu oraz migracji substancji z wyprasek.
- Trzeci etap badań głównych – analizowano wpływ kolejnych cykli recyklingu mechanicznego na właściwości recyklatów R₁ i R₂ oraz wyprasek wytworzonych z tych materiałów. Zbadano procesy cięcia, rozdrabniania i wytłaczania recyklatu R₂(PP+EVOH), właściwości reologiczne i mechaniczne oraz porównano wytrzymałość próbek po pierwszym i drugim cyklu recyklingu.

Zrealizowany wieloetapowy, obszerny plan badań umożliwia analizę procesu wytwarzania i recyrkulacji trójwarstwowych, cienkościennych wyprasek PP/EVOH/PP, wytwarzanych metodą współwtryskiwania, w cyklu mechanicznego recyklingu tych materiałów a w efekcie analizę możliwości wykorzystania recyklatów jako warstwy rdzeniowej (z efektem barierowym) w nowych trójwarstwowych, cienkościennych wyprasek PP/EVOH/PP. Hipoteza badawcza zakłada, że istnieje taka możliwość, a także że istnieje możliwość kształtowania ich właściwości użytkowych, mechanicznych i barierowych poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu wytwarzania. Badania zrealizowano a wyniki poddano dogłębnej analizie, również statystycznej. W warunkach półprzemysłowych i przemysłowych potwierdzono możliwość wytwarzania wyprasek PP/R(PP+EVOH)/PP ze znaczącym, przekraczającym 50% obj., udziałem recyklatu w warstwie rdzeniowej. Wyznaczono zbiór parametrów procesu współwtryskiwania umożliwiających uzyskanie stabilnej, powtarzalnej struktury trójwarstwowej oraz wysokiego poziomu barierowości przy jednoczesnym braku migracji substancji szkodliwych. Wypełnia to cele postawione na początku badań.

Trzeba zauważyć, że niestety pracę się dość trudno czyta. Mnogość etapów, badanych w tych etapach „obiektów”, różne materiały stosowane w badaniach, różne poziomy dodatku recyklatu, różne zakresy badań i analiz w poszczególnych etapach powodują kłopoty z odbiorem opisywanych zjawisk i efektów.

Tym niemniej trzeba stwierdzić, że podjęta tematyka jest bardzo ważna i aktualna, zgodna z wytycznymi GOZ i PPWR. Należy stwierdzić, że uzyskane wyniki są istotne zarówno pod względem naukowym jak i użytecznym. Tematyka pracy zawiera wiele elementów inżynierii materiałowej, ale niewątpliwie mieści się w zakresie dyscypliny naukowej inżynieria mechaniczna.

3. Opis i ocena struktury recenzowanej rozprawy doktorskiej

Przedstawiona do recenzji dysertacja składa się z siedmiu rozdziałów, które można generalnie podzielić na dwie części. Pierwsza z nich to oczywiście przegląd literatury. Część przeglądowa liczy 59 stron. Scharakteryzowano w nim zagadnienia funkcjonalności współczesnych opakowań, charakterystykę polimerowych materiałów opakowaniowych, w szczególności pod kątem ich funkcji ochronnych, metody wytwarzania wielowarstwowych opakowań barierowych oraz ich podatność na recykling mechaniczny.

Część badawcza liczy 112 strony, ma zatem niemalże dwukrotnie większą objętość od przeglądu literatury. Została ona podzielona na opis badań wstępnych oraz opis badań głównych. W ramach badań wstępnych dokonano oceny przenikalności tlenu przez pierwotne wypraski trójwarstwowe PP/EVOH/PP, stanowiącej poziom odniesienia dla dalszych analiz. Oceniono podatność pierwotnych opakowań PP/EVOH/PP na procesy cięcia, rozdrabniania oraz separacji warstw, a także określono właściwości przetwórcze regranulatu R(PP+EVOH), otrzymanego w pierwszym cyklu recyklingu mechanicznego. Zdolność do płynięcia uplastycznionego recyklatu oznaczono zarówno poprzez wskaźnik MFR, jak i pomiar lepkości pozornej w warunkach rzeczywistego procesu wtryskiwania. Uzupełnieniem badań wstępnych była analiza właściwości mechanicznych wyprasek otrzymanych w standardowym procesie wtryskiwania z regranulatu R(PP+EVOH).

Badania główne podzielono na trzy zasadnicze etapy. W pierwszych dwóch etapach obiektami badań były cienkościenne, trójwarstwowe wypraski opakowaniowe, różniące się kształtem, wymiarami oraz zawartością objętościową warstwy rdzeniowej. Część obiektów badań pochodziła bezpośrednio z firmy Mold-Masters (Cincinnati, USA) oraz firmy Menshen (Barcelona, Hiszpania), natomiast pozostałe zostały wytworzone samodzielnie w warunkach pilotażowych w laboratorium przemysłowym firmy Mold-Masters (Georgetown, Kanada), co zostało potwierdzone w załączniku nr 1. W trzecim etapie badań obiektami badań były standardowe próbki badawcze wytworzone w laboratorium Katedry Technik Wytwarzania Politechniki Bydgoskiej.

W pierwszym etapie badań głównych obiektem badań była cienkościenna wypraska trójwarstwowa PP/EVOH/PP ze zmiennym udziałem objętościowym warstwy rdzeniowej, wynoszącym odpowiednio 8%, 10% oraz 12% obj. W ramach tego etapu przeprowadzono identyfikację składników materiałowych wyprasek oraz podjęto próbę weryfikacji zawartości EVOH w warstwie rdzeniowej. Zrealizowano badania procesów cięcia i rozdrabniania wyprasek PP/EVOH/PP o różnym udziale warstwy barierowej EVOH oraz dokonano oceny podatności recyklatu R₀(PP+EVOH) na separację faz. Na podstawie uzyskanych wyników wytypowano najkorzystniejszą geometrię noży ruchomych oraz najbardziej efektywną, według kryterium zużycia energii i wydajności, prędkość obrotową wirnika młynka.

Drugi etap badań głównych obejmował analizę trójwarstwowych kapsulek do kawy PP/EVOH/PP, w których udział objętościowy kopolimeru etylenu i alkoholu winylowego w warstwie rdzeniowej wynosił 5% obj. Równolegle wytworzono cienkościennie wypraski trójwarstwowe, w których zawartość recyklatu $R_1(\text{PP}+\text{EVOH})$ w części rdzeniowej była zmienna. Oba typy próbek zostały wytworzone poprzez technologię współwtryskiwania. W ramach tego etapu przeprowadzono proces rozdrabniania kapsulek kawowych PP/EVOH/PP do postaci umożliwiającej dalsze przetwórstwo, przy zastosowaniu zmiennej prędkości obrotowej wirnika młyna nożowego. Następnie zrealizowano proces regranulacji recyklatu zawierającego 5% obj. materiału barierowego EVOH, otrzymując regranulat oznaczony jako $R_1(\text{PP}+\text{EVOH})$. Został on wykorzystany do wytwarzania, trójwarstwowych wyprasek PP/ $R_1(\text{PP}+\text{EVOH})$ /PP, w których udział recyklatu w warstwie rdzeniowej był zmieniany w szerokim zakresie. Dla otrzymanych wyprasek dokonano szczegółowej oceny rozkładu grubości warstw w przekroju ścianki w zależności od przyjętych nastaw procesu współwtryskiwania, obejmujących objętość wtrysku materiału rdzeniowego, prędkość wtrysku oraz czas opóźnienia jego podania względem materiału osnowy. Równolegle przeprowadzono badania właściwości mechanicznych wyprasek PP/ $R_1(\text{PP}+\text{EVOH})$ /PP, uwzględniając wpływ zmiennego udziału recyklatu w rdzeniu ścianki cienkościennego opakowania. Kolejnym zadaniem była ocena właściwości barierowych i bezpieczeństwa użytkowego otrzymanych wyprasek. W tym celu wykonano badania przenikalności tlenu przez ścianki wyprasek PP/ $R_1(\text{PP}+\text{EVOH})$ /PP oraz badania migracji substancji z materiału opakowaniowego do cieczy modelowych odpowiednich dla kontaktu z żywnością. Uzyskane wyniki pozwoliły na ocenę wpływu zawartości rozproszonego EVOH w osnowie polipropylenowej na barierowość wobec tlenu oraz potwierdzenie spełnienia wymagań normatywnych w zakresie migracji.

Trzeci etap badań głównych obejmował analizę porównawczą właściwości materiałów wtórnych uzyskanych w pierwszym i drugim cyklu recyklingu mechanicznego. Obiektami badań były trójwarstwowe wypraski ze zmiennym udziałem recyklatu $R_1(\text{PP}+\text{EVOH})$ w warstwie rdzeniowej, a także standardowe wypraski wytworzone w procesie wtryskiwania z regranulatów $R_1(\text{PP}+\text{EVOH})$ oraz $R_2(\text{PP}+\text{EVOH})$. W ramach tego etapu przeprowadzono badania procesów cięcia i rozdrabniania wyprasek trójwarstwowych o różnym udziale recyklatu $R_1(\text{PP}+\text{EVOH})$, a następnie zrealizowano proces wytłaczania regranulującego recyklat $R_2(\text{PP}+\text{EVOH})$, zawierający 2,5% obj. kopolimeru EVOH. Otrzymany materiał oznaczono jako regranulat $R_2(\text{PP}+\text{EVOH})$. Dla recyklatów R_1 i R_2 określono właściwości reologiczne, obejmujące wskaźnik MFR oraz lepkość pozorną, a następnie wytworzono standardowe wypraski w procesie wtryskiwania. Porównano ich właściwości mechaniczne, takie jak wytrzymałość na rozciąganie, moduł Younga oraz udarność, co umożliwiło ocenę wpływu liczby cykli recyklingu mechanicznego na degradację właściwości użytkowych materiałów wtórnych.

W podsumowaniu rozprawy przedstawiono kompleksową analizę zagadnień związanych z wytwarzaniem, właściwościami oraz recyklingiem mechanicznym barierowych opakowań do żywności o strukturze trójwarstwowej PP/EVOH/PP. Zrealizowany program badań doświadczalnych pozwolił na ocenę możliwości wtórnego wykorzystania cienkościennych wyprasek współwtryskiwanych oraz regranulatów R(PP+EVOH) o zróżnicowanej zawartości kopolimeru etylenu i alkoholu winylowego. Wykazano, że pomimo złożonej struktury wielowarstwowej, możliwe jest efektywne zagospodarowanie tego typu odpadów w procesach recyklingu mechanicznego oraz ich ponowne zastosowanie w technologii współwtryskiwania.

Na podstawie wyników badań Doktorant sformułował piętnaście wniosków końcowych, potwierdzające możliwość wtórnego wykorzystania recyklatów R(PP+EVOH) w technologii współwtryskiwania, spełnienie wymagań normatywnych dotyczących poziomów migracji substancji do żywności oraz osiągnięcie poziomu gotowości technologicznej, odpowiadającego prezentacji technologii w ostatecznej formie. Rozwiązania zaproponowane w pracy mają charakter aplikacyjny i zostały opracowane na podstawie badań realizowanych w skali półprzemysłowej i przemysłowej. Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój technologii recyklingu mechanicznego wielowarstwowych opakowań polimerowych, zgodnie z wytycznymi gospodarki cyrkularnej oraz aktualnym ustawodawstwem Unii Europejskiej. Może stanowić nową propozycję dla przemysłu w zakresie ponownego wykorzystania materiałów PCR pochodzących z recyklingu postkonsumenckich opakowań do żywności, również bardzo kłopotliwych w recyklingu cienkowarstwowych opakowań wielowarstwowych.

Pozytywnie ocenić należy proporcję ilości stron pracy poświęconych przeglądowi literatury i części badawczej - część badawcza zdecydowanie dominuje objętościowo. Część przeglądowa liczy 59 stron a część badawcza 112, ma zatem niemalże dwukrotnie większą objętość.

Struktura pracy jest poprawna. Jest typowa dla prac badawczych kwalifikacyjnych. Praca jest obszerna ale podział na rozdziały jest kompletny i logiczny. Trzeba jednak również zauważyć, że ilość etapów, odmiennosć badanych w tych etapach „obiektów”, różne materiały stosowane w badaniach, również różne metodyki pomiarów oraz odmiany tworzyw, różne poziomy dodatku recyklatu, różne zakresy badań i analiz w poszczególnych etapach powodują kłopoty z odbiorem opisywanych zjawisk i efektów.

4. Ocena hipotezy naukowej, celu oraz zakresu pracy

Sformułowana na stronie 69 hipoteza brzmi: Istnieje możliwość ponownego zastosowania materiału uzyskanego w procesach recyklingu mechanicznego trójwarstwowych wyprasek opakowaniowych, wytworzonych w technologii współwtryskiwania, jako warstwy rdzeniowej w nowych tego typu wytworach, a także

kształtowania ich właściwości użytkowych poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu wytwarzania. Jest ona zasadniczo poprawna, aczkolwiek powinna być bardziej radykalna. „Istnienie możliwości” powinno być zastąpione bardziej konkretnym „można zastosować”. No i z tej hipotezy można wydzielić dwie składowe, jedną dotyczącą możliwości zastosowania recyklatu jako warstwy wewnętrznej wyprasek i drugą dotyczącą możliwości kontrolowania właściwości poprzez odpowiedni dobór parametrów recyklingu i wytwarzania wyprasek.

W rozprawie pojawiają się cele naukowe oraz liczne cele badań w każdym etapie. Szczegółowe cele naukowe to:

- Określenie podatności cienkościennych wyprasek trójwarstwowych PP/EVOH/PP wytworzonych w technologii współwtryskiwania na procesy składowe recyklingu mechanicznego.
- Ocena wpływu zawartości kopolimeru etylenu i alkoholu winylowego (EVOH) na właściwości przetwórcze mieszaniny PP+EVOH po pierwszym i drugim cyklu recyklingu mechanicznego.
- Określenie odpowiednich warunków cięcia i rozdrabniania cienkościennych, trójwarstwowych opakowań PP/EVOH/PP oraz PP/R(PP+EVOH)/PP, w kierunku podwyższenia efektywności procesowej.
- Ocena wpływu parametrów procesu współwtryskiwania na wybrane właściwości trójwarstwowych opakowań PP/EVOH/PP i PP/R(PP+EVOH)/PP oraz na relacje geometryczne pomiędzy warstwami w ściance wypraski PP/R(PP+EVOH)/PP (pierwszy cykl recyklingu mechanicznego w obiegu zamkniętym).
- Określenie własności mechanicznych wyprasek z regranulatu R(PP+EVOH), uzyskanego podczas rozdrabniania wytworów PP/R(PP+EVOH)/PP (drugi cykl recyklingu w obiegu zamkniętym).

Cele naukowe (wymienione powyżej) oraz cele badawcze, wymienione w etapach badawczych pracy są szczegółowe i zostały precyzyjnie zapisane.

W badaniach wstępnych dokonano oceny:

- Przenikalności tlenu przez pierwotne wypraski trójwarstwowe PP/EVOH/PP, jako poziom odniesienia do dalszych badań w tym zakresie, realizowanych w ramach badań głównych.
- Podatności opakowań pierwotnych PP/EVOH/PP na proces cięcia, rozdrabniania i separacji warstw.
- Właściwości przetwórczych regranulatu R(PP+EVOH), otrzymanego w procesie recyklingu mechanicznego oryginalnych wyprasek PP/EVOH/PP (pierwszy cykl recyklingu).

- Zdolność do płynięcia stopionego materiału wtórnego oznaczono za pomocą wskaźnika MFR oraz poprzez pomiar lepkości pozornej w formie wtryskowej.
- Właściwości mechanicznych wyprasek otrzymanych w standardowym procesie wtryskiwania z regranulatu R(PP+EVOH), otrzymanego w procesie recyklingu mechanicznego pierwotnych wyprasek PP/EVOH/PP (pierwszy cykl recyklingu).

W pierwszym etapie badań głównych:

- Weryfikacja ciągłości i rzeczywistej grubości warstwy EVOH w oryginalnych wypraskach PP/EVOH/PP oraz potwierdzenie ich składu materiałowego.
- Ocena wpływu prędkości obwodowej wirnika młyna nożowego oraz kąta ostrza ruchomych noży tnących na efektywność procesu cięcia i rozdrabniania cienkościennych wyprasek trójwarstwowych PP/EVOH/PP.
- Ocena podatności na rozwarstwianie ścianek wyprasek PP/EVOH/PP, po procesach cięcia i rozdrabniania.

W drugim etapie badań głównych:

- Ocena podatności kapsulek kawowych na proces rozdrabniania przy zmiennej prędkości obrotowej wirnika młyna nożowego w aspekcie właściwości otrzymanego recyklatu R1(PP+EVOH).
- Ocena procesu wytłaczania recyklatu R1(PP+EVOH) w celu uzyskania regranulatu o zawartości EVOH na poziomie 5% obj.
- Wytworzenie w technologii współwtryskiwania wyprasek trójwarstwowych PP/R1(PP+EVOH)/PP ze zmiennym udziałem regranulatu R1(PP+EVOH) w warstwie rdzeniowej.
- Ocena wpływu nastaw procesowych na rozkład i rozrzut grubości warstw w przekroju ścianki wypraski PP/R1(PP+EVOH)/PP.
- Zbadanie właściwości mechanicznych wyprasek trójwarstwowych PP/R1(PP+EVOH)/PP ze zmienną zawartością R1(PP+EVOH) w ściance wytworu.
- Ocena przenikalności tlenu przez ściankę wypraski PP/R1(PP+EVOH)/PP oraz badania migracji.

W trzecim etapie badań głównych:

- Ocenę podatności na procesy cięcia i rozdrabniania wyprasek PP/R1(PP+EVOH)/PP, przy zmiennej zawartości regranulatu R1(PP+EVOH).
- Oznaczenie właściwości reologicznych regranulatów R1(PP+EVOH) oraz R2(PP+EVOH).

- Wytworzenie uniwersalnych kształtek badawczych z regranulatów R1(PP+EVOH) oraz R2(PP+EVOH) o tej samej zawartości kopolimeru EVOH oraz porównanie ich właściwości mechanicznych.

Zakres pracy i zrealizowanych badań jest szeroki, nawet bardzo szeroki. Podział na rozdziały jest zasadniczo logiczny ale niestety ilość etapów, odmiennosć badanych w tych etapach „objektów”, różne materiały stosowane w badaniach, również dwie różne odmiany polipropylenu (Moplen RP390T i Dupure TU78V), dwie różne odmiany EVOH (EVAL XEP-540 i Soarnol DC32128) różne poziomy dodatku recyklatu, różne zakresy badań i analiz w poszczególnych etapach budzą pewne wątpliwości i powodują kłopoty z odbiorem opisywanych zjawisk i efektów.

Pomimo powyższej uwagi, zarówno hipotezy jaki zakres zrealizowanych i opisanych w pracy badań należy ocenić pozytywnie.

5. Ocena poziomu naukowego rozprawy

Zakres pracy oraz zrealizowanych badań i analiz jest bardzo szeroki. Wieloetapowy charakter badań, znaczne zróżnicowanie analizowanych obiektów, zastosowanie różnych materiałów, zróżnicowane poziomy dodatku recyklatu oraz odmienne zakresy badań w poszczególnych etapach mogą podczas lektury powodować pewne trudności w jednoznacznym uporządkowaniu opisywanych zjawisk i obserwowanych efektów.

Na podstawie wyników badań sformułowano wnioski końcowe, potwierdzające możliwość wtórnego wykorzystania regranulatów R(PP+EVOH) w technologii współwtryskiwania, spełnienie wymagań normatywnych dotyczących migracji substancji do żywności oraz osiągnięcie poziomu gotowości technologicznej, odpowiadającego prezentacji technologii w ostatecznej formie. Rozwiązania zaproponowane w pracy mają charakter aplikacyjny i zostały opracowane na podstawie badań realizowanych w skali półprzemysłowej i przemysłowej. Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój technologii recyklingu mechanicznego wielowarstwowych opakowań polimerowych, zgodnie z wytycznymi gospodarki cyrkularnej oraz aktualnym ustawodawstwem Unii Europejskiej, stanowiąc nową propozycję dla przemysłu w zakresie ponownego wykorzystania materiałów PCR pochodzących z recyklingu postkonsumenckich opakowań do żywności.

Na podstawie przeprowadzonych badań sformułowano oryginalne osiągnięcia naukowe rozprawy, obejmujące kompleksową analizę wpływu parametrów procesu współwtryskiwania na rozkład i grubosć warstw w ścianie wypraski PP/R1(PP+EVOH)/PP, potwierdzenie istotnego wpływu prędkości, czasu opóźnienia oraz objętości wtrysku regranulatu na jego zawartość w warstwie rdzeniowej, a także uzyskanie poprawnej geometrycznie struktury trójwarstwowej zawierającej ponad 50% obj. regranulatu. Wytypowano korzystne warunki realizacji procesów cięcia i rozdrabniania cienkościennych wyprasek trójwarstwowych, potwierdzono wpływ zawartości EVOH na lepkość pozorną regranulatów oraz wykazano możliwość ponownego wykorzystania regranulatów do

wytwarzania nowych wyprasek współwtryskiwanych z zachowaniem poprawnej struktury warstwowej i właściwości funkcjonalnych.

Potwierdzono brak migracji substancji niezamierzonych przez ściankę wyprasek PP/R1(PP+EVOH)/PP oraz wzrost barierowości wraz ze wzrostem udziału objętościowego EVOH, rozproszonego w osnowie polipropylenowej.

Dokonując generalnej oceny poziomu naukowego recenzowanego doktoratu stwierdzam, że badania i sama praca, pomimo wspomnianej wielowątkowości i zróżnicowań zostały właściwie zaplanowane. Autor zrealizował szeroki plan badań, dobrał właściwe, czasem równoległe techniki badawcze, przeprowadził analizę statystyczną wyników, wraz z analizą statystyczną ANOVA, dokonał stosownych analiz często wyjaśniając mechanizmy stwierdzonych efektów, na ich podstawie osiągnął zakładany cel - potwierdził postawioną tezę oraz sformułował liczne, generalnie trafne wnioski.

Należy zauważyć, że w przeglądzie literatury Autor w większym stopniu skupił się na charakterystyce tworzyw polimerowych i ich właściwościach. Przegląd literatury mógłby zostać bardziej ukierunkowany na zagadnienia związane z technikami wytwarzania opakowań cienkościennych oraz problematyką recyklingu mechanicznego tworzyw opakowaniowych. Takie rozszerzenie tej części pracy pozwoliłoby na lepsze powiązanie analizowanych zagadnień z kontekstem technologiczno-materiałowym oraz pełniejsze osadzenie prowadzonych badań w ramach dyscypliny inżynieria mechaniczna.

Pomimo uwag dotyczących zwłaszcza podziału oraz złożonej metodyki badań poziom naukowy recenzowanej pracy spełnia w bardzo dobrym stopniu wymagania stawiane pracom doktorskim. Struktura pracy jest właściwa. Dokonano przeglądu literatury. Sformułowano cel i tezę, graficznie pokazano wieloetapowy szeroki zakres badań i analiz. Zrealizowano postawione zdania badawcze, potwierdzając że jest możliwe ponowne zastosowanie materiału uzyskanego w procesach recyklingu mechanicznego trójwarstwowych wyprasek opakowaniowych, wytworzonych w technologii współwtryskiwania, jako warstwy rdzeniowej w nowych tego typu wytworach, a także kształtowania ich właściwości użytkowych poprzez odpowiedni dobór parametrów procesu wytwarzania.

6. Merytoryczne uwagi szczegółowe

W trakcie lektury niniejszej dysertacji powstało wiele mniej lub bardziej istotnych szczegółowych uwag i wątpliwości o charakterze merytorycznym, poniżej wypunktowano ważniejsze z nich:

- Szkoda, że Doktorant nie pokazał schematów narzędzi i ostrzy noży używanych do badania cięcia i rozdrabniania cienkościennych pojemników. Tym bardziej, że w pracy analizuje kąty ostrzy. Znacznie ułatwiło by to zrozumienie metodyki i wyników w tym

zakresie. Wątpliwości budzi podpis „wolnoobrotowy młyn walcowy” widoczny pod fotografią rys. 21, kiedy w opisie metodyki czytamy „przemysłowy młyn nożowy 13.20sv (s. 76). Powstaje wrażenie, że to dwa niezależne urządzenia. Czy do badania cięcia używano tego samego urządzenia co do rozdrabniania? Na stronie 95 Doktorant stwierdził (...) wszystkie badania cięcia i rozdrabniania realizowano na tym samym stanowisku badawczym (...). Na stronie 96 czytamy: „Badania podatności materiałów wielowarstwowych na cięcie i rozdrabnianie nożowe przeprowadzono z zastosowaniem specjalistycznej aparatury badawczej. Oryginalne stanowisko do badania procesów cięcia i rozdrabniania (wyposażenie Katedry Technik Wytwarzania Politechniki Bydgoskiej) (...)”. Nie sposób w tym miejscu pominąć znaczącego wkładu bydgoskiego ośrodka i promotora rozprawy, prof. Dariusza Sykutery, w rozwój i ukierunkowanie badań dotyczących rozdrabniania tworzyw, zatem warto było to zagadnienie poszerzyć. Poproszę aby Doktorant odniósł się do tych kwestii podczas publicznej obrony.

- Na stronie 8 Doktorant wyjaśnia stosowane w pracy oznaczenia i skróty BOPP i CPP i wyjaśnia je jako „polipropylen orientowany dwuosiowo” i „jednoosiowo”. Pierwsze oznaczenie rzeczywiście BOPP odnosi się do dwuosiowo orientowanych folii (Biaxial Oriented PP) faktycznie z polipropylenu. Zaś CPP raczej dotyczy nieorientowanych, odlewanych folii (Cast PP). Jednoosiowo orientowane folie z PP oznaczamy OPP.
- Co to jest regranulat? Czy można tego terminu używać zamiennie z terminem recyklat? Czy można dokonać wtrysku regranulatu (s. 6, 121...)? Czy regranulat znajduje się w formie wtryskowej (s. 88) lub w rdzeniu wyprasek (s. 17...)? Czy sformułowanie „Oceniono wpływ obecności kopolimeru EVOH i regranulatu R(PP+EVOH) na właściwości przetwórcze oraz na właściwości mechaniczne wyprasek” (s. 74) lub „(...) ze zmiennym udziałem objętościowym regranulatu w warstwie rdzeniowej (...)” (s. 122) jest poprawne, czy to nadmierny skrót myślowy? Skrót ten pojawia się w bardzo wielu miejscach pracy. Poproszę aby Doktorant odniósł się do tej kwestii podczas publicznej obrony.
- Na stronie 56 Autor charakteryzuje „recykling czwartorzędowy – odzysk energii”. Czy odzysk energii zaliczany jest w Polsce do metod recyklingu? Poproszę aby Doktorant odniósł się do tej kwestii podczas publicznej obrony.
- W opisach metodyki badań nie zdefiniowano konkretnego typu standardowych próbek w kształcie wiosełek stosowanych do badań właściwości wytrzymałościowych.
- Doktorant nie zdefiniował w jakiej płaszczyźnie cienkościennych wyprasek odbywało się pojedyncze cięcie.
- Omawiając uszczelki indukcyjne na stronie 17 Autor stwierdza „Rozwiązanie to zwiększa bezpieczeństwo konsumenta, a jednocześnie ogranicza ryzyko ponownego wykorzystania opakowań.” Nie bardzo rozumiem co należy rozumieć pod pojęciem „ryzyka ponownego wykorzystania opakowań”.

- Na stronie 36 czytamy: „Polipropylen (PP) - należy do najczęściej stosowanych tworzyw sztucznych w przemyśle opakowaniowym. Charakteryzuje się strukturą semikrystaliczną, która może sięgać nawet 70% objętości polimeru.” Autorowi chyba chodziło o zawartość fazy krystalicznej w semikrystalicznym PP - 70% fazy krystalicznej może być w izotaktycznym PP.
- Przedstawiony na stronie 54 rysunek 17. nie obrazuje „kolejności” postępowania, lecz hierarchiczne uporządkowanie metod ograniczania ilości odpadów, co nie znajduje odzwierciedlenia w jego tytule.
- Doktorant dość zamiennie w stosunku do badanych wyprasek używa terminów: obiekt, wypraska, wypraska do żywności, cienkościenna wypraska trójwarstwowa, kapsułki kawowe, trójwarstwowe kapsułki kawowe, wypraska typu „kapsułka do kawy”. O ile w opisie planu badań „obiekt” nie budzi wątpliwości, to w części analitycznej już tak. „Stanowisko badawcze umożliwiało przeprowadzenie pomiaru z użyciem całego obiektu (rys. 20), bez konieczności wycinania z niego próbek, (...)” (s. 82). „Próbie statycznego ściskania wykonano z użyciem obiektów badań w całości” (125). Tu znacznie bardziej pasował by termin wypraska. Analizowane cienkościennie wypraski zasadniczo wypełniają wymogi terminu „kubek” - cienkościenny, zwężający się, osiowo-symetryczny element/pojemnik otwarty od góry, ewentualnie „element o geometrii kubka”.
- Na stronie 17 Autor opisuje systemy między innymi umożliwiające „(...) zapewnienie identyfikacji żywności potencjalnie zepsutej lub naruszonej (...)” i jako przykład podaje „Najpowszechniejsze z nich to systemy utrudniające otwarcie przez dzieci (ang. child-resistant) oraz sygnalizujące wcześniejsze naruszenie (ang. tamper-evident).”
- Uważam, że przedstawiona graficznie na rysunku 8 przenikalność tlenu i zestawiony w tabeli 7 „wpływ stopnia krystaliczności na przenikalność tlenu przez wybrane polimery” wyrażone w anglosaskiej jednostce $\text{cc}\cdot\text{mil}/100\text{ cal}^2\cdot\text{dzień}\cdot\text{atm}$ powinny zostać przeliczone na powszechnie stosowane w naszym kraju jednostki $\text{cm}^3\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot 24\text{ h}\cdot\text{atm}$ lub na jednostki układu SI - $\text{cm}^3\cdot\text{mm}/\text{m}^2\cdot 24\text{ h}\cdot\text{bar}$.
- Autor twierdzi, że współwytłaczanie pozwala łączyć termodynamicznie niemieszalne tworzywa bez dodatku środków adhezyjnych w ściance wypraski (s. 114) a kilka linijek niżej czytamy „Skłonność do rozwarstwiania się ścianek trójwarstwowych wyprasek PP/EVOH/PP została potwierdzona zwłaszcza w procesach cięcia i rozdrabniania prowadzonych przy małych prędkościach obrotowych wirnika.” O jakich połączeniach jest zatem mowa?
- Na stronie 137 czytamy: „Wpływ odległości od kołnierza na grubość warstwy zewnętrznej jest istotnie modyfikowany przez zawartość warstwy rdzeniowej.” Czy odległość od kołnierza wypraski jest czynnikiem procesowym?

- „Efektywność rozdrabniania w dużej mierze zależy od cech geometrycznych i kształtu wyrobu.” (s. 116) Czy kształt nie jest aby cechą geometryczną?
- Autor posługuje się pojęciem efektu fontannowego, powszechnie znanym w literaturze przetwórstwa tworzyw polimerowych (s. 146). Dla kompletności wywodu wskazane byłoby jednak krótkie jego zdefiniowanie, zobrazowanie lub ewentualnie odesłanie do literatury źródłowej.
- Analizując wykres zawarty na rysunku 77, zwłaszcza zakres wyników obejmujący wartości od bliskich zeru do ponad dwukrotności średniej trzeba stwierdzić, że występuje bardzo duża zmienność danych, co poddaje w wątpliwość zasadność analizy tych danych, zwłaszcza stosowania w tym wypadku analizy ANOVA.
- Na stronie 165 czytamy: „Potwierdzono (...) istotny wpływ udziału regranulatu oraz interakcję pomiędzy zawartością rdzenia a sposobem wycinania próbek.” Czy kierunek wycinania próbek ma jakikolwiek wpływ na udział recyklatu w rdzeniu? Czy przy pomiarach właściwości wytrzymałościowych faktycznie chodzi o sposób wycinanie próbek czy może raczej o kierunek pomiaru??
- Dość dyskusyjnym moim zdaniem jest wykazanie we wniosku 12 na stronie 185 braku istotnego wpływu liczby cykli recyklingu na właściwości przetwórcze i mechaniczne granulatów biorąc pod uwagę, że badania objęły zasadniczo tylko dwa cykle recyklingu no i w tym samym wniosku Doktorant sam stwierdza, że „Wytrzymałość na rozciąganie regranulatu R_2 , uległa istotnej redukcji o 6% (z 25,2 do 23,6 MPa), a udarność oznaczona metodą Izoda obniżyła się o 16% (z 2,56 do 2,16 kJ/m²). Zaobserwowano także, że próbki po drugim cyklu recyklingu mechanicznego charakteryzowały się wytrzymałością na udarowe rozciąganie o 10% mniejszą, w stosunku do wyprasek wykonanych z regranulatu R_1 .” Niewątpliwie warto kontynuować te badania w kierunku badania kolejnych cykli, co bardzo poprawnie wskazał Doktorant jako pierwszy z kierunków dalszych badań (s. 186).
- Autor wykazał się dobrą orientacją w literaturze międzynarodowej, natomiast zauważalny jest ograniczony udział publikacji krajowych. Należy zwrócić uwagę, że w polskiej literaturze dostępne są prace dotyczące zagadnień związanych z tworzywami polimerowymi, opakowaniami i ich recyklingiem, które mogłyby wzbogacić część przeglądową rozprawy.

7. Ocena strony redakcyjnej pracy

Należy stwierdzić, że praca jest opracowana estetycznie a pod względem językowym i formalnym bardzo starannie. Opisy techniczne oraz tekst są napisane poprawnym językiem, choć czasem występują nieliczne błędy edycyjne: literowe, stylistyczne i interpunkcyjne. Tu należy również wspomnieć o licznie występującym

nadmiernym skrócie myślowym dotyczącym kwestii regranulatu i recyklatu, co było wspomniane w uwagach merytorycznych.

W pracy zauważono niewielką ilość mniejszych i większych usterek językowych i redakcyjnych, poniżej wypunktowano część z nich:

- Zauważalnym uchybieniem o charakterze formalno-edycyjnym jest brak ujęcia stosowanych w pracy norm w spisie literatury bądź w odrębnym wykazie norm.
- Wyliczenie grup właściwości (a–e na stronach 21 - 31) nie zostało poprzedzone odpowiednim wprowadzeniem i dwukropkiem, co osłabia klarowność zapisu. Tym bardziej, że wewnątrz grup występują dodatkowe wyliczenia z punktarami.
- W tekście rozprawy trafiają się zdania w których drobnych korekt wymaga stylistyka. Zdania typu "(...) materiał w krótkim czasie opuszczał przez otwory sitowe komorę roboczą, osiągając pożądany stopień rozdrobnienia." (s. 113). Poprawniejszym wydaje się sformułowanie „materiał w krótkim czasie osiągał pożądany stopień rozdrobnienia i przez otwory w sicie opuszczał komorę roboczą.”
- Na stronie 122 występują zbędne spacje pomiędzy wartością i jej miarą (220°C), na innych stronach zapis jest poprawny. Analogicznie na stronie 130 widzimy zbędną spację w zapisie 130%. Na stronie 147 sytuacja jest odwrotna, brakuje spacji pomiędzy 10 a miara mm. Podobnie sytuacja czasem wygląda z zapisem skrótu spółki z ograniczoną odpowiedzialnością. Trzeba jednak zauważyć, że są to nieliczne przypadki.

Niektóre wymienione powyżej uwagi mogą być dyskusyjne. Nie wyczerpują one również wszystkich, zwłaszcza drobniejszych, usterek merytorycznych i edycyjnych napotkanych w tekście recenzowanej pracy. Usterki te nie utrudniają odbioru opisywanych treści i nie wpływają negatywnie na generalnie pozytywną ocenę recenzowanej pracy.

Wypunktowane uwagi mają na celu wskazanie Doktorantowi poważniejszych usterek napotkanych w tekście jego pracy kwalifikacyjnej, co powinno spowodować stosowne przemyślenia terminologiczne i przykładanie większej uwagi do bardziej precyzyjnego formułowania tekstów w dalszej pracy naukowej.

8. Podsumowanie

Głównym celem pracy była ocena podatności trójwarstwowych wyprasek PP/EVOH/PP, wytworzonych metodą współwtryskiwania, na składowe etapy procesu recyklingu mechanicznego zgodnie z zasadami gospodarki obiegu zamkniętego i PPWR. Dodatkowo analizowano zależności pomiędzy kształtem wypraski, udziałem objętościowym EVOH w warstwie rdzeniowej a podatnością na procesy cięcia i rozdrabniania, jak również wpływ tych czynników na właściwości mechaniczne i użytkowe. Równolegle określono najkorzystniejsze warunki realizacji procesów

rozdrabniania z punktu widzenia energochłonności oraz jakości uzyskanego recyklatu. Analizowano także wpływ parametrów procesu współwtryskiwania na rozkład grubości poszczególnych warstw w strukturze trójwarstwowej oraz wpływ wielokrotnego przetwórstwa na właściwości użytkowe opakowań PP/R(PP+EVOH)/PP oraz samych recyklatów.

Można zatem uznać, że bez wątpienia niniejsza praca stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego. Zrealizowane badania mają charakter kompleksowy i wieloaspektowy, praca obejmuje szerokie spektrum zagadnień, zastosowano szeroki wachlarz metod badawczych, uzupełniony pogłębioną analizą wyników. Recenzowana dysertacja ma bardzo wysoki potencjał aplikacyjny. Poziom naukowy pracy spełnia, w stopniu bardzo dobrym, wymagania stawiane pracom doktorskim.

Rozprawa wnosi istotny wkład w rozwój technologii recyklingu mechanicznego wielowarstwowych opakowań polimerowych, zgodnie z zasadami gospodarki cyrkularnej oraz wymaganiami związanego z gospodarką opakowaniami i odpadami opakowaniowymi (PPWR) ustawodawstwa Unii Europejskiej, oferując przemysłowi wdrażalne rozwiązania w zakresie ponownego wykorzystania materiałów PCR pochodzących z recyklingu postkonsumenckich opakowań do żywności.

Doktorant potwierdził, że potrafi dokonać analizy literatury, potrafi dobrać materiał do badań oraz szeroki wachlarz stosowanych technik i oznaczeń. Potrafi zaplanować i zrealizować złożony, wieloetapowy eksperyment w przemyśle i w laboratoriach Politechniki Bydgoskiej, potrafi przeanalizować uzyskane wyniki a na koniec wyciągnąć poprawne wnioski.

Na dzień pisania recenzji mgr inż. Piotr Wieczorek według bazy Scopus brał udział w opracowaniu 1 wydanej publikacji z listy JCR, w polskim czasopiśmie Polimery. W publikacji tej występuje jako pierwszy autor i jest w niej corresponding author. Publikacja została zaakceptowana do druku w lipcu 2025 roku i jeszcze nie doczekała się cytowań. Zatem indeks H Doktoranta wynosi obecnie 0. Baza WoS (Web of Science) wykazuje takie same wartości.

Na uwagę zasługuje fakt, że oceniana rozprawa jest doktoratem zrealizowanym w ramach programu „Doktorat wdrożeniowy” MNiSW (nr DWD/5/0265/2021), zrealizowanego w Politechnice Bydgoskiej im. Jana i Jędrzeja Śniadeckich. Trzeba zauważyć, że opisane w dysertacji badania mają charakter kompleksowy i wieloaspektowy, praca obejmuje szerokie spektrum zagadnień, zastosowano szeroki wachlarz metod badawczych, uzupełnionych pogłębioną analizą wyników. Recenzowana praca doktorska ma bardzo wysoki potencjał aplikacyjny.

Powyżej opisane fakty potwierdzają, że Doktorant, pan mgr inż. P. Wieczorek, posiadał w stopniu bardzo dobrym stosowną wiedzę i umiejętności z zakresu prowadzenia pracy naukowej, może zatem ubiegać się o nadanie tytułu doktora nauk technicznych.

Po zapoznaniu się z rozprawą doktorską pana magistra inżyniera Piotra Wieczorka pt. Gospodarka w obiegu zamkniętym termoplastycznych wyprasek wielowarstwowych wytwarzanych metodą współwtryskiwania stwierdzam, że opracowanie to istotnie uzupełnia naszą wiedzę w zakresie recyklingu i przetwarzania wielowarstwowych cienkościennych opakowań i stanowi oryginalne rozwiązanie postawionego problemu naukowego a także potwierdza, że Doktorant posiadał, w stopniu bardzo dobrym, wiedzę teoretyczną oraz nabył umiejętności z zakresu pracy naukowej i jest gotowy do samodzielnego prowadzenia dalszych badań naukowych. Spełnia zatem wymagania stawiane kandydatom do nadania stopnia naukowego doktora nauk technicznych. Recenzowana dysertacja może zatem stanowić podstawę do ubiegania się o nadanie stopnia naukowego doktora w dyscyplinie inżynieria mechaniczna.

Wobec powyższego, wnoszę o dopuszczenie rozprawy doktorskiej pana mgra inż. Piotra Wieczorka do publicznej obrony.



dr hab. inż. Tomasz Rydzkowski, prof. PK